

TRAITÉ EXPÉRIMENTAL  
**D'ÉLECTRICITÉ**  
ET DE MAGNÉTISME

I

A LA MÊME LIBRAIRIE :

- BUIGNET.** — **Manipulations de physique.** Cours de travaux pratiques professé à l'École de pharmacie de Paris, par H. BUIGNET, professeur à l'École de pharmacie. Paris, 1877, 1 vol. in-8 de 800 p., avec 265 fig. et 1 pl. col., cart. 16 fr.
- CYON.** — **Principes d'électrothérapie,** par le docteur CYON, professeur à l'Académie médico-chirurgicale de Saint-Petersbourg. Paris, 1873, 1 vol. in-8 de VIII-275 pages, avec figures. 4 fr.
- DE LA RIVE.** — **Traité d'électricité théorique et appliquée,** par A. DE LA RIVE, professeur de l'académie de Genève. Paris, 1854-58, 3 vol. in-8, avec 447 fig. 27 fr.
- DUCHENNE (G.-B.)** (de Boulogne). — **De l'électrisation localisée,** et de son application à la pathologie et à la thérapeutique par courants induits et par courants galvaniques interrompus et continus, par le docteur G. B. DUCHENNE (de Boulogne). 3<sup>e</sup> édition. Paris, 1872, 1 vol. in-8 de XII-4120 p., avec 255 fig. et 3 pl. noires et colorisées. 18 fr.
- DUCHENNE (G. B.)**. — **Physiologie des mouvements,** démontrée à l'aide de l'expérimentation électrique et de l'observation clinique, et applicable à l'étude des paralysies et des déformations. Paris, 1867, 1 vol. in-8 de XVI-872 pages, avec 101 figures. 14 fr.
- DUCHENNE (G. B.)**. — **Mécanisme de la physionomie humaine,** ou Analyse électro-physiologique de l'expression des passions. 2<sup>e</sup> édition. Paris, 1876, 1 vol. in-8 de XII-264 pages, avec 9 planches photographiées représentant 144 figures. 20 fr.
- Le même, édition de luxe. 2<sup>e</sup> édition. Paris, 1876, 1 vol. in-8 de XII-264 pages, avec atlas composé de 74 planches photographiées, et de 9 planches représentant 144 figures. Ensemble, 2 vol. in-8, cart. 68 fr.
- Le même, grande édition in-folio, formant 84 pages de texte in-folio à 2 col. et 84 planches tirées d'après les clichés primitifs, dont 74 sur plaques normales. 200 fr.
- JOBERT (A. J.)**. — **Des appareils électriques des poissons électriques.** Paris, 1858, in-8, avec atlas grand in-fol. de 11 pl. 10 fr.
- MATTEUCCI (C.)**. — **Traité des phénomènes électro-physiologiques des animaux,** suivi d'études anatomiques sur le système nerveux et sur l'organe électrique de la Torpille, par P. SAVI. Paris, 1844, in-8, avec 6 pl. (10 fr.). 4 fr.
- REMAK.** — **Galvanothérapie,** ou de l'application du courant galvanique constant au traitement des maladies nerveuses et musculaires. Traduit de l'allemand par Alphonse MORPAIN. Paris, 1860, 1 vol. in-8 de 467 p. 7 fr.
- SCOUTETTEN (H.)**. — **De l'électricité considérée comme une cause principale de l'action des eaux minérales sur l'organisme.** Paris, 1864, 1 vol. in-8 de 420 pages. 6 fr.
- TRIPPIER.** — **Manuel d'électrothérapie.** Exposé pratique et critique des applications médicales et chirurgicales de l'électricité, par le docteur Aug. TRIPIER. Paris, 1861, 1 vol. in-18 Jésus, avec 100 fig. 6 fr.
- VALENCIENNES (A.)**. — **Recherches sur l'organe électrique du Malaptézure électrique.** Paris, 1841, in-4, avec 1 pl. 1 fr. 50
- WUNDT.** — **Traité élémentaire de physique médicale,** par le docteur W. WUNDT, professeur à l'université de Heidelberg. Traduit, avec de nombreuses additions, par le docteur Ferdinand MONOYER, professeur de physique médicale à la Faculté de médecine de Lyon. Paris, 1871, 1 vol. in-8, 704 p., 396 fig., y compris 1 planche en chromolithographie. 12 fr.

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 PREMIER

AVEC 27 PLANCHES ET 177 FIGURES

PARIS

LIBRAIRIE J. B. BAILLIÈRE ET FILS

19, RUE HAUTEFEUILLE, 19

1881



## INTRODUCTION

---

Les phénomènes rapportés à l'électricité peuvent être envisagés à tant de points de vue, qu'on ne saurait s'étonner de la diversité des formes sous lesquelles l'exposition de cette branche si importante de la physique peut être présentée. Les progrès accomplis en Angleterre dans ces dernières années à l'occasion des grands travaux de télégraphie sous-marine ont modifié profondément l'état de la science telle qu'elle est exposée dans les anciens traités, d'ailleurs fort estimés, publiés en France, et ont naturellement appelé l'attention sur les publications anglaises relatives à l'enseignement de l'électricité ; ces publications sont nombreuses et présentent, pour la plupart, ce caractère spécial de donner à la fois la description détaillée des procédés expérimentaux usités dans la pratique télégraphique, et les aperçus les plus élevés sur la science de l'énergie avec toutes les conséquences qui en découlent, en particulier l'emploi courant des unités absolues dans la mesure des phénomènes. C'est qu'en

Angleterre beaucoup de progrès récents de la science électrique ont été accomplis en quelque sorte sous la pression des événements, par des savants apportant les ressources les plus puissantes de l'analyse mathématique à la solution des problèmes industriels : de là cette union permanente et d'ailleurs très féconde d'idées théoriques générales à la préoccupation toujours présente des problèmes pratiques ; de là aussi le double caractère imprimé à l'enseignement.

Le *Traité expérimental d'électricité et de magnétisme* recommande au public français comme donnant une idée de ce mode d'enseignement qui plaît en général aussi bien par ses côtés précis que par ses aspects pratiques : l'auteur, M. Gordon, disciple du savant et regretté professeur Clerk Maxwell, a cherché à reproduire sous une forme élémentaire les leçons du maître, en adoptant une méthode d'exposition purement expérimentale, mais tout en conservant l'esprit élevé qui doit régner désormais dans cette branche de la science. Son livre est fait au point de vue du public anglais, c'est-à-dire avec une préférence marquée pour les travaux, les expériences ou les applications faites dans son pays. Les traducteurs, MM. Raynaud et Seligmann, ingénieurs des télégraphes, ont respecté scrupuleusement l'ordre adopté par l'auteur, les formes de démonstration et même jusqu'aux locutions consacrées en Angleterre dans le langage des électriciens.

Sous ce rapport, le lecteur français trouvera à ce livre une physionomie originale, je serais tenté de dire une saveur particulière; il y verra représenté fidèlement le caractère de l'expérimentation anglaise, par la description détaillée des méthodes ou des appareils les plus usités: ainsi il y trouvera le résumé des travaux du comité de l'Association Britannique, la description de quelques-uns des instruments les plus intéressants des laboratoires de l'université de Cambridge, de Glasgow, ou des belles installations de MM. Warren De la Rue et Spottiswoode, l'observatoire magnétique de Kew, etc.

En dehors de ces descriptions, on rencontre plusieurs chapitres fort intéressants à un point de vue général; l'un des plus originaux comprend l'étude des capacités inductives: l'auteur, qui a fait de cette branche de l'électricité le sujet principal de ses recherches, la traite avec une compétence complète et une grande abondance de détails nouveaux. On en peut dire autant de l'électro-optique, nom donné à l'ensemble de toutes les relations existant entre l'électricité et la lumière, à savoir: la découverte de Faraday sur la rotation magnétique du plan de polarisation, les travaux de Verdet, ceux de l'auteur, les beaux phénomènes découverts récemment par le D<sup>r</sup> Kerr, enfin les curieuses recherches de Maxwell sur la théorie électromagnétique de la lumière.

A l'exemple des électriciens anglais, M. Gordon définit et emploie d'une manière courante les unités absolues, dont l'introduction dans l'enseignement élémentaire est maintenant commandée par l'usage presque exclusif qu'en font non seulement les savants, mais même les praticiens. C'est un exemple que l'enseignement français doit suivre à son tour; il serait étrange, en effet, que ces unités, développement naturel des principes qui ont présidé à la création du système métrique, trouvassent de l'opposition dans le pays même qui a conçu ce système et l'a répandu par tout le monde.

Si l'emploi de noms nouveaux et de considérations délicates fait éprouver au début quelques difficultés, on doit songer au bénéfice qui résulte pour la science de la réduction au minimum, dans les mesures, du nombre des éléments arbitraires: du reste, l'un des premiers fruits obtenus dans cette voie doit être un vif encouragement pour l'avenir. On sait, en effet, que c'est à l'emploi des unités absolues qu'on doit d'avoir aperçu l'identité de la vitesse de la lumière avec le rapport des unités électro-dynamique et électro-statique d'électricité, relation qui ouvre un horizon si étendu sur l'unité des forces physiques.

Le livre de M. Gordon a eu la bonne fortune de trouver comme traducteur et annotateur M. Raynaud,



professeur à l'École supérieure de télégraphie, si versé dans toutes les questions théoriques et pratiques relatives à l'électricité. M. Raynaud a bien voulu se charger de compléter le livre et de l'ajuster aux exigences de l'enseignement de notre pays, dont les tendances diffèrent sous beaucoup de rapports de celles qui règnent dans l'ouvrage anglais : le texte de l'ouvrage ayant été scrupuleusement respecté, c'est par des appendices que les compléments ont été ajoutés. La plupart des chapitres présentent des additions nombreuses, comprenant d'abord le résumé, au point de vue français, des mémoires, ou la description des appareils qui, dans l'édition primitive, s'adressaient surtout au lecteur anglais ; ensuite, les extraits des travaux français ou étrangers, destinés à préciser les sujets traités ; enfin l'exposé succinct des principales formules relatives à l'application des lois physiques à la mesure des phénomènes. A ce point de vue on doit citer les appendices qui résument les définitions et les formules relatives à l'électro-statique dans ses rapports avec la thermodynamique, au magnétisme, aux lois de Ohm et à l'électro-dynamique, et les regarder comme les additions les plus importantes à l'ouvrage anglais : additions d'autant plus utiles que ces développements ne figurent jusqu'à présent dans aucun traité publié en France.

Enfin, plusieurs chapitres ont été fort étendus pour y introduire les travaux les plus récents sur les dé-

charges électriques dans le vide, sur la production de la lumière électrique par les machines d'induction, sur la téléphonie, la photophonie; questions qui ont le privilège d'attirer aujourd'hui avec tant de force l'attention des gens du monde et des savants.

En résumé, l'édition française du *Traité expérimental d'électricité et de magnétisme* de M. Gordon paraît destinée à exercer sur l'enseignement de l'électricité en France une influence salutaire; non seulement dans l'enseignement élémentaire, par la forme attrayante sous laquelle les phénomènes sont présentés; mais jusque dans l'enseignement supérieur, par les notes dont le traducteur l'a enrichie. A ce point de vue, en effet (et ce n'est peut-être pas le moindre éloge que l'on puisse faire de ce livre), il peut être considéré, suivant le vœu de l'auteur, comme une introduction à l'admirable traité de Clerk Maxwell, *Electricity and magnetism*, qui devrait être depuis longtemps traduit dans notre langue.

Enfin, elle est digne de l'attention des savants par l'abondance des documents et le soin avec lequel les découvertes les plus récentes ont été exposées.

A. CORNU,  
Membre de l'Institut (Académie des sciences).

## PRÉFACE DE L'AUTEUR

---

L'objet de ce traité est de donner un exposé complet de certaines parties de la science électrique comme j'ai appris à les connaître, en les envisageant à un point de vue expérimental et bien distinct du point de vue mathématique.

Dans tout le cours de l'ouvrage, j'ai essayé, autant que possible, de rattacher les divers phénomènes décrits à l'hypothèse adoptée par Newton, Faraday et Maxwell, savoir : qu'il n'y a pas d' « action à distance », mais que toutes les actions électriques sont transmises de place en place par des déformations (*strains*) d'un certain milieu continu remplissant l'espace intermédiaire.

Pour rendre ce livre plus utile, je suis entré tout à fait dans le détail de la pratique expérimentale de la plupart des recherches décrites : d'une part, afin que les personnes qui désirent continuer les recherches expérimentales sur le même sujet trouvent dans cet ouvrage l'ensemble de travaux déjà faits ; et d'autre

part, afin de montrer aux lecteurs que les phénomènes électriques ont une existence réelle, et ne sont pas simplement des abstractions ou des résultats de l'analyse mathématique.

Je dois ajouter que, pour comprendre le texte de ce traité il n'est pas nécessaire d'avoir d'autres connaissances mathématiques que celle des équations simples de l'algèbre. On trouvera cependant quelques calculs mathématiques dans les notes et appendices.

La plupart des figures du livre sont originales et ont été gravées sous la direction de M. Cooper, d'après des dessins des instruments les plus récents actuellement en usage, pris par M. Cole et M. Webster, à l'observatoire de Kew, à Cambridge, au Kings'College de Londres, dans plusieurs laboratoires privés, et dans les ateliers des principaux constructeurs d'instruments. J'exprime mes sincères remerciements à ces trois artistes pour le talent et le zèle qu'ils ont apportés dans cette longue et laborieuse tâche.

Je dois également des remerciements, pour les bois et les planches qui m'ont été prêtés, aux Conseils de la Société Royale, de l'Association Britannique, de l'Académie Royale d'Irlande, au Comité de l'observatoire de Kew, à M. W. Spottiswoode (président de la Société Royale), sir W. Thomson, M. De la Rue, M. Crookes, professeur Tyndall, professeur Clerk Maxwell, docteur Kerr, M. Planté, professeur Röntgen, professeur Hughes, professeur Jellett, M. Ayrton, M. Perry,

MM. Elliott frères, et M. Apps. Quelques clichés ont été acquis d'éditeurs français.

Je renouvelle tous mes remerciements les plus affectueux à mes nombreux amis et aux quelques personnes étrangères dont j'ai reçu un concours précieux pour la revision des épreuves et des manuscrits.

M. Ayrton a relu toute la première partie en épreuves et la plupart des matières de la troisième. M. Whipple, surintendant de l'Observatoire de Kew, a relu toute la seconde partie (magnétisme) en manuscrit, en placards et en feuilles; il a préparé pour moi plusieurs tables des résultats obtenus à l'Observatoire, et a surveillé l'exécution des dessins des divers instruments magnétiques qui ont été faits à Kew par M. Webster.

Le professeur Everett a relu toutes les parties de l'ouvrage qui ont trait à la théorie des unités, savoir : les chapitres VIII, XX et XLIV.

Le professeur Tyndall a relu le manuscrit du chapitre sur le diamagnétisme.

M. Spottiswoode a relu les épreuves de tous les chapitres concernant la bobine d'induction et les décharges électriques, c'est-à-dire les chapitres XXXIII à XXXVII. M. Moulton a aussi relu le chapitre sur « l'État sensitif ».

M. Kieser, de la maison Elliott frères, a relu la description des différentes formes de boîtes de résistance.

Le docteur Kerr a relu les chapitres XLVIII et XLIX, dans lesquels sont exposées ses découvertes.

Le professeur Boltzmann, de Vienne, a eu la gracieuseté d'écrire pour moi la théorie mathématique (qui n'a pas encore été publiée) de ses expériences sur la capacité inductive spécifique. L'appendice au chapitre XI est en substance une traduction de sa lettre.

M. J. G. Butcher et M. T. O. Harding m'ont aussi beaucoup aidé dans la rédaction des notes et appendices mathématiques que renferme l'ouvrage.

Holmwood, Dorking, 23 février 1880.

## ERRATA

---

- Page 84, ligne 5, *au lieu de* :  $1\frac{1}{2}$ , 2,  $2\frac{1}{2}$ , etc. dynes, *lisez* :  $(1\frac{1}{2})^2$ ,  $2^2$ ,  $(2\frac{1}{2})^2$ , etc. dynes.  
Page 160, tableau, *au lieu de* : spath d'Irlande, *lisez* : spath d'Islande.  
Page 292, en note, *au lieu de* : page 286, *lisez* : page 284.  
Page 293, ligne 7, *au lieu de* : page 292, *lisez* : page 290.  
Page 340, dans la dernière formule, *au lieu de* :  $\times 0,079$  *lisez* :  $= 0,079$ .  
Page 401, *au lieu de* : Pl. XVII, *lisez* : Pl. XVIII. .  
Page 405, *au lieu de* : Pl. XIII, *lisez* : Pl. XIX.





# TRAITÉ EXPÉRIMENTAL

# D'ÉLECTRICITÉ ET DE MAGNÉTISME

---

## PREMIÈRE PARTIE

### ELECTRO-STATIQUE (1)

---

## CHAPITRE PREMIER

### PRÉLIMINAIRES

Nous n'avons jusqu'ici aucune conception de l'électricité en dehors de celle d'un corps électrisé; nous n'avons pas de preuve que l'électricité ait une existence indépendante, et par conséquent nous devons commencer l'étude de cette science par l'examen des « propriétés des corps électrisés ».

### PROPRIÉTÉS DES CORPS ÉLECTRISÉS

*Définitions.* — Lorsqu'un corps (2) manifeste certaines propriétés, on dit qu'il est *électrisé*.

Ces propriétés sont :

1° Le pouvoir d'attirer ou de repousser les autres corps électrisés;

(1) Voyez page 41.

(2) Autre que du fer ou de l'acier.

2° Le pouvoir d'induire des propriétés semblables sur les corps voisins;

3° Le pouvoir d'attirer les corps légers non électrisés (1);

4° Et le pouvoir d'émettre des étincelles, quand il est fortement électrisé.

Les corps peuvent être électrisés par diverses méthodes, en particulier par « le frottement ».

Si l'on frotte un bâton de verre ou un bâton de cire à cacheter avec un foulard de soie, ce bâton sera électrisé.

On trouve que l'électrisation du verre diffère de celle de la cire à cacheter.

*Expériences.* — Pour les expériences suivantes, il faut avoir deux morceaux d'un tube de verre fort, tel que les tubes employés pour les baromètres, chacun d'eux ayant 35 centimètres de long et 1 à 2 centimètres de diamètre, deux tiges ou bâtons de cire à cacheter grossière, et un foulard de soie. Il faut aussi un support

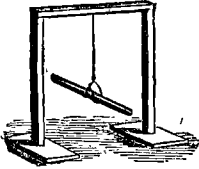


FIG. 1.

en bois (fig. 1), consistant en deux montants verticaux distants de 45 centimètres environ, et reliés par une traverse à la hauteur de 60 centimètres environ; au centre de cette traverse est suspendu à un fil de soie

de 45 centimètres de longueur environ, un étrier en fil métallique.

La forme de cet étrier doit être telle, que lorsqu'il supporte un des bâtons de verre ou de cire à cacheter, celui-ci puisse tourner librement dans un plan horizontal, comme une aiguille de boussole.

(1) La propriété 3° est une conséquence des propriétés 1° et 2°.

Les expériences doivent être faites dans une salle chaude et sèche; les bâtons et le foulard doivent être chauffés devant le feu quelque temps avant de s'en servir.

Frottons vivement deux des bâtons avec le foulard (1), plaçons l'un d'eux dans l'étrier, et approchons l'autre de l'extrémité frottée du premier. On observera alors une *répulsion* énergique si l'on s'est servi de deux tubes de verre ou de deux bâtons de cire à cacheter, et une *attraction* également énergique si l'on s'est servi d'un tube de verre et d'un bâton de cire à cacheter.

En d'autres termes, *les électrisations similaires se repoussent l'une l'autre, les électrisations dissimilaires s'attirent.*

On trouve que toute électrisation appartient à l'une ou l'autre de ces deux catégories : toute électrisation est identique, soit à celle produite par le verre frotté, soit à celle produite par la cire à cacheter frottée.

*On trouve aussi que si l'on ajoute ensemble des quantités égales de l'électricité du verre et de l'électricité de la cire à cacheter, elles se neutralisent l'une l'autre.*

#### ÉLECTRICITÉS (+) ET (-)

Pour cette raison, les deux électricités sont appelées respectivement « positive » et « négative », et, dans l'écriture, on les distingue par les signes (+) et (-).

On a convenu arbitrairement d'appeler (+) l'électricité du verre.

L'algèbre élémentaire nous apprend que si une quantité affectée du signe (+) est ajoutée à une quantité égale affectée du signe (-), le résultat est zéro. Par consé-

(1) L'expérience réussit mieux si deux expérimentateurs frottent chacun simultanément les bâtons avec un foulard.

quent, le fait que le résultat de l'addition de quantités égales d'électricité du verre et d'électricité de la cire à cacheter, est zéro, nous permet de traiter ces quantités comme des quantités algébriques ordinaires affectées des signes (+) et (-).

#### ATTRACTION DES CORPS LÉGERS

Si l'on enlève l'étrier du châssis (fig. 1) et qu'on le remplace par une barbe de plume suspendue au fil de soie, on observe que tous les bâtons électrisés, soit de verre, soit de cire à cacheter, attirent la plume.

#### ÉLECTRISATION DU FROTTEUR

Lorsqu'une tige est électrisée par frottement, on observe que le frotteur est électrisé et qu'il possède une électrisation opposée à celle de la tige.

La vérification expérimentale présente quelques difficultés, à cause de la rapidité avec laquelle l'électricité du frotteur s'échappe à travers la main.

Si, cependant, on préserve la soie du contact de la main en la tenant avec un morceau de feuille de caoutchouc, il sera généralement possible d'observer son effet attractif sur la barbe de plume, et ses effets attractif et répulsif sur les bâtons de verre et de cire à cacheter électrisés, quand ils sont placés dans l'étrier.

*La quantité d'électricité d'une certaine espèce produite sur le frotteur est exactement égale à la quantité de l'autre espèce produite sur la tige.*

Si la tige est vigoureusement frottée avec le foulard, et si, au lieu d'éloigner ce dernier, on approche ensuite la tige et le foulard ensemble de la barbe de plume suspendue, il n'y a plus attraction.

Ceci montre que l'électrisation de la tige est exactement neutralisée par l'électrisation contraire du foulard, et par conséquent que les deux quantités d'électrisation doivent être exactement égales (1).

#### TRANSPORT DE L'ÉLECTRISATION

Si l'on fait toucher un corps électrisé par un corps qui n'est pas préalablement électrisé, on observe que le premier corps perd une certaine partie de son électrisation, et que le second acquiert de l'électrisation.

Nous dirons que cette partie de l'électricité du corps chargé s'est transportée sur l'autre corps. La quantité transportée dépend des dimensions et des formes des deux corps. Si ce sont deux sphères, l'électricité se divisera entre elles proportionnellement à leurs rayons.

*Expérience.* — Attirons la barbe de plume avec une des tiges frottées, jusqu'à ce que la plume touche la tige. On observera qu'elle s'attache à la tige pendant un instant. Tournez doucement la tige sur elle-même, de façon que les différentes portions de sa surface touchent la plume, au bout d'une demi-minute environ, la barbe de plume s'envolera de dessus la tige, et si l'on approche cette dernière de la plume, la plume sera repoussée. L'explication est la suivante : lorsque la barbe de plume touche la tige, une partie de l'électrisation de celle-ci se transporte sur la plume, laquelle est repoussée parce qu'elle est chargée avec la même électrisation que celle de la tige.

(1) L'expérience doit être faite avec une barbe de plume et non pas avec une tige électrisée suspendue, parce que celle-ci attirerait un corps non électrisé placé dans son voisinage de la même façon que la tige électrisée attire la plume.

## CONDUCTEURS ET ISOLANTS

Si un des bouts d'un bâton de cire à cacheter est électrisé, il conserve son électrisation pendant un temps très long dans l'air, tandis que l'autre bout demeure non électrisé.

Si, d'autre part, une des extrémités d'une tige métallique est électrisée, l'électrisation se distribue immédiatement d'elle-même sur toute la tige, et si une extrémité de cette tige est placée sur le sol, l'électrisation se dissipe rapidement.

Les substances, comme la cire à cacheter, dans lesquelles l'électricité ne peut pas se mouvoir librement, sont appelées des *isolants*; celles, comme les métaux, dans lesquelles elle peut se mouvoir librement, sont appelées des *conducteurs*.

L'argent est le meilleur conducteur connu, et l'air sec est le meilleur isolant; mais il n'existe pas de substance qui soit un conducteur parfait ou un isolant parfait.

Il y a tant de substances dont les pouvoirs conducteur et isolant sont compris entre ceux de l'argent et de l'air sec, qu'on peut difficilement dire qu'il y ait une ligne de démarcation définie entre les conducteurs et les isolants.

Nous considérerons, néanmoins, dans la pratique, les métaux comme des conducteurs, et l'air, le verre, l'ébène, la cire à cacheter, la cire de paraffine et la soie comme des isolants.

## L'ÉLECTROSCOPE A FEUILLES D'OR

C'est un appareil plus sensible que la barbe de plume suspendue, pour reconnaître de petites quantités d'électrisation.

Il décèle la présence de l'électricité par la divergence de deux lames d'or suspendues l'une près de l'autre. La description en est donnée à la page 47.

#### ÉLECTRISATION PAR INDUCTION

Lorsqu'un corps chargé est placé près d'un autre corps, mais sans qu'il y ait contact, le second corps devient électrisé, et reste électrisé aussi longtemps qu'on laisse le corps chargé dans son voisinage. Aussitôt qu'on éloigne le corps chargé, tout signe d'électrisation disparaît dans l'autre corps.

Ce genre d'électrisation est appelé *électrisation par induction*.

*Expérience.* — Frottons une des tiges et approchons-la, mais sans établir de contact, du plateau de l'électroscope. Les feuilles divergeront aussitôt, et resteront écartées tant que la tige occupera la même position. Eloignons la tige, les feuilles retombent.

L'expérience réussit encore si l'on interpose entre l'électroscope et le bâton de cire à cacheter une plaque de verre, de gutta-percha, de cire de paraffine, ou de *tout autre corps non conducteur*.

Ceci montre que la tige chargée induit une charge d'électricité sur le plateau et les feuilles d'or de l'électroscope, et que l'action s'exerce à distance et à travers l'isolant intermédiaire.

#### ÉCRANS MÉTALLIQUES

Si un écran métallique de grandes dimensions, relié à la terre pour permettre à l'électricité de s'échapper de l'écran, est interposé entre le bâton de cire à cacheter et l'électroscope, on observe qu'il ne se manifeste pas d'in-

duction. On arrête de même l'induction en recouvrant l'électroscope d'une cage de métal ou de fil métallique, mise en communication avec la terre (1).

Ce fait a une grande importance dans beaucoup d'expériences, car, en les enfermant dans des tubes ou cages métalliques, les fils et les instruments peuvent être garantis de l'induction des corps chargés voisins.

#### NATURE DE LA CHARGE INDUITE

On a reconnu que la charge induite se compose invariablement de quantités égales d'électricité positive et négative.

L'électricité d'espèce opposée à celle du corps inducteur se trouve sur le côté le plus rapproché de ce dernier, et, si le corps induit est conducteur (2), l'électricité de même espèce réside sur le côté le plus éloigné.

*Expérience.* — Plaçons un conducteur métallique sur un support de verre près d'un corps fortement électrisé (par exemple, le conducteur d'une machine électrique, fig. 2). Il se chargera par induction. Plaçons deux électroscopes à feuilles d'or à une distance de ce conducteur métallique, suffisante pour qu'ils ne soient pas affectés directement par le corps chargé.

Explorons maintenant le conducteur métallique au moyen d'un « plan d'épreuve ». Un « plan d'épreuve » est un disque de métal d'environ 5 centimètres de diamètre, attaché à un manche isolant.

Au moyen de ce plan d'épreuve, on peut transporter sur un électroscope une portion de la charge d'une partie

(1) Voyez page 10.

(2) Dans les non-conducteurs, la distribution de l'électricité de même espèce est plus compliquée.



quelconque du conducteur; car, en touchant le conducteur avec le plan d'épreuve, une portion de la charge du corps passe sur ce dernier, et, en touchant l'électroscope avec le plan d'épreuve, une partie de la charge que celui-ci a prise passe sur l'électroscope.

Touchons d'abord le milieu du conducteur avec le plan d'épreuve, et portons ce dernier sur un des électroscopes : on n'obtiendra pas d'effet. Ceci montre que toute la charge se trouve aux extrémités du conducteur.

Touchons ensuite les deux extrémités respectivement avec deux plans d'épreuve, et transportons chacune des charges obtenues sur un électroscope particulier :

Les deux séries de feuilles d'or divergeront, montrant que les deux extrémités du conducteur sont chargées.

Relions les deux électroscopes par un fil fin métallique tenu dans un manche isolant : les deux séries de feuilles d'or retomberont, montrant que les électricités des deux extrémités sont d'espèce opposée, et qu'elles se neutralisent mutuellement quand on leur permet de se combiner.

Chargeons maintenant une petite balle de moelle de sureau, suspendue par un fil de soie, avec la même électricité que celle du corps inducteur, et approchons-la de l'extrémité du conducteur la plus éloignée du corps :

Elle sera repoussée, ce qui prouve que l'électricité de la partie éloignée est de la même espèce que celle du corps inducteur, et par conséquent, que celle de la partie voisine est d'espèce contraire.

Éloignons enfin le corps inducteur : tous les signes d'électrisation disparaissent du conducteur, ce qui prouve que les chargés d'électricité positive et négative sont exactement égales en quantité, car elles se neutralisent l'une

l'autre lorsqu'elles deviennent libres et qu'elles peuvent se combiner.

#### EXPLICATION DE L'ATTRACTION DES CORPS LÉGERS

Nous voyons maintenant pourquoi un corps chargé attire les corps légers qui ne sont pas préalablement électrisés. Il induit une charge opposée à la sienne propre sur le côté voisin, et une charge semblable à la sienne propre sur le côté éloigné. Le côté voisin est attiré et le côté éloigné est repoussé; mais comme le côté attiré est à une distance moindre, l'attraction l'emporte sur la répulsion, et le corps entier est attiré.

#### COMMUNICATION A LA TERRE

Dans certaines expériences, on veut étudier une portion seulement de la charge induite, savoir, celle qui est induite sur l'extrémité du conducteur la plus voisine du corps chargé.

La charge de l'autre extrémité peut être éloignée à une certaine distance, en allongeant suffisamment le conducteur.

Au lieu de donner une grande longueur au métal conducteur, on peut le relier par un fil métallique à la conduite d'eau la plus voisine; le globe terrestre tout entier devient alors partie du conducteur. L'« extrémité voisine » est celle du conducteur métallique que l'on examine; et l'« extrémité éloignée » peut être considérée comme située quelque part aux antipodes.

Si un conducteur « mis à la terre » subit l'action inductive d'un corps chargé positivement, sa charge entière sera négative; autrement dit, toutes les parties voisines du corps chargé seront négatives, et l'on ne découvrira aucune

charge sur les autres parties, car celles-ci seront toutes dans la même condition que le *milieu* du conducteur dans l'expérience décrite à la page 9.

En parlant de ce phénomène, on dit quelquefois que, lorsque le conducteur est mis à la terre, l'électricité induite sur l'« extrémité éloignée » s'échappe à la terre. Cette façon de langage doit être simplement considérée comme une manière abrégée d'exprimer ce qui se passe.

## CHAPITRE II

### MACHINES ÉLECTRIQUES

En frottant avec un foulard un bâton de verre ou de cire à cacheter, on ne produit qu'une petite quantité d'électricité; pour produire de grandes quantités d'électricité statique, on emploie diverses machines.

Les principales machines en usage sont celles que nous allons décrire, savoir : la « machine à frottement », la « machine de Holtz », et l'« électrophore ».

#### MACHINE A FROTTEMENT

La machine à frottement est essentiellement un appa-

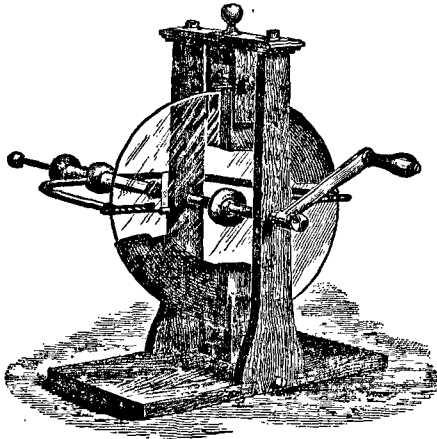


FIG. 2.

reil disposé pour frotter commodément du verre et de la soie l'un contre l'autre et recueillir l'électricité produite.

On lui donne différentes formes. La *machine à plateau de verre* (fig. 2) consiste en un plateau de verre circulaire, que l'on peut mettre en rotation autour d'un axe en tournant une manivelle. Deux paires de coussins recouverts de soie pressent contre ce plateau près de ses bords. Les coussins sont reliés au sol, de telle sorte que l'électricité négative qu'ils prennent peut s'échapper.

Le verre prend une forte charge positive. Un conducteur massif en cuivre jaune est fixé sur le support de la machine et isolé de lui ; ses deux branches se prolongent de façon à toucher presque le verre, aussitôt après que celui-ci quitte les frotteurs.

Ces branches sont garnies d'une rangée de pointes pour conduire l'électricité du verre (1). En tournant la manivelle, le conducteur se charge fortement d'électricité positive. En approchant du conducteur la jointure du doigt, on peut obtenir des étincelles.

Une machine dont le plateau a 60 centimètres de diamètre donne, quand elle est en bon état, des étincelles longues de près de 5 centimètres.

On construit aussi des machines de verre ayant la forme cylindrique.

Les inconvénients des machines de verre sont leur fragilité (2) et l'impossibilité de les faire fonctionner par temps humide, parce que l'humidité se dépose sur le verre.

‡ Les machines à plateau, que l'on veut garantir de ces défauts, ont quelquefois leur plateau en ébonite.

(1) Voyez page 33.

(2) Lorsqu'on place une machine près du feu pour la chauffer avant de s'en servir, elle doit avoir la tranche de son plateau tournée vers le feu, car le plateau est alors moins exposé à craquer que si sa face était exposée à la haleur.

Au laboratoire Cavendish de Cambridge, une machine à dessécher l'air est établie dans la salle destinée aux expériences d'électricité.

### MACHINE DE HOLTZ (1)

Cette machine fonctionne non par frottement, mais par induction.

Elle se compose de deux plateaux de verre circu-

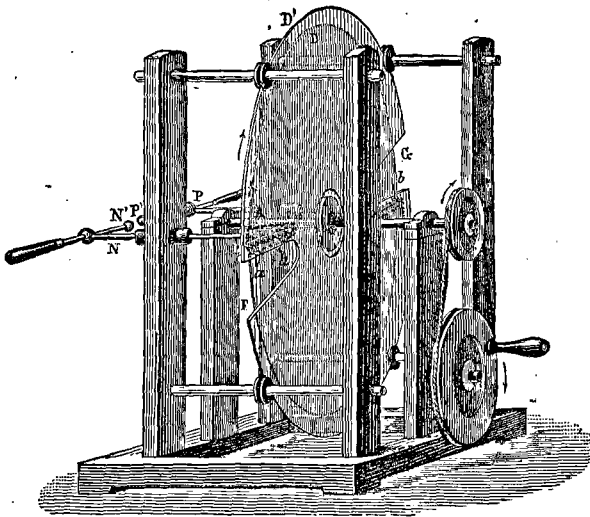


FIG. 3.

lares disposés parallèlement l'un près de l'autre (fig. 3). L'un, D, plein, peut être animé d'une rotation rapide par

(1) THÉORIE DE L'ACTION DE LA MACHINE DE HOLTZ. — On a construit quelques machines de Holtz de forme cylindrique. Les fenêtres sont alors situées sur les côtés opposés d'un cylindre circulaire fixe, à l'intérieur duquel tourne le cylindre mobile.

Les peignes sont au contraire à l'intérieur du cylindre mobile.

L'action de cette machine est exactement la même que celle de la machine

un système de roues amplifiant la vitesse; l'autre, D', qui est fixe, est percé de trois trous : un trou circulaire, au centre, pour laisser passer l'axe du plateau mobile, et deux ouvertures F, G, appelées « fenêtres » situées aux extré-

à forme de plateau, et quoique ce ne soit pas une machine avantageuse dans la pratique, nous nous en servons pour expliquer la théorie de la machine de Holtz, car le diagramme que comporte la forme cylindrique est beaucoup plus facile à dessiner que celui qui correspondrait à la forme de plateau.

M. Mascart donne de l'action l'explication suivante :

La machine à forme cylindrique est représentée par la figure 4; on n'a pas

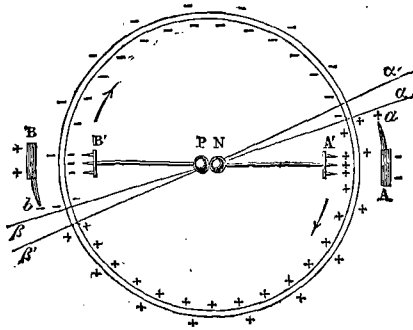


FIG. 4.

dessiné le cylindre extérieur, mais seulement les armures de papier qu'il soutient.

Supposons que l'armure A soit chargée d'électricité (—), le cylindre mobile en mouvement dans le sens des flèches, et les boules P et N en contact de façon que le conducteur A' B' soit continu : ce conducteur s'électrise par induction.

Si l'armure A acquiert une charge suffisamment élevée, le peigne A' laissera échapper sur le verre de l'électricité (+), et le peigne B' de l'électricité (—); car les charges induites sont attirées à travers le verre par les charges des armures.

Le même phénomène se reproduira au moins pendant la première demi-révolution du cylindre, puisque les portions de verre qui ont reçu l'électricité, s'éloignent rapidement et permettent à l'influence de l'armure A de s'exercer de nouveau sur le conducteur.

A ce moment la surface intérieure du cylindre peut être divisée, par un plan à peu près horizontal, en deux parties électrisées en sens contraires, la

mités opposées d'un même diamètre ordinairement horizontal. Sur le bord horizontal de chacune des fenêtres est collé un morceau de papier muni d'une ou deux languettes terminées en pointe un peu émoussée,  $aa$ ,  $bb$ , qui font saillie dans les fenêtres, de façon à toucher légèrement le plateau tournant. De l'autre côté du plateau tournant, très près de sa surface, et en regard des fenêtres, sont fixés deux « peignes » métalliques reliés respectivement à deux tiges de décharge, entre lesquelles éclate l'étincelle.

Pour mettre la machine en activité, on charge une des

supérieure (—) et l'inférieure (+). Ces couches électriques contribuent à exagérer encore la production d'électricité, par une série de réactions réciproques. En effet, l'armure  $Bb$ , sous l'influence de ces deux couches, se charge à sa base  $B$  d'électricité (+), et à sa pointe  $b$  d'électricité (—) qui se décharge sur la face extérieure du cylindre; la même influence s'exerce sur la deuxième armure, dont la charge négative augmente à la base  $A$ , et qui laisse échapper par sa pointe  $a$  de l'électricité (+).

Pendant la demi-rotation suivante, la différence de potentiel aux extrémités du conducteur sera augmentée par suite de l'électrisation de la deuxième armure, de l'accroissement de charge de la première, et par l'influence directe qu'exerce sur les pointes la charge électrique répandue à la surface du cylindre tournant.

Si l'on fait abstraction des pertes, l'électrisation doit croître en progression géométrique; mais bientôt l'appareil atteint son débit maximum, et l'électrisation de ses différentes portions devient constante.

Les deux faces du cylindre sont toujours (+) à la partie inférieure, et (—) à la partie supérieure; mais le plan de séparation des couches de signes contraires n'est pas horizontal.

Le flux (+) qui s'échappe du peigne  $A'$  remonte vers la couche négative par suite de l'attraction qu'exerce cette couche et de la répulsion qui provient de la couche inférieure. On le reconnaît à la forme de la nappe lumineuse.

Si l'on néglige les différences de propriétés des deux électricités, on voit que les deux couches de signes contraires, répandues sur la surface intérieure du cylindre, seront séparées par un plan  $\alpha\beta$ , dissymétrique par rapport aux peignes. L'électricité qui s'échappe des pointes de papier se distribuera de même à la surface extérieure du cylindre, suivant deux zones séparées par un autre plan  $\alpha'\beta'$ .

On trouvera la théorie de cette machine sous ses différentes formes très bien et très complètement discutée dans son *Électricité statique*, t. II, p. 278.



armures de papier au moyen d'un bâton de cire à cacheter frotté, ou d'une petite machine de frottement, et l'on met les tiges de décharge NN', PP' en contact l'une avec l'autre. Après que la machine a été mise en mouvement (et le mouvement doit être imprimé dans une direction telle que le plateau marche *vers* les languettes en saillie), on sépare les tiges de décharge et un flux d'étincelles jaillit tout le temps qu'on continue à tourner. Un des pôles donne de l'électricité (+), et l'autre de l'électricité (—).

La figure 5 représente une grande machine de Holtz,

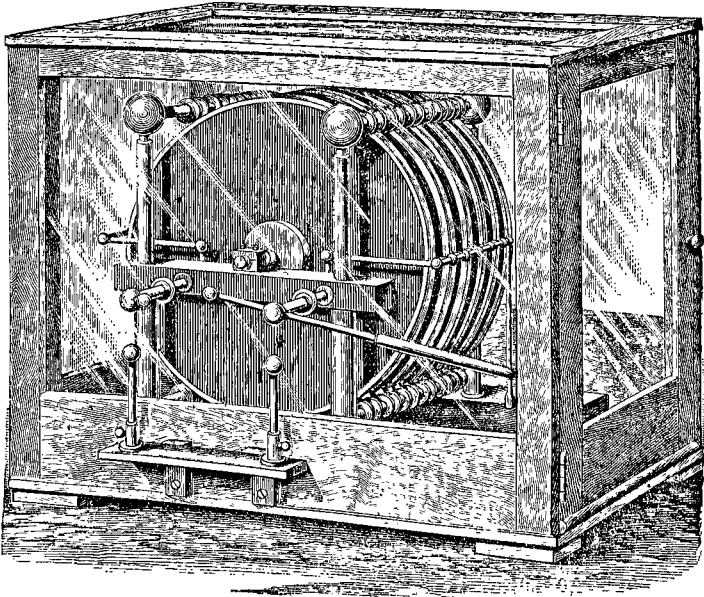


FIG. 5.

construite par M. Ladd, avec 24 plateaux d'ébonite, 12 fixes et 12 mobiles, ayant chacun 60 centimètres de diamètre (1).

(1) En augmentant le nombre des plateaux, on n'accroît pas beaucoup la CORDON. Électricité.

Elle est enfermée dans une cage à parois de verre, dans l'intérieur de laquelle l'air est maintenu sec par de la pierre ponce et de l'acide sulfurique. La manivelle et les tiges de décharge sont à l'extérieur, de telle sorte qu'on peut faire fonctionner la machine sans ouvrir la cage. Le mouvement peut être donné soit à bras, soit par un moteur à vapeur. Cette machine est toujours prête à fonctionner et donne de très beaux effets.

#### ÉLECTROPHORE (fig. 6)

Nous décrivons de préférence, parmi les différentes formes de cet instrument, celle qui se rapporte au petit électrophore construit à l'usage de l'électromètre de Sir William Thomson.

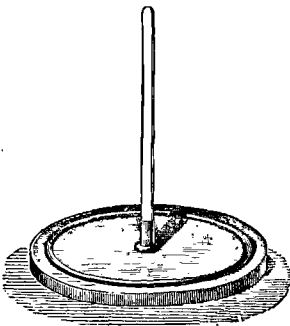


FIG. 6.

Il se compose d'un plateau circulaire d'ébonite reposant sur un socle métallique; de ce socle part une cheville de laiton qui traverse le plateau et dont le bout vient affleurer la surface supérieure de l'ébonite. Un plateau de laiton de mêmes dimensions que celui

d'ébonite est muni d'un manche de verre fixé à son centre, et à l'aide duquel on peut le poser à plat sur l'ébonite.

On charge celle-ci d'électricité négative en la frottant avec une peau de chat ou un foulard de soie. Quand le plateau de laiton est posé sur celui d'ébonite, il se charge par induction : le côté inférieur positivement, le côté su-

longueur de l'étincelle, mais on augmente considérablement la quantité d'électricité produite.

périeur négativement. La cheville permet à l'électricité (—) de s'écouler à la terre, et l'électricité (+) est retenue sur le plateau mobile par l'attraction de la charge négative de l'ébonite; en éloignant le plateau de laiton, on trouve qu'il est chargé positivement. Un électrophore de 6,35 centimètres de diamètre donne des étincelles d'environ 4,8 millimètres de longueur.

En posant le plateau de laiton sur l'ébonite et le soulevant ensuite, on obtient chaque fois une charge nouvelle.

Lorsque l'instrument n'est pas muni de la cheville qui établit la communication avec la terre, on doit toucher chaque fois avec le doigt la face supérieure du plateau de laiton, avant de le soulever, afin que l'électricité négative puisse s'échapper.

## CHAPITRE III

### QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ

Nous avons constaté que nous ne connaissons l'électricité que comme une propriété des corps électrisés.

Nous savons que l'on peut, par certains moyens, augmenter ou diminuer l'électrisation d'un corps.

Nous avons maintenant à examiner si les effets d'un pareil accroissement ou d'une pareille diminution sont les mêmes que ceux qui se manifesteraient si l'on ajoutait au corps ou si on lui enlevait une certaine quantité de ce quelque chose que nous appelons l'électricité.

C'est là un sujet d'une très grande importance, car si une addition et une soustraction de ce genre n'étaient pas possibles, nous n'aurions aucun moyen de mesurer les effets électrostatiques.

« L'électrisation », ou, comme nous l'appellerons à présent, « l'électricité », peut être regardée comme une quantité. En d'autres termes, par exemple, si l'on a deux corps contenant des quantités égales d'une même espèce d'électricité, et que (par un moyen quelconque) toute l'électricité de l'un d'eux soit transportée sur l'autre, ce dernier contiendra une quantité d'électricité double de celle qu'il contenait auparavant; et de même, si l'électricité d'un corps chargé se divise également entre ce corps et un autre corps qui ne soit pas préalablement électrisé, la charge résultante de chacun d'eux sera la moitié de celle qui existait auparavant dans le corps chargé.

*Au point de vue du calcul, l'électricité de chaque espèce peut être traitée exactement comme le serait un fluide matériel incompressible.*

L'électricité diffère cependant d'un fluide en ce que des quantités égales des deux espèces se neutralisent l'une l'autre, tandis qu'il est impossible de concevoir deux fluides matériels tels que, si on les mélange, ils disparaissent tous les deux.

Ce qui précède ne doit en aucune façon nous suggérer l'idée que l'électricité est une substance. On a d'ailleurs plusieurs autres exemples de quantités qui ne sont pas des substances.

Ainsi, personne ne suppose que la pression est une substance, et rien n'est plus facile cependant que d'ajouter ensemble deux pressions. Deux poids égaux dans le bassin d'une balance exercent chacun leur pression propre et, quand on les met ensemble, ils produisent une pression double de celle que produit individuellement chacun d'eux. Deux chevaux peuvent trainer une charrette trop lourde pour un seul cheval, parce que les pressions exercées par chacun d'eux s'ajoutent.

Enfin, la vitesse n'est pas une substance, mais c'est une quantité.

*Au point de vue du calcul, une augmentation ou une diminution d'électrisation peut être regardée comme produite par l'addition ou par la soustraction d'une quantité de quelque chose. (que nous appelons électricité). Cette quantité peut être ajoutée ou soustraite suivant les règles ordinaires de l'algèbre, et selon qu'il s'agit de l'une ou l'autre espèce d'électrisation, elle a le signe (+) ou le signe (—).*

Pour entreprendre des expériences sur l'addition et la

soustraction de quantités d'électricité, il est indispensable d'avoir les moyens de transporter sur un autre corps la charge totale d'électricité d'un corps. On ne peut pas obtenir ce résultat en mettant simplement au contact le corps chargé et celui qui n'est pas chargé, car dans ce cas la charge se répartirait seulement entre les deux corps dans une proportion dépendant de leurs dimensions relatives et de leurs formes.

#### CONDUCTEUR CREUX

L'expérience prouve que :

*Si un corps conducteur creux fermé est chargé d'une quantité, même très considérable, d'électricité, sa charge réside tout entière sur sa surface extérieure, et sa surface intérieure ne renferme aucune trace d'électricité.*

*Expérience.* — Prenez un globe de métal creux, percé d'une petite ouverture à son sommet, ou, pour des expériences grossières, une boîte à thé ordinaire. Isolez ce globe en le suspendant par des fils de soie blanche (1). Chargez-le aussi fortement que possible au moyen d'une machine électrique.

Suspendez une petite balle métallique par un fil de soie, et touchez avec cette balle l'extérieur du globe. Éloignant la balle et l'approchant d'un électroscope, on reconnaît qu'elle est électrisée de la même manière que le globe.

Descendez ensuite la balle chargée dans l'intérieur du globe. Faites-lui toucher sa surface intérieure, et retirez-la en ayant soin qu'elle ne touche pas le bord de l'ouverture.

*On trouve que la balle est complètement déchargée.*

Si forte que soit la charge du conducteur creux, il est

(1) Il entre quelquefois, dans la préparation des fils colorés des teintures métalliques qui détruisent leur pouvoir isolant.

impossible de trouver un indice quelconque de charge à l'intérieur de ce conducteur (1).

Nous allons voir maintenant comment on peut ajouter ensemble un certain nombre de charges.

Déchargez le corps creux. Prenez un certain nombre de petits conducteurs de forme quelconque, et chargés de quantités quelconques d'électricité (+) ou (-). Descendez-les, suspendus par des fils isolants, à l'intérieur du conducteur creux, soit un à un, soit plusieurs à la fois, ou tous ensemble. Faites-leur toucher la surface intérieure, et retirez-les sans qu'ils touchent les bords : on observera qu'ils sont complètement déchargés, et que toute l'électricité qu'ils contenaient se retrouve dans la charge maintenant répandue sur la surface extérieure du globe.

*Expérience.* — Chargez la balle suspendue avec de l'électricité (+), en l'appliquant contre le conducteur de la machine électrique. Descendez-la dans le globe creux, et faites qu'elle touche sa surface intérieure : le globe prendra une petite charge. Chaque fois que l'on répètera l'opération, il se chargera de plus en plus.

C'est que les charges successives de la balle *s'ajoutent les unes aux autres* sur le globe creux.

En introduisant une petite charge (-), on observera que l'électrisation du globe diminue.

#### QUANTITÉ TOTALE D'ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR INDUCTION

On démontre mathématiquement que :

*La quantité totale d'électricité, d'espèce contraire à la*

(1) Ceci n'est pas strictement vrai pour la partie voisine de l'ouverture du globe. La théorie mathématique exige un corps creux *fermé*. Dans l'expérience, on est obligé de laisser une ouverture pour introduire la balle.

*sienne propre, qu'un corps chargé induit sur les corps environnants, est exactement égale à sa propre charge.*

L'expérience suivante vérifie cette loi.

*Expérience.* — Reliez le conducteur creux à l'électroscope, et, dans son intérieur, suspendez une balle métallique chargée positivement, en ayant soin qu'elle ne touche pas le conducteur. Il se développera par induction de l'électricité négative sur la surface intérieure du globe, et de l'électricité positive sur sa surface extérieure.

Cette électricité positive fera diverger les feuilles d'or.

Mettez la surface extérieure un instant en communication avec la terre au moyen du doigt ou d'un autre conducteur : Les feuilles d'or retomberont, montrant que l'électricité positive a été enlevée.

La charge négative est retenue temporairement sur la surface intérieure du globe par l'attraction de la balle métallique chargée positivement, et par conséquent elle ne peut pas faire diverger les feuilles d'or reliées à la surface extérieure. Éloignez ensuite la balle : l'électricité négative devient libre, se répand immédiatement sur la surface extérieure du globe creux, et les feuilles divergent.

A ce moment, la balle est chargée avec une certaine quantité d'électricité positive, et le globe est chargé avec la quantité totale d'électricité négative, qui a été induite par la charge positive de la balle.

Pour prouver que ces deux charges sont égales, il faut les ajouter ensemble, et le résultat devra être zéro.

C'est ce qu'on peut réaliser de deux manières : soit en faisant toucher la balle et le corps creux, soit en descendant la balle et le globe côte à côte dans un globe creux plus grand, et faisant en sorte qu'ils touchent la surface intérieure de ce dernier.



*Dans les deux cas, tous les signes d'électrisation disparaîtront.*

PRODUCTION DE QUANTITÉS TOUJOURS ÉGALES D'ÉLECTRICITÉS  
(+) ET (-)

Nous avons constaté dans le chapitre I<sup>er</sup> que lorsque l'électricité est engendrée par frottement, les électricités (+) et (-) se développent toujours en quantités égales.

L'expérience suivante met ce fait en évidence.

*Expérience.* — Placez une grande machine électrique à frottement (fig. 2) sur un tabouret isolant (c'est-à-dire un tabouret à pieds de verre), et reliez par un fil métallique les frotteurs au conducteur. Quelle que soit la rapidité du mouvement imprimé à la machine, celle-ci ne pourra pas seulement faire diverger les feuilles d'un électroscope attaché au conducteur (1).

La raison en est que l'électricité négative développée sur les frotteurs neutralise exactement l'électricité positive développée sur le verre.

Rappelons aussi que dans le chapitre I<sup>er</sup> nous avons montré que la charge induite se compose toujours de quantités égales des deux électricités.

Nous pouvons énoncer maintenant une loi importante :

*Si un système de corps, même de grandes dimensions, sans électrisation préalable, est isolé; si une électrisation quelconque est ensuite, par certains moyens, développée dans l'un d'eux; alors, pourvu que le système ne reçoive ni ne cède aucune électricité, la somme algébrique des électrisations restera zéro.*

(1) La manivelle doit être isolée de la main par une feuille de caoutchouc.

## CHAPITRE IV

### FORCE ÉLECTRIQUE

---

#### LOI DE LA FORCE ÉLECTRIQUE

Il suffit d'une expérience très grossière pour reconnaître que si des corps électrisés sont à une certaine distance l'un de l'autre, leur attraction ou leur répulsion mutuelle sera moins énergique que s'ils étaient plus rapprochés. En d'autres termes, la force diminue quand la distance augmente. Il s'agit maintenant d'examiner dans quelle proportion la force diminue à mesure que la distance augmente, si sa diminution suit la même progression que l'augmentation de la distance, si elle suit une progression plus rapide ou plus lente.

Coulomb a étudié cette question expérimentalement au moyen de la *balance de torsion* (1), qu'il a imaginée dans ce but, et a démontré la loi suivante :

*La force d'attraction ou de répulsion qui s'exerce entre deux corps électrisés, dont les dimensions sont très petites par rapport à leur distance mutuelle, varie en raison inverse du carré de la distance des deux corps, c'est-à-dire que si la répulsion pour une certaine distance des deux corps est égale à l'unité, elle sera égale à un quart pour une distance double, à un neuvième pour une distance triple, à un seizième pour une distance quadruple, et ainsi de suite.*

(1) Voyez page 48.

## PREUVE INDIRECTE

On peut aussi prouver mathématiquement que cette loi est la seule compatible avec ce fait qu'il n'y a pas d'électricité à l'intérieur d'un corps creux.

Or, comme les moyens qui nous décèlent la présence de l'électrisation sont beaucoup plus délicats que ceux qui nous permettent de mesurer les forces électriques, le fait qu'il n'y a pas d'électrisation à l'intérieur d'un conducteur constitue une preuve plus rigoureuse que celle que pourrait fournir toute mesure directe.

Cavendish (1), en 1774-81, a démontré de cette manière que la loi des inverses carrés est exacte à  $\frac{1}{50}$  près, et nos électromètres modernes permettent de vérifier son exactitude avec une approximation de 1 sur 72000.

## PROPORTIONNALITÉ DE LA FORCE AUX CHARGES

La force qui s'exerce entre deux corps électrisés dépend de leurs charges respectives d'électricité, aussi bien que de la distance qui les sépare. Si l'un des corps est chargé avec une quantité d'électricité que nous représenterons par  $e$  unités d'électricité, et l'autre corps avec une unité, les deux corps étant à une distance déterminée, soit un centimètre, on trouve que la force exercée est proportionnelle à  $e$ , c'est-à-dire à la charge du premier corps.

On trouve également que, si le second corps est chargé avec deux unités d'électricité, la force est proportionnelle à  $2e$  (deux fois  $e$ ); s'il est chargé de trois unités, à  $3e$ , etc. Supposons enfin qu'il soit chargé avec un certain nombre d'unités, que nous appellerons  $e'$ , la force sera proportion-

(1) *The Electrical Researches of the Hon. Henry Cavendish, F. R. S.*, publiées par J. Clerk Maxwell, F. R. S. Cambridge. 1879, art. 217.

nelle à  $ee'$  ( $e$  multiplié par  $e'$ ), ou la force qui s'exerce entre deux petits corps électrisés distants d'un centimètre est proportionnelle au produit de leurs charges.

Les unités sont choisies de façon que la force soit effectivement égale à ce produit, lorsque la distance est de 1 centimètre.

Et, en vertu de la loi de Coulomb, pour une autre distance, elle sera égale au produit des charges divisé par le carré de la distance.

Pour écrire ce résultat symboliquement, nous disons que la force répulsive entre deux petites sphères séparées par une distance  $r$  ( $r$  étant très grand par rapport aux rayons des deux sphères) (1), et chargées respectivement avec  $e$  et  $e'$  unités d'électricité, est égale à  $\frac{ee'}{r^2}$ .

Nous voyons que, si les charges sont de mêmes signes, l'expression de la force sera (+); et que, si elles sont de signes contraires, il y aura une répulsion affectée du signe (—), c'est-à-dire une attraction. C'est l'expression de ce fait que les électricités similaires se repoussent, et les électricités dissimilaires s'attirent.

#### NATURE PHYSIQUE DE LA FORCE ÉLECTRIQUE

Les phénomènes de l'attraction et de la répulsion électriques, comme ceux de l'induction, nous montrent que l'influence d'un corps chargé d'électricité s'étend à une distance considérable tout autour de ce corps; car il peut agir sur les corps éloignés.

La question de savoir « comment cette action se transmet

(1) S'il n'en était pas ainsi, l'action inductive mutuelle des deux sphères apporterait dans la distribution de l'électricité à leur surface une perturbation de nature à altérer l'attraction.

à travers l'espace intermédiaire » est la plus importante question de toute la science électrique. Si l'on pouvait la résoudre complètement, on serait probablement en état de comprendre la nature physique de l'électricité elle-même. Dire que les effets sont dus à « une action directe à distance », c'est en réalité seulement poser de nouveau la question.

Quoique l'hypothèse de « l'action directe à distance » soit commode pour le calcul mathématique, elle n'apporte à notre esprit absolument aucune signification physique.

Nous nous trouvons aussitôt en présence de cette autre question : « Quelle est la nature de cette action directe ? Comment se transmet-elle ? »

Nous nous demandons alors de quoi se compose le lien de communication entre les corps qui s'attirent. L'hypothèse de l'action directe à distance suppose que ce lien n'est pas un lien matériel : il est pour le moins difficile de concevoir un lien assez puissant pour faire mouvoir des corps matériels, et qui soit composé d'autre chose que de la matière.

#### NÉCESSITÉ D'UN MILIEU

Il n'est pas douteux qu'il ne doive intervenir quelque lien de communication physique et matériel, chaque fois qu'il y a transmission d'une action électrique d'un certain genre d'un corps à un autre.

La seule manière de se rendre compte des faits observés d'attraction, répulsion et induction, est de supposer que *les forces se transmettent par une déformation* (1) (*strain*)

(1) Le mot *strain* (que nous traduisons par *déformation*) veut dire en physique « une altération des dimensions ou de la forme ». Une altération quelconque des dimensions ou de la forme est appelée « a strain ». Ce terme

*ou distorsion du milieu qui remplit l'espace entre les corps électrisés.*

Nous avons vu que les forces électriques agissent à travers l'air, le verre et tous les autres isolants, et nous avons tout lieu de penser que les forces se transmettent à travers ces milieux par une déformation ou distorsion de leurs particules.

On trouvera dans la suite de cet ouvrage de nombreux arguments en faveur de cette hypothèse.

Lorsqu'un poids est mis en mouvement en le poussant avec un levier ou en le tirant avec une corde, l'action mécanique se transmet d'une manière tout à fait analogue, car la portion du levier ou de la corde la plus voisine de la main est déformée par l'effet d'une compression ou d'une tension. Puis, quand elle reprend sa forme, la déformation se transmet à la portion suivante, et ainsi de suite de proche en proche, la force arrive au corps.

On a sous les yeux un très bel exemple de transmission de déformation dans une station de chemin de fer, pendant un aiguillage, lorsque le train est poussé par une machine qui, en tombant sur lui, au lieu d'exercer une pression fixe sur le wagon le plus rapproché d'elle, imprime à ce dernier une légère secousse.

Le wagon qui vient après ne se meut pas tout de suite, mais les ressorts des tampons du premier wagon sont

comprend à la fois compression et extension, comme, par exemple, la déformation d'un morceau de caoutchouc tendu, dont la longueur croît et la largeur diminue. Il comprend toutes les altérations de volume, comme la compression ou l'expansion d'un gaz, toutes les torsions et toutes les tensions, et tous les mouvements vibratoires autres que ceux d'un corps rigide pris dans son ensemble.

Mais il ne comprend pas dans sa signification la force qui produit l'altération des dimensions ou de la forme. Une force qui produit « a strain » (une déformation) est appelée *a stress* (un effort).

comprimés, autrement dit, le premier wagon est pour un instant « déformé », car sa longueur totale, de tampon à tampon, est raccourcie de quelques centimètres.

Cette déformation cesse instantanément par l'expansion des ressorts ; mais, comme cette expansion ne peut pas se produire du côté de la machine, elle s'effectue du côté du reste du train, et transmet la déformation au wagon suivant en comprimant ses ressorts de tampons, et le même phénomène se reproduit d'un wagon à l'autre jusqu'à ce que la force se soit transmise tout le long du train, depuis la machine jusqu'au dernier wagon.

Dans cet exemple de transmission de force mécanique, la déformation consiste simplement dans une compression et une expansion, mais dans le cas des forces électriques, nous n'avons aucun moyen de connaître sa nature exacte : le phénomène est probablement beaucoup plus compliqué.

#### L'ÉTHÉR

Les forces électriques ne se transmettent pas seulement à travers l'air, le verre et les autres isolants ; on trouve encore qu'elles se transmettent, et à travers les vides les plus parfaits qu'on ait pu produire artificiellement, et certainement aussi à travers les espaces interplanétaires.

Il est hors de doute que la terre est influencée par les phénomènes électriques qui surviennent dans le soleil (1).

Nous savons que, dans ces espaces, il n'y a pas de matière comme celle que nous connaissons communément, et nous devons supposer en conséquence que la matière qui les remplit est dans un état extrêmement raréfié.

Nous appelons cette matière *l'éther*, et nous suppo-

(1) Voyez chapitre xvi.

sons que c'est un fluide plusieurs millions de fois moins dense que l'air et doué d'une très grande élasticité.

Dans la quatrième partie de cet ouvrage, nous essayerons de démontrer que cet éther est le même milieu qui transporte la lumière et la chaleur du soleil à la terre, c'est-à-dire que la lumière, la chaleur rayonnante, l'induction électrique et magnétique sont toutes des perturbations différentes du même océan d'éther.

Nous devons admettre que ce milieu transmet les forces électriques, mais sans manifester en général des propriétés électriques qui lui soient propres.

Nous devons admettre que l'éther qui environne un corps chargé se trouve dans un état de déformation; mais nous savons qu'un point voisin d'un corps chargé ne manifeste des propriétés électriques qu'autant qu'on place en ce point une portion de matière ordinaire, et qu'alors c'est la matière qui reçoit des propriétés électriques du milieu qui l'entoure immédiatement.

L'énergie de ces propriétés électriques dépend de la grandeur de la déformation du milieu en ce point.

Nous pouvons, si nous le préférons, admettre que l'éther pénètre tous les corps.

Nous démontrerons bientôt que les forces électriques se transmettent à travers les divers isolants avec des intensités différentes.

Nous pouvons admettre ou bien que les forces électriques se transmettent à travers les corps ordinaires par des déformations de leurs particules; et, à travers les espaces dits vides seulement, par des déformations de l'éther; ou bien, nous pouvons dire encore que toutes les forces électriques se transmettent par des déformations de l'éther, mais que l'éther, dans les différents isolants, éprouve des



modifications spéciales qui expliquent la différence de transmission.

Comme nous n'avons, pour le moment, aucun moyen expérimental de comparer les mérites de ces deux hypothèses, nous adopterons celle des deux qui se prête le mieux au calcul. D'une façon générale, je pense que la seconde est la plus commode.

CONDUCTEUR EN POINTE

*Expérience.* — Fixez une pointe métallique fine au conducteur de la machine électrique, et faites fonctionner la machine.

Il sera impossible de recueillir sur le conducteur une charge appréciable; toute l'électricité s'échappe par la pointe.

EXPLICATION (1)

Soit MPN, fig. 7, une section d'un conducteur en pointe chargé, et considérons les forces qui tendent respective-

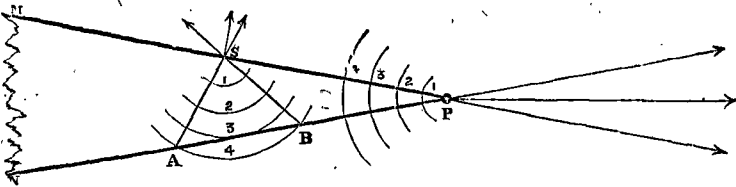


FIG. 7.

ment à repousser une unité d'électricité d'une position S sur le côté du conducteur, et de sa pointe P.

L'électricité répandue sur le côté MP n'exerce aucun

(1) La démonstration suivante est due à M. W. E. Ayrton.  
GORDON. Électricité.

effet tendant à faire échapper l'électricité par S, car aucune partie de cette électricité ne peut agir sur S dans une direction perpendiculaire à la surface MP. La portion de l'électricité répandue sur le côté NP, qui est suffisamment rapprochée de S, exercera seule une action sur S. La figure 7 montre qu'il n'y a pas de surface électrisée dans un rayon 1 ou 2 autour de S, qu'il y a une très petite portion de surface électrisée dans un rayon égal à 3, et qu'il y a une portion AB dans un rayon égal à 4. La force diminuant comme le carré de la distance, on voit qu'une très petite force agit seule sur S, et de plus, sa direction fait avec la surface MP un angle tel, qu'une petite fraction de cette force agit seule dans la direction perpendiculaire à MP; en outre, si, au lieu d'une section du conducteur en pointe, on considère le conducteur tout entier, on trouve qu'à mesure qu'on se rapproche de S, l'action de l'électricité sur ce point s'exerce dans une direction plus oblique.

Sur la pointe P, au contraire, l'électricité du conducteur à toutes les distances, de zéro à 4 et au delà, exerce son action; et elle agit tout entière à peu près exactement dans la direction même qui tend à faire sortir l'électricité de cette pointe; et il en est encore ainsi si l'on considère le conducteur tout entier et non plus une section seulement.

La force qui tend à faire échapper l'électricité par une pointe est donc beaucoup plus grande que celle qui exerce une action analogue sur toute autre partie de la surface.

#### CONDUCTEURS DES PARATONNERRES

Le même raisonnement subsiste si le corps chargé est de l'air et si la voie offerte à l'écoulement de l'électricité est le corps métallique; car, dans l'expérience précédente,

nous n'avons aucun moyen de reconnaître si la diminution de l'électrisation du conducteur en pointe est due à ce que ce conducteur perd de l'électrisation d'une certaine espèce, ou à ce qu'il gagne de l'électrisation d'espèce contraire.

C'est pour cela que les conducteurs des paratonnerres sont terminés en pointe. La force qui s'exerce à leurs extrémités est très considérable, et par conséquent l'électricité de l'air est entraînée silencieusement dans le sol. Tout d'abord on terminait beaucoup de conducteurs par des boules. L'électricité s'accumulait alors à la surface jusqu'à ce que la force électrique devint assez grande pour produire une étincelle. On pensait que les boules étaient plus efficaces parce qu'on voyait la foudre les frapper, tandis qu'elle ne frappe jamais les pointes. On ne soupçonnait pas ce fait qu'une pointe empêche toujours la foudre de frapper.

## CHAPITRE V

### DENSITÉ

Plus l'électrisation d'un corps est intense, plus la force électrique est grande et plus l'électricité a de tendance à s'échapper pour se porter sur les objets environnants.

L'intensité de l'électrisation en un point d'un corps ou d'une surface est ce qu'on appelle la *densité électrique* de ce point.

La *charge* d'un corps est la quantité d'électricité qu'il renferme.

La *densité rapportée au volume* en un point d'un corps, quand la densité de ce corps est uniforme, est la charge ou la quantité d'électricité par chaque centimètre cube de volume.

Lorsque la densité n'est pas uniforme, la densité rapportée au volume en un point est égale à la quantité d'électricité qui serait contenue dans un volume de 1 centimètre cube autour de ce point, si la densité en chaque point de ce centimètre cube était la même que celle du point donné.

La *densité rapportée à la surface* en un point d'une surface, lorsque la densité est uniforme, est la quantité d'électricité par centimètre carré de surface.

Lorsque la densité n'est pas uniforme, la densité rapportée à la surface en un point est égale à la quantité d'électricité qui serait contenue dans une surface de 1 centimètre carré autour de ce point, si la densité en chaque

point de ce centimètre carré était la même que celle du point donné.

La force avec laquelle l'électricité tend à s'échapper d'une portion déterminée d'une surface, croît avec la densité sur cette portion de la surface.

## CHAPITRE VI

### POTENTIEL (1)

*Définitions.* — Toutes les fois que l'électricité se meut, ou tend à se mouvoir, d'une position à une autre, on dit qu'il y a une *différence de potentiel* entre ces deux positions.

On dit que la position d'où l'électricité tend à s'éloigner a un potentiel plus élevé que l'autre.

Supposons qu'une quantité d'électricité s'écoule d'un point à un autre, alors la « *différence de potentiel* », ou ce qu'on appelle aussi la « *force électromotrice* » entre ces deux points, est une quantité qui représente la somme de travail que chaque unité d'électricité développerait dans son trajet, si ce travail pouvait être utilisé tout entier en l'appliquant à une machine parfaite dont il formerait la puissance motrice.

La différence de potentiel est calculée comme il suit :

Supposons qu'on oblige une unité d'électricité à se déplacer, dans la direction opposée à celle suivant laquelle les forces électriques tendraient à l'entraîner, le *travail mécanique* nécessaire à cet effet devra être fourni par un homme, une machine à vapeur, ou toute autre source de puissance.

(1) Les définitions et énoncés contenus dans ce chapitre s'appliquent à l'électricité statique. Dans leur application à l'électricité voltaïque, il y a lieu d'introduire certaines limitations qui seront indiquées à la place qui leur convient.

*La différence de potentiel entre deux points est définie comme numériquement égale à la somme de travail nécessaire pour forcer une unité d'électricité à se transporter d'un point à l'autre, dans la direction opposée à celle suivant laquelle elle tend à se mouvoir.*

L'expression *potentiel en un point*, est une expression abrégée de *différence de potentiel entre le point et la terre*. Le potentiel de la terre est pris comme étalon et est appelé *zéro*.

C'est dans le même ordre d'idées que l'on emploie l'expression « hauteur d'un toit » comme abréviation de la « différence de hauteur entre le toit et la *surface* de la terre ». La hauteur de la surface de la terre est prise comme étalon et appelée *zéro* (1).

Lès potentiels très bas, c'est-à-dire les potentiels beaucoup plus bas que celui de la terre, sont appelés quelquefois des potentiels négatifs élevés.

Nous savons que les corps chargés d'électricité de même espèce se repoussent; c'est-à-dire que l'électricité a une tendance à se mouvoir, des points voisins d'un corps chargé de même signe qu'eux, vers les points plus éloignés.

Nous dirons donc que les points voisins d'un corps chargé ont un potentiel *numériquement* plus grand que les points plus éloignés.

Connaissant la charge d'un corps, la distance à ce corps de deux points donnés, et la loi de la force, on peut cal-

(1) On dit qu'un toit élevé de 30 mètres au-dessus du sol a une hauteur de 30 mètres; mais si l'on prend le centre de la terre comme étalon, il sera tout aussi rigoureux de dire que le toit a une hauteur de 6000 et tant de mètres.

culer la différence de potentiel entre ces deux points par le calcul intégral (1).

Si  $e$  est la charge du corps inducteur,  $r_1$  et  $r_2$  les distances respectives des points au centre du corps, le calcul donne comme résultat :

$$\text{Différence de potentiel} = \frac{e}{r_1} - \frac{e}{r_2}.$$

Si un des points  $r_2$  est à la terre,  $\frac{e}{r_2}$  est alors le potentiel de la terre, et la « différence de potentiel » entre l'autre point ( $r_1$ ) et la terre est  $\frac{e}{r_1}$  ; on convient d'appeler cette expression le « potentiel en  $r_1$  » et on l'écrit  $V_{r_1}$ .

On démontre mathématiquement que *le potentiel en un point dû à deux ou plusieurs corps chargés est la somme algébrique des potentiels dus à chacun d'eux* (2).

Si deux conducteurs, de potentiels différents, sont reliés

(1) Soient  $V$  le potentiel,  $e$  la charge,  $r_1$ ,  $r_2$  les distances respectives, on a (sachant que l'attraction  $= -\frac{e}{r^2}$ ):

$$V_{r_1} - V_{r_2} = \int_{r_2}^{r_1} \left( -\frac{e}{r^2} \right) dr = \frac{e}{r_1} - \frac{e}{r_2}.$$

Lorsqu'un des points est à la terre, on suppose

$$\frac{e}{r_2} = 0,$$

ou que le potentiel de la terre est zéro, et alors

$$V_{r_1} = \frac{e}{r_1}.$$

(2) Car le potentiel se déduit par le calcul de la force agissante, et, lorsque deux ou plusieurs forces agissent simultanément, leur effet est la somme des effets individuels de chacune d'elles.



par un fil métallique ou tout autre conducteur, un flux d'électricité passe de l'un à l'autre tout le temps que les potentiels continuent à différer (1).

Si, *en dépensant du travail*, on maintient la différence de potentiel, le flux dure indéfiniment; mais si l'on ne dépense pas du travail, toutes les parties du conducteur prennent instantanément le même potentiel, et l'on peut établir que :

*Toutes les portions d'un conducteur, formé d'une même matière et soumis seulement à des forces statiques, sont toujours au même potentiel.*

En effet, par définition, un conducteur est un corps dans lequel l'électricité peut obéir à toute tendance au mouvement, et, dans un conducteur, l'électricité se meut des places où le potentiel est élevé à celles où il a une valeur moindre, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de tendance au mouvement, c'est-à-dire jusqu'à ce que le conducteur tout entier soit au même potentiel; et cet équilibre s'établit dans l'intervalle d'une fraction extrêmement petite de seconde.

#### ÉLECTRO-STATIQUE ET ÉLECTRO-CINÉTIQUE

Tout le temps que dure un flux d'électricité, entretenu par une dépense de travail, le conducteur possède des propriétés différentes de celles d'un corps simplement électrisé.

La branche de la science électrique qui traite des propriétés des corps simplement électrisés, s'appelle l'*électro-statique*, parce qu'on suppose dans cette étude que l'électricité est au repos; et la branche qui traite du flux

(1) Les deux conducteurs étant formés du même métal et étant à la même température (voy. chapitre XLII).

d'électricité s'appelle l'*électro-cinétique*. (Voy. la troisième partie.)

#### POINTS, LIGNES ET SURFACES ÉQUIPOTENTIELS

Les points dont les potentiels sont égaux s'appellent « points équipotentiels ». Une ligne formée par une série de ces points s'appelle une « ligne équipotentielle ». Une surface dont tous les points ont le même potentiel s'appelle une « surface équipotentielle ».

#### SURFACES ÉQUIPOTENTIELLES

Le potentiel dû à un corps chargé a sa plus grande valeur numérique sur le corps lui-même, et va ensuite en diminuant dans toutes les directions.

Considérons dans le voisinage d'un corps un point où le potentiel ait une certaine valeur. Il y aura, en général, un certain nombre d'autres points où le potentiel aura la même valeur. Si, par exemple, le premier point considéré est à la droite du corps, il y aura probablement à une certaine distance du corps, et à sa gauche, un point au même potentiel, et d'autres au-dessus et au-dessous du corps, etc.

Il y aura en général un nombre infini de points au même potentiel, situés tout autour du corps chargé.

Imaginons une surface passant par tous les points dont le potentiel a la même valeur particulière : elle formera une surface fermée enveloppant le corps.

Une surface ou enveloppe de ce genre s'appelle une « surface équipotentielle », parce qu'en tous ses points le potentiel a la même valeur.

Si l'on construit ensuite un certain nombre de ces surfaces pour des valeurs différentes du potentiel, on aura une série d'enveloppes ; chacune d'elles enferme la surface

qui correspond à la valeur numérique du potentiel plus élevée et venant immédiatement après.

S'il n'y a qu'un seul corps électrisé, et si c'est une sphère électrisée d'une façon uniforme, les surfaces équipotentiellles formeront une série de sphères creuses, dont le centre commun est le centre du corps électrisé.

Lorsqu'il y a plus d'un corps électrisé, ou quand ce corps n'est pas sphérique, les surfaces ont une forme moins simple.

*Il n'y a pas de force tendant à faire mouvoir l'électricité d'une portion d'une surface équipotentielle à une autre portion de la même surface; et un corps chargé peut se mouvoir d'un point à un autre sur cette surface sans dépenser aucun travail.*

Car, chaque fois qu'il y a tendance au mouvement, il y a, par définition, une différence de potentiel; et chaque fois qu'on dépense du travail pour faire mouvoir un corps chargé, il y a, par définition, une différence de potentiel. Dans le cas d'une surface équipotentielle, il n'y a pas de différence de potentiel, et partant il n'y a ni tendance au mouvement, ni dépense de travail.

La surface de tout conducteur composé d'une seule et même matière, et actionné seulement par des forces statiques, forme une surface équipotentielle (1).

#### LIGNE DE FORCE

*Définition.* — La ligne de force en un point est la direction dans laquelle un corps chargé placé en ce point tend à se mouvoir.

*La ligne de force en un point est toujours perpendicu-*

(1) Voy. page 42.

laire à la surface équipotentielle qui passe par ce point.

En effet, si la direction de la force est oblique par rapport à la surface, la force peut être décomposée en deux autres : l'une perpendiculaire à cette surface, et l'autre dans la direction même de la surface. Mais nous avons vu que la force dirigée suivant la surface est nulle, donc la force tout entière est perpendiculaire à la surface.

#### RELATION ENTRE LE POTENTIEL ET LA FORCE

On démontre mathématiquement que :

*La force en un point dans une certaine direction est égale au taux (rate) de la variation que le potentiel commence à éprouver, lorsque l'on commence à s'éloigner de ce point dans la direction donnée (1).*

#### POTENTIEL ET CHARGE

Les électrisations de différentes parties du même conducteur, s'il subit l'action de forces inductives, pourront être très différentes, mais le potentiel conserve la même valeur en chaque point.

Ainsi, si un conducteur (A) est placé sur un support isolant, dans le voisinage d'une machine électrique (comme dans la page 8), des électroscopes placés à ses deux extrémités divergeront sous l'action de charges opposées, tandis qu'un électroscope placé au milieu du conducteur ne divergera pas du tout. Mais si un électroscope est placé à une certaine distance, et si un fil métallique le relie au conducteur (A), alors la divergence de l'électroscope dé-

(1) Car le taux de la variation est  $\frac{dV}{dr}$ . Soit  $f$  la force; on a par définition :

$$V = \int f dr + C \quad \text{d'où} \quad \frac{dV}{dr} = f.$$

pendra seulement du potentiel auquel le conducteur (A) a été porté par l'induction de la machine, et ce potentiel *est exactement le même quel que soit le point du conducteur (A) où l'on attache le fil*. Il en résulte qu'un électroscope, protégé contre l'action directe (1), et attaché à un conducteur par un fil métallique, mesure le potentiel de ce conducteur.

(1) Voy. page 7 (Écrans métalliques).

## CHAPITRE VII

### ÉLECTROMÈTRES

Les électromètres et les électroscopes sont des instruments destinés à mesurer la force des attractions et des répulsions entre les corps électrisés.

En mesurant à différentes distances la force de répulsion entre deux corps électrisés, Coulomb a établi la loi suivant laquelle la force électrique décroît avec la distance (page 26).

Au moyen d'un électromètre convenable, nous pouvons aussi mesurer le *potentiel* d'un corps chargé, ou celui d'un point voisin quelconque (voyez à la page précédente).

Les deux types d'électromètres les plus anciens sont ceux de Cavendish et de Lane.

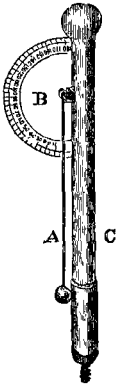


FIG. 8.

Il a été inventé entre 1774 et 1781, et consiste en deux balles de sureau suspendues, au contact l'une de l'autre, par deux fils de lin. Quand ces balles sont électrisées de la même manière, elles se repoussent, et divergent plus ou moins, suivant la force de l'électrisation.

#### ÉLECTROMÈTRE DE LANE (2)

La figure 8 est copiée dans les *Phil. Trans.* pour 1772.

(1) *Electrical Researches* de Cavendish, publiées par Clerk Maxwell (*Camb. Univ. Press*, 1879, art. 244).

(2) *Ibid.*, art. 559.

Une tige de bois C est montée dans une douille de métal qui peut être vissée sur le conducteur dont on veut mesurer l'électrisation. Une balle de sureau, fixée à une paille A, est suspendue à un pivot, au centre du demi-cercle divisé B. L'électricité est transmise par la douille à la balle, qui est alors repoussée. Le nombre de degrés parcourus par la paille donne une idée grossière de la force de l'électrisation.

#### ÉLECTROSCOPE A FEUILLES D'OR

L'électroscope à feuilles d'or (fig. 9) est formé de deux rubans coupés dans une feuille d'or, pou-

vant mesurer, dans un grand instrument, 10 centimètres de long sur 2 cent.  $\frac{1}{2}$  de large, et suspendus par le haut à une tige de métal. Cette tige est fixée dans une ouverture au sommet d'un globe de verre à l'intérieur duquel pendent les feuilles d'or. Le haut de la tige se termine par un plateau de laiton.

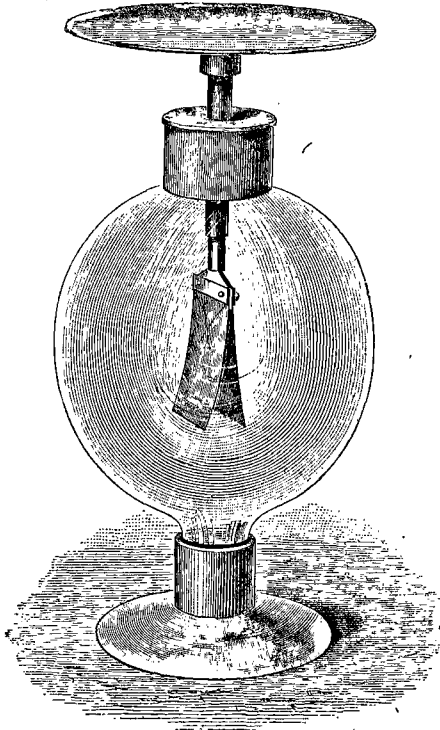


FIG. 9.

Quand un corps électrisé est placé sur le plateau, une partie de l'électricité passe aux feuilles d'or, et les charge toutes deux de la même espèce d'électricité : d'où il résulte que celles-ci se repoussent mutuellement et divergent, ainsi que le montre la figure 9.

Grâce à la légèreté des feuilles d'or, l'instrument est assez sensible pour révéler la présence de petites quantités d'électricité.

#### BALANCE DE TORSION DE COULOMB (pl. I)

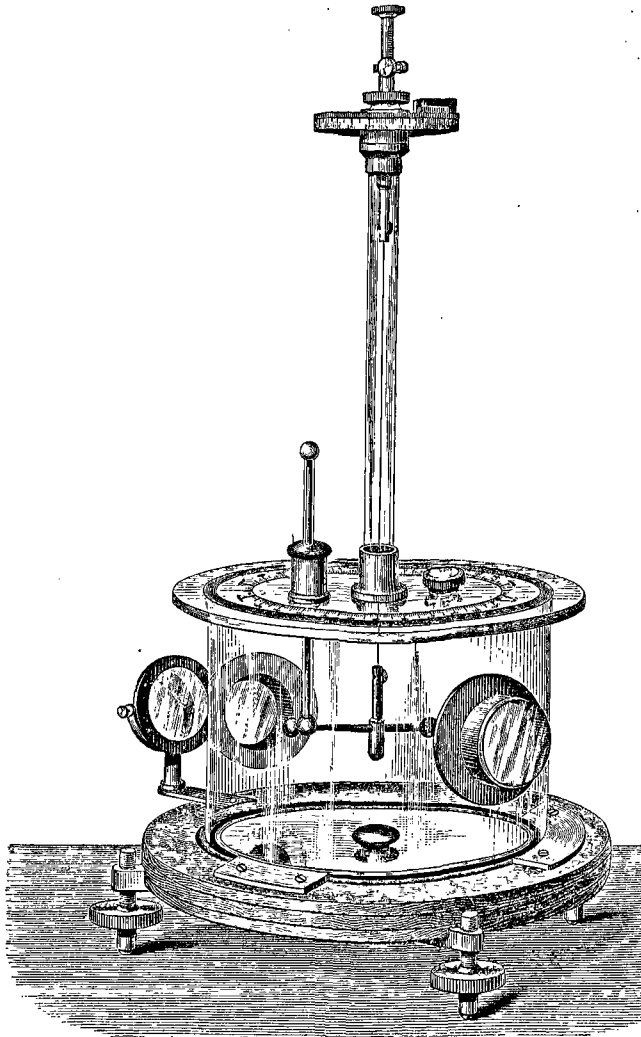
Coulomb fit faire aux électromètres le premier grand progrès. Vers 1785, il publia une note sur un électromètre qui, en raison du principe de sa construction, a été appelé *balance de torsion*.

La *torsion* exercée par un fil suspendu verticalement est la force qui tend à tordre l'extrémité inférieure du fil, quand l'extrémité supérieure tourne d'un certain angle. Si un poids est suspendu par un morceau de ficelle, et que l'on torde entre les doigts le haut de la ficelle, le poids commencera à tourner.

Empêchez-le de tourner avec l'autre main, il faudra exercer une certaine force pour le retenir. Cette force est égale en grandeur, mais de direction opposée à la force développée par la torsion de la ficelle. La grandeur de la force mise en jeu, lorsqu'on fait tourner le haut du fil d'un certain angle, dépend de la grosseur et de la longueur du fil, et du poids qui lui est suspendu. Il est évident qu'avec un fil long et fin et un petit poids, un angle de torsion considérable pourra ne donner qu'une force très petite.

Dans l'appareil de torsion de Coulomb (pl. I), un fil très long et très fin est suspendu dans un tube vertical. Au sommet du tube est un cercle horizontal divisé en degrés,





PL. I. — Balance de torsion de Coulomb.



appelé le cercle de torsion ; on peut le faire tourner au moyen d'une petite tige verticale qui le traverse à son centre. Un index, ou, dans les instruments délicats, un vernier fixé au tube, montre la position du cercle. Le fil est attaché à la tige verticale qui traverse le cercle : en faisant tourner cette tige, on tord le haut du fil d'un angle qui est indiqué par le vernier.

Si l'on veut un angle supérieur à 360 degrés, il faut faire faire au cercle plus d'un tour complet, et noter le nombre des tours.

Au bas du fil est attaché une tige légère, généralement une grosse paille, arrangée de façon à rester suspendue dans une position horizontale ; à un des bouts est une balle de sureau dorée, qui forme un conducteur sphérique de poids très faible, et qui est équilibrée par une autre balle à l'autre bout de la paille. Le tube vertical, portant le cercle, est monté sur une plaque de verre horizontale qui est percée d'une ouverture pour permettre le passage du fil, et qui forme le couvercle de la partie inférieure de la cage. Cette partie inférieure est assez grande pour permettre à la tige horizontale d'osciller librement. Sur le couvercle est gravé un cercle divisé en degrés. Le fond est formé d'une glace étamée. Dans le couvercle, à une distance du centre égale au rayon du cercle décrit par la paille, est un trou par où l'on peut introduire une autre balle de sureau dorée et fixée à une tige verticale.

La position de la paille peut être observée au moyen du cercle gravé : l'observateur, regardant de haut en bas, déplace son œil jusqu'à ce qu'il voie sur une même ligne droite la paille, une division du cercle et l'image par réflexion de cette division dans la glace.

Pour employer l'instrument, on retire la balle de

sureau fixe, et on tourne le cercle de torsion jusqu'à ce que la balle suspendue occupe exactement la position occupée d'abord par la balle fixe. Quand elle est arrivée au repos dans cette position, il n'y a pas de torsion, et l'on prend pour zéro la lecture du cercle de torsion. La balle de sureau fixe est alors électrisée et remise en place, poussant de côté la balle mobile et lui communiquant en même temps la moitié de sa charge. Les balles se repoussent, et si la longueur et la grosseur du fil et la grandeur de la charge ont été convenablement proportionnées, la tige suspendue tourne de 30 à 45 degrés.

La position de la paille est notée, et le cercle de torsion est tourné de façon à ramener les balles l'une vers l'autre, jusqu'à ce que la paille ait tourné d'une division du cercle gravé. On note le nombre de degrés dont a tourné le cercle de torsion, et l'on répète l'opération pour plusieurs divisions, jusqu'à ce que les balles aient été rapprochées assez près l'une de l'autre.

*On peut alors dresser une table montrant la force de répulsion correspondant à chaque diminution de la distance : car la force surmontée dans chaque cas est simplement proportionnelle au nombre de degrés dont a tourné le cercle de torsion.*

Une légère modification permet de mesurer la force d'attraction, quand les balles sont électrisées en sens contraire.

La balance de torsion n'est pas un instrument facile à manier : elle n'est pas très délicate, ni assez exacte pour les exigences modernes. Son grand défaut est que toute la force électrique qu'elle met en jeu est due à l'électrisation à mesurer, laquelle, on s'en souvient, se partage entre les deux balles. Si, comme c'est souvent le cas, l'électri-

sation est faible, la balance accuse un défaut de sensibilité.

Le problème à résoudre, pour perfectionner les électromètres, était d'obtenir une force considérable pour une très faible électrisation. Or, nous savons qu'à une distance donnée, la force entre deux corps électrisés est proportionnelle au produit de leurs charges, en sorte que si nous doublons la charge de l'un, et si nous réduisons celle de l'autre à moitié, nous aurons toujours la même force.

Pour tirer parti de ce fait dans la balance de torsion nous aurons à donner à la sphère fixée à la tige suspendue une charge élevée et constante. La force entre cette sphère et la sphère fixe sera alors considérable, lors même que la charge de la sphère fixe serait faible, et sera proportionnelle à cette charge, quelle qu'elle soit.

Cette disposition ne peut être réalisée dans la balance de torsion sous la forme que Coulomb lui a donnée; mais c'est le point de départ des beaux électromètres à quadrants de sir W. Thomson, que nous allons maintenant décrire avec quelque détail (1).

#### ÉLECTROMÈTRES A QUADRANTS DE SIR W. THOMSON

Le principe d'après lequel sont construits les électromètres à quadrants est le suivant :

Une aiguille de métal, faite en aluminium pour plus de légèreté, et de la forme NN (fig. 10), est suspendue de façon à pouvoir tourner dans un plan horizontal comme une aiguille de boussole.

Cette aiguille est fortement chargée, et, pour lui rendre

(1) *Report on Electrometers and Electro-static Measurements*, Sir Wm. Thomson, F. R. S. *Papers on Electro-statics and Magnetism*, page 260. Macmillan, 1872.

l'électricité qu'elle perd par la déperdition, on la relie à une bouteille de Leyde. Nous décrirons plus loin la bouteille de Leyde (chapitre X); pour le moment, il suffit de

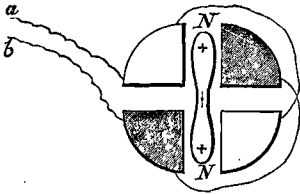


FIG. 10.

savoir que c'est une sorte de réservoir où l'on peut emmagasiner une quantité considérable d'électricité. L'aiguille est suspendue au moyen d'une disposition analogue à celle d'un fil de torsion, qui tend à la ramener au zéro dès qu'elle

en a été écartée. Immédiatement au-dessous de l'aiguille (1), sont quatre quadrants métalliques disposés horizontalement, comme dans la figure 11. Chacun d'eux est isolé de ses voisins, et relié à celui qui lui est opposé diagonalement, ainsi qu'on le voit sur la figure 10.

Supposons que l'aiguille ait une charge d'électricité (+); que les quadrants qui ne sont pas couverts de hachures soient mis à la terre, et que les quadrants ombrés soient reliés, au moyen du fil *b* (fig. 10), au conducteur dont on veut mesurer l'électrisation. De l'électricité s'écoule alors du conducteur chargé aux quadrants ombrés, jusqu'à ce que l'ensemble soit arrivé à un même potentiel.

Le sens de la déviation de l'aiguille indique tout de suite si la charge que l'on examine est (+) ou (-). Nous voyons en effet que si elle est (+), les extrémités de l'aiguille seront repoussées par les quadrants ombrés (fig. 10), et la déviation sera vers la gauche; si la charge est (-), l'aiguille sera attirée, et la déviation sera vers la droite. Si le potentiel est élevé, c'est-à-dire si la charge que l'on exa-

(1) Dans la figure 10, l'aiguille a été figurée entre les quadrants, pour plus de clarté; mais la position réelle est celle qu'indique la figure 11.

mine est forte, la déviation sera considérable; elle sera plus petite, si le potentiel est faible.

*Si la charge de l'aiguille est toujours constante*, la déviation sera toujours la même pour un même potentiel; et si un corps a été chargé un jour à un certain potentiel, on pourra le ramener au même potentiel un autre jour, en le reliant à l'électromètre et faisant varier sa charge jusqu'à

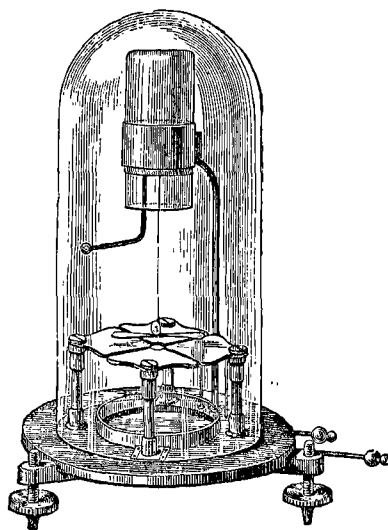


FIG. 11. — Modèle de démonstration.

ce que l'on ait reproduit la même déviation que la première fois.

Si les quadrants ombrés sont chargés positivement, et les autres négativement, l'action des quatre quadrants fera tourner l'aiguille vers la gauche, et la déviation sera celle qui est due à la somme numérique des potentiels des deux électricités opposées, c'est-à-dire à leur différence algébrique.

L'appareil peut être employé pour amener à l'égalité deux potentiels; car si deux corps électrisés de la même manière sont attachés respectivement aux quadrants ombrés et non ombrés, ils tendront à faire tourner l'aiguille en sens inverses, et la déviation dépendra de la différence des potentiels. Si maintenant on fait varier une des électrisations jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de déviation, nous saurons que les potentiels ont été ramenés exactement à l'égalité. L'électromètre est employé à cet usage peut-être plus qu'à aucun autre.

Cette méthode est appelée « méthode de réduction à zéro ».

#### FORMES USUELLES DE L'ÉLECTROMÈTRE

L'instrument représenté dans la figure 11 n'est guère qu'un appareil de démonstration. La forme la plus simple employée dans les véritables expériences est connue sous le nom d' « électromètre Thomson, modèle d'Elliott (1) ».

#### ÉLECTROMÈTRE THOMSON, MODÈLE D'ELLIOTT.

Cet instrument est représenté dans la figure 12; il diffère de l'appareil de démonstration en ce que les quadrants sont les quarts, non plus d'un disque, mais d'une sorte de boîte plate et ronde, à l'intérieur de laquelle est suspendue l'aiguille. De la sorte, l'action s'exerce à la fois sur les deux faces de l'aiguille.

La bouteille de Leyde est placée au fond de l'instrument : elle contient de l'acide sulfurique concentré, qui est relié à l'aiguille par un fil de platine attaché à l'aiguille et plongeant dans l'acide. Par son affinité pour l'humidité,

(1) Il est construit par la maison Elliott Bros., de Londres.



l'acide maintient l'intérieur de l'appareil toujours bien sec (1).

Trois tiges de métal sortent de l'instrument : deux, que l'on voit sur la droite, sont reliées respectivement aux deux paires de quadrants ; la troisième, qu'on voit sur le devant de la figure, peut être reliée à l'aiguille, quand on désire la charger d'électricité.

L'aiguille est suspendue par ce que l'on appelle « une

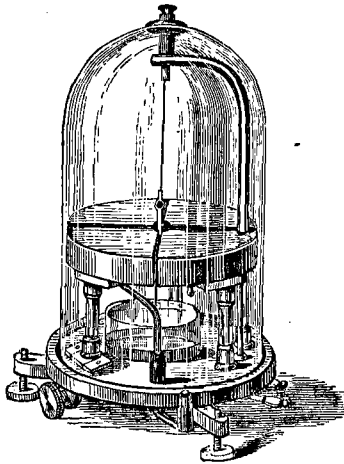


FIG. 12. — Modèle d'Elliott.

suspension bifilaire », c'est-à-dire accrochée à deux fils de soie très fins, parallèles, et écartés d'environ un millimètre et quart. Après que l'aiguille a été écartée de sa position de repos, ces fils tendent toujours à l'y ramener.

La position de l'aiguille peut être réglée en tournant le bouton, placé au sommet de la cage de verre, auquel sont attachés les fils.

(1) Quand l'appareil est en service, il faut veiller sur l'acide, qui peut augmenter de volume en absorbant de l'eau assez pour déborder du vase après quelques semaines.

Quand l'instrument est en service, on le couvre d'une cage en fil métallique reliée à la terre, afin de protéger les quadrants contre l'induction des corps électrisés du voisinage (1).

Le modèle d'Elliott est très sensible comme *electroscope*. C'est, je crois, le meilleur modèle à employer pour toute la vaste et importante classe de recherches, où l'on doit ramener deux potentiels à l'égalité par la méthode de réduction à zéro (page 56); mais, comme il n'y a aucun moyen de déterminer la charge de l'aiguille, ou de la maintenir constante, il ne peut être utilisé dans les expériences où des potentiels doivent être mesurés en observant l'amplitude de la déviation.

#### LA LAMPE, L'ÉCHELLE ET LE MIROIR

Pour observer et mesurer de petits déplacements angulaires de l'aiguille, il faut un index d'une grande longueur :

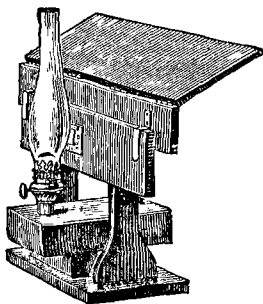


Fig. 13.

d'autre part, si l'on attachait à l'aiguille un long index matériel, son poids ôterait à l'instrument sa sensibilité.

C'est pour cela que Sir W. Thomson a imaginé une disposition au moyen de laquelle un rayon de lumière agit comme un index d'une certaine longueur et d'un poids absolument nul.

Un miroir circulaire, d'environ 8 millimètres  $\frac{1}{2}$  de diamètre, est fixé à l'aiguille par une tige de platine qui se prolonge au-dessus des quadrants.

(1) Voy. page 7.

Une lampe et une échelle, dont le dos (c'est-à-dire le côté le plus éloigné de l'électromètre) est représenté dans la figure 13, sont placées sur la table à 60 centimètres environ de l'instrument. La lumière passe par une petite ouverture pratiquée dans le bas de l'échelle, tombe sur le miroir, s'y réfléchit, et revient faire une petite image lumineuse sur le haut de l'échelle. Le moindre mouvement de l'aiguille et du miroir déplace l'image le long de l'échelle. Le chemin qu'elle parcourt est égal à celui qu'aurait décrit l'extrémité d'un index, ayant une longueur double de la distance du miroir à l'échelle.

L'ouverture à travers laquelle passe la lumière est tantôt une fente verticale, tantôt un trou rond, traversé ou non par un fil tendu verticalement.

Quelquefois le miroir est plan, et l'on fait converger la lumière, de manière à avoir son foyer sur l'échelle, au moyen d'une lentille; d'autres fois, le miroir est concave, ce qui dispense de la lentille.

Quand on emploie une fente, l'image mobile est une ligne lumineuse verticale; avec un trou, c'est un cercle éclairé traversé par une fine ligne noire verticale, l'image du fil.

L'échelle est généralement divisée en millimètres et imprimée en noir sur du papier blanc glacé.

Quand on emploie une lampe à pétrole à mèche plate, la mèche doit être présentée « par la tranche », c'est-à-dire perpendiculairement à l'échelle.

#### MODÈLE DE WHITE (pl. II et III)

C'est la forme la plus soignée de l'électromètre à quadrants de Thomson : elle est construite par White, de Glasgow.

Dans un instrument destiné à la mesure directe des potentiels et aux observations de déviations, les principales conditions à remplir sont :

1° Un moyen de vérifier la constance de l'électrisation de l'aiguille suspendue, et une méthode pour régler très exactement cette électrisation, c'est-à-dire pour l'augmenter ou la diminuer par quantités très petites ;

2° Une méthode pour faire varier la force directrice qui tend à ramener l'aiguille à sa position de repos, avec la certitude que, quelle que soit la valeur à laquelle aura été réglée cette force directrice, elle restera constante ;

3° Une méthode très exacte pour mesurer les déviations de l'aiguille.

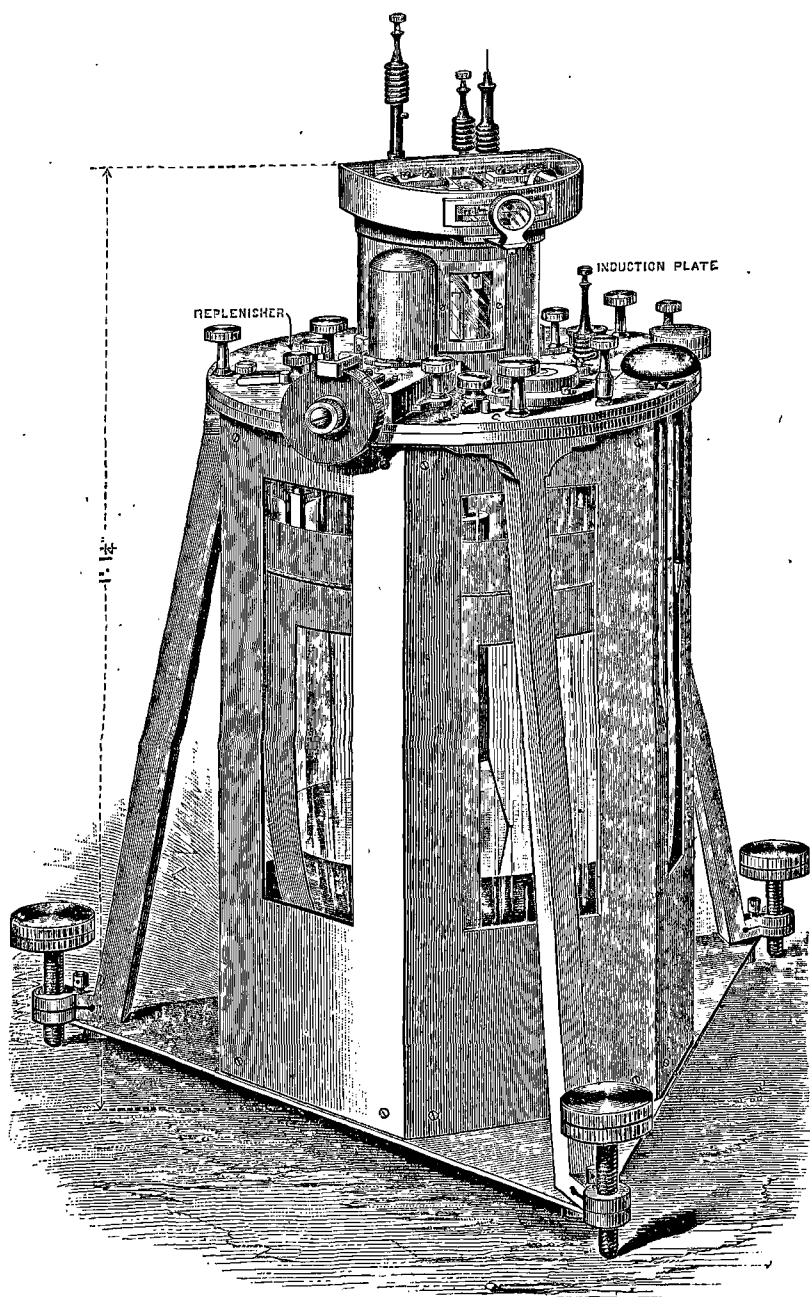
Nous allons voir comment ces conditions sont satisfaites.

La planche II montre l'appareil en perspective, et la planche III en coupe.

Le corps de l'instrument consiste en un globe de verre renversé, supporté par trois pieds munis de vis calantes. L'extérieur de ce globe est recouvert de feuilles d'étain ; l'intérieur est en partie rempli d'acide sulfurique concentré pur, qui, étant conducteur, forme l'armature intérieure nécessaire pour faire agir ce globe comme bouteille de Leyde (1). Le revêtement extérieur d'étain est percé d'ouvertures aux endroits où cela est nécessaire pour que l'on voie l'intérieur de l'appareil.

L'acide sulfurique sert à maintenir secs les organes intérieurs, comme dans le modèle d'Elliott. En haut du verre est un couvercle plat de métal, qu'à l'avenir nous appellerons le « couvercle principal ». Sur ce couvercle principal est une boîte de laiton en forme de lanterne, dont

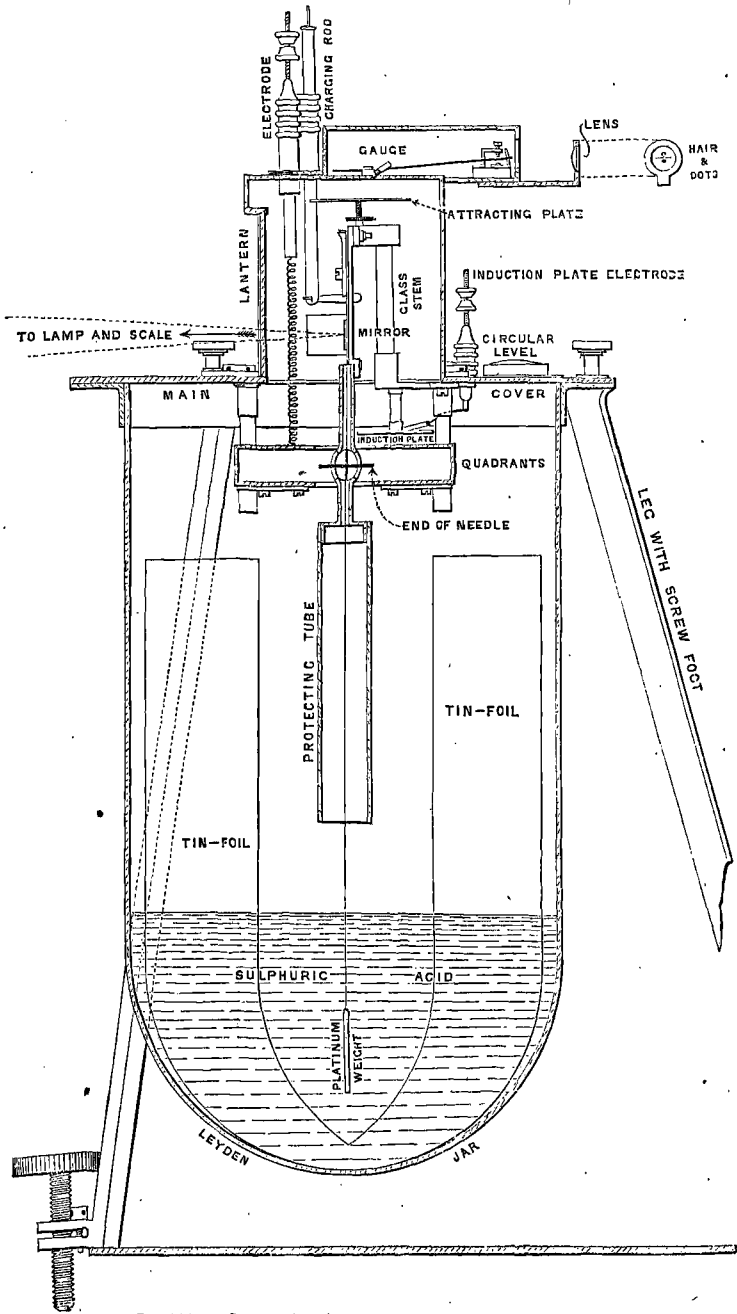
(1) Voy. chapitre X.



PL. II. — Électromètre à quadrants de Thomson. [Dimensions en pieds (') et pouces (").]  
*Replenisher* = Rechargeur. | *Induction plate* = Plaque d'induction.

### LÉGENDE DE LA PLANCHE III

<i>Charging rod</i> = Tige de charge.	<i>Circular level</i> = Niveau circulaire.
<i>Gauge</i> = Jauge.	<i>Main cover</i> = Couvercle principal.
<i>Lens</i> = Lentille.	<i>Induction plate</i> = Plaque d'induction.
<i>Hair and dots</i> = Cheveux et points.	<i>Quadrants</i> = Quadrants.
<i>Attracting plate</i> = Plaque attirante.	<i>End of Needle</i> = Bout de l'aiguille.
<i>Lantern</i> = Lanterne.	<i>Protecting tube</i> = Tube protecteur.
<i>Glass Stem</i> = Tige de verre.	<i>Tin-foil</i> = Feuille d'étain.
<i>Induction plate electrode</i> = Électrode de la plaque d'induction.	<i>Sulphuric acid</i> = Acide sulfurique.
<i>Mirror</i> = Miroir.	<i>Platinum weight</i> = Masse de platine.
<i>To lamp and scale</i> = A la lampe et à l'échelle.	<i>Leyden jar</i> = Bouteille de Leyde.
	<i>Leg with screw foot</i> = Support avec vis calantes.



Pl. III. — Section de l'électromètre à quadrants de Thomson.





la partie antérieure est munie d'une glace plate. C'est ce que nous appellerons la « lanterne ».

L'aiguille a son point de suspension près du sommet de la lanterne, et pend au-dessous du couvercle principal. Les quadrants forment une boîte qui enferme complètement l'aiguille, comme dans le modèle d'Elliott, mais ils sont bien plus petits. L'aiguille est reliée à l'armature intérieure de la bouteille par un fil de platine qui lui est accroché et

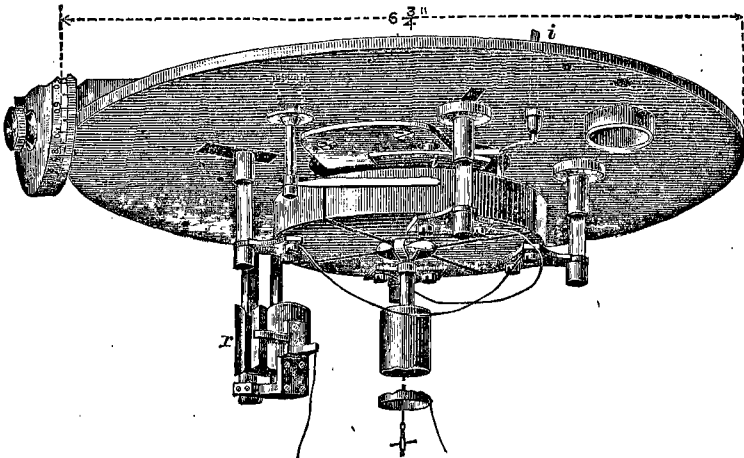


FIG. 14 (7/8 pouces).

plonge dans l'acide. A ce fil est attaché un poids de platine qui est suspendu au-dessous de la surface de l'acide, et qui, par son frottement contre le liquide, contribue aussi à arrêter les oscillations de l'aiguille. Le fil est protégé par un large tube de métal.

Trois tiges font saillie au-dessus du couvercle principal : deux, appelées les « électrodes », sont reliées chacune à une des deux paires de quadrants ; la troisième sert à charger l'aiguille.

En soulevant les électrodes, on peut rompre leur communication avec les quadrants : celle de gauche sur la planche II est montrée soulevée. Un des quadrants peut être réglé au moyen d'une vis micrométrique, dont on voit la tête sur la planche II, et sur le côté gauche de la figure 14.

La figure 14 est un dessin du « couvercle principal », vu par-dessous. Au centre sont les quadrants, avec le tube dans lequel passe le fil allant de l'aiguille à l'acide. Le « rechargeur » *r* (voy. page 68) est à gauche, et la « plaque d'induction » *i* (voy. page 70) est au-dessus d'un des quadrants de droite.

#### LA JAUGE (fig. 15)

La disposition qui permet de savoir si le potentiel de l'aiguille et de la jarre reste constant est la suivante :

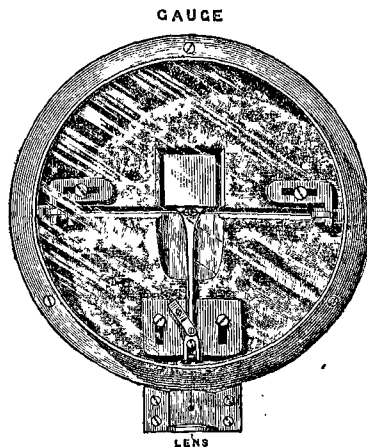


FIG. 15. — *Gauge* = Jauge; *Lens* = Lentille.

Près du sommet de la lanterne est une plaque métallique

horizontale, fixe, reliée à l'aiguille et à l'intérieur de la jarre, mais isolée du reste de l'instrument (voy. pl. III). Au-dessus est un levier mobile autour d'un axe horizontal. Le côté le plus léger consiste en une petite feuille carrée d'aluminium qui, lorsque le levier est horizontal, est parallèle à la plaque fixe et juste au-dessus d'elle. Elle se charge par induction en sens inverse de la plaque, et, par suite, est attirée par la plaque.

L'axe horizontal consiste en un fil de platine passé dans deux trous de la plaque et tendu sur une petite arête qu'elle présente. Le bout le plus lourd du levier se termine par une fourche horizontale entre les dents de laquelle est tendu un cheveu (1). Une plaque émaillée blanche, marquée de deux points noirs, est fixée au massif de l'instrument et fait saillie entre les dents de la fourche. On observe à la fois le cheveu et les points de repère à travers une lentille.

L'équilibre est réglé de telle sorte que, lorsque l'aiguille a reçu la charge convenable, le cheveu apparaît exactement entre les deux points. Si la charge croît, l'attraction augmente, et l'on voit le cheveu sur le point supérieur ou au-dessus. Si la charge diminue, le cheveu descend vers le point inférieur.

Une jauge exactement semblable est employée dans l'électromètre absolu : la figure 15 a été dessinée d'après ce dernier instrument.

Avec cette disposition, on peut toujours observer tout changement dans le potentiel de l'aiguille.

#### LE RECHARGEUR

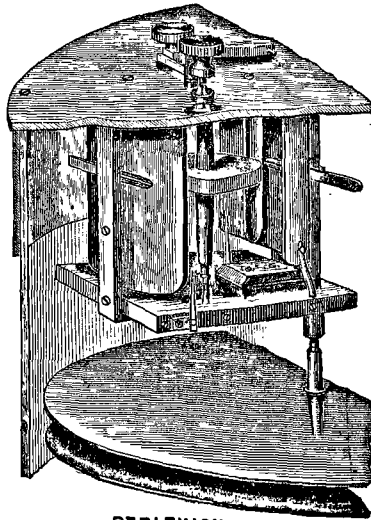
Le *rechargeur* (*replenisher*) sert à modifier la charge de

(1) On a reconnu qu'un poil de chien terrier noir est ce qui convient le mieux.

l'aiguille si cela est nécessaire; il agit en ajoutant ou en enlevant à l'aiguille et à la jarre de petites portions de leur charge, suivant les besoins.

Grâce à lui, on peut amener le cheveu exactement entre les points de repère.

Le rechargeur est représenté dans la figure 16. Deux plaques de métal fixes, reliées respectivement à l'aiguille et à la terre, agissent par induction sur des pièces métal-



REPLENISHER

FIG. 16. — Rechargeur.

liques portées par un arbre tournant. La charge induite sur ces dernières leur est enlevée par des ressorts qui les touchent à un moment convenable de leur rotation, et se porte sur l'aiguille, dont elle augmente ou diminue la charge, suivant le sens du mouvement (1).

(1) Deux autres ressorts mettent en communication les pièces mobiles une fois par demi-révolution.

L'emploi du rechargeur pendant quelques instants suffit à combler les pertes de vingt-quatre heures.

Un rechargeur identique est aussi employé dans l'électromètre absolu. La figure 16 a été dessinée d'après ce dernier instrument, auquel appartiennent les deux plaques figurées au bas du dessin, et qui ne font pas partie de l'électromètre à quadrants.

#### LA SUSPENSION

Dans les premiers instruments, l'aiguille était suspendue par un seul fil de soie, et ramenée à sa position de repos au moyen d'un petit aimant qui lui était fixé, et d'un gros aimant d'acier extérieur à la cage.

Dans les instruments récents, on a toujours employé la suspension bifilaire. Par une ingénieuse disposition de vis, on peut faire varier l'écartement des fils, duquel dépend la sensibilité de l'instrument, de 1,27 à 3,2 millimètres. Les fils de suspension sont deux fils de cocon. La figure 17 donne le détail de la suspension.

Le fil de platine rigide auquel sont fixés le miroir et l'aiguille porte à sa partie supérieure une traverse à laquelle sont attachés les bouts inférieurs des fils de suspension. Les autres extrémités sont enroulées autour des deux chevilles *c* et *d*, que l'on peut faire tourner dans leurs

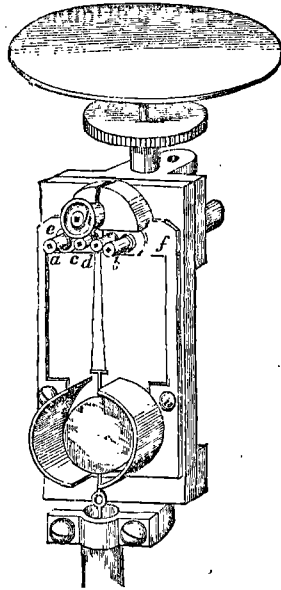


FIG. 17.

montures au moyen d'une clef carrée, de façon à égaliser la tension des deux fils et à suspendre l'aiguille à égale distance des faces supérieure et inférieure des quadrants. Les chevilles *c* et *d* tournent dans des pièces portées par les ressorts *e* et *f*, pour leur permettre de se déplacer horizontalement, lorsque l'on règle la position des points de suspension. Les vis *a* et *b*, qui traversent ces pièces, s'appuient, par leurs pointes, sur la plaque fixe qui est derrière, en sorte que si l'on tourne *a* ou *b* dans le sens des aiguilles d'une montre, le point de suspension voisin est porté en avant, et inversement. On peut ainsi faire tourner l'aiguille d'un certain angle, jusqu'à ce qu'elle soit dans la position symétrique indiquée par la figure 10, toute perturbation électrique étant évitée en reliant les quadrants aux armatures intérieure et extérieure de la jarre. La cheville conique *h* passe entre les deux ressorts et se visse dans la plaque qui est derrière : en la vissant, on écarte l'un de l'autre les points de suspension, et l'on diminue la sensibilité de l'aiguille par rapport à un couple tendant à la dévier, et inversement. En haut de la figure 17, on voit la plaque qui attire la jauge.

#### LA PLAQUE D'INDUCTION

L'instrument est extrêmement sensible : il est surtout destiné à mesurer de très petites différences de potentiel. Pour pouvoir en mesurer d'un peu plus grandes, on introduit la *plaque d'induction*, afin de diminuer la sensibilité.

La figure 18 représente une section verticale par cette plaque. *c* est un des quadrants, *e* la plaque d'induction, *i* la tige de verre qui la supporte, *a* l'électrode.

Quand on veut mesurer une électrisation trop forte

pour la disposition ordinaire de l'appareil, le corps électrisé est relié à la plaque d'induction au lieu du quadrant, et le potentiel du quadrant, au lieu d'être celui du corps, n'est plus que le potentiel induit par la plaque chargée, laquelle est petite et éloignée du quadrant (1). Voy. aussi planche III, et *ig*, figure 14.

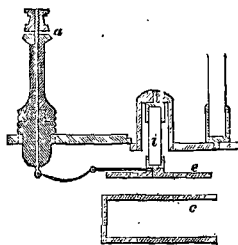


Fig. 18.

(1) Sir William Thomson donne les indications suivantes pour obtenir d'autres degrés de réduction de la sensibilité :

Les communications peuvent être changées de façon à donner, avec d'autres degrés de sensibilité, des indications parfaitement dignes de confiance et comparables. Les différentes méthodes pour établir les communications, avec ou sans inducteur, sont indiquées dans le tableau suivant, où R désigne l'électrode de la paire de quadrants marqués RR' sur la figure 19; L celle de la paire LL', I celle de la plaque d'induction; C est le fil conducteur amené d'un des corps en expérience, O le fil conducteur amené de l'autre et relié à la cage métallique extérieure de l'instrument, qui peut être isolé de la table en mettant un petit bloc ou un petit gâteau de paraffine pure sous chacun de ses trois pieds. (R) ou (L) signifie que l'électrode de RR' ou de LL' doit être soulevée de façon à couper la communication avec les quadrants correspondants. Ainsi, dans la disposition à sensibilité réduite qui est la première à droite sur le tableau, l'électrode L est soulevée, un conducteur est relié à R et l'autre à I et à la cage de l'instrument. La dernière disposition du tableau, où L et R sont soulevées, est la moins sensible de toutes. Dans chacune de ces dispositions, l'exactitude des indications a été vérifiée par des mesures prises simultanément sur l'électromètre étalon (modification de l'électromètre absolu décrit plus loin), la différence de potentiels mesurée étant celle de la terre et d'une bouteille de Leyde munie d'un rechargeur, au moyen duquel on a fait varier son potentiel de façon à fixer l'image réfléchie successivement sur chacune des divisions entre le zéro et l'extrémité de l'échelle. Le fonctionnement du rechargeur était interrompu par intervalles, pour permettre de prendre des mesures exactes de la position de l'image et de relever les indications de l'électromètre étalon : l'existence d'une exacte proportion entre les déviations et les mesures fournies par l'électromètre étalon, a été vérifiée pour tous les points de la série (voy. page suivante).

## L'ÉCHELLE.

Les déviations sont mesurées avec une lampe et une échelle semblables à celles que l'on emploie pour les instruments plus simples, sauf que l'échelle, au lieu d'être

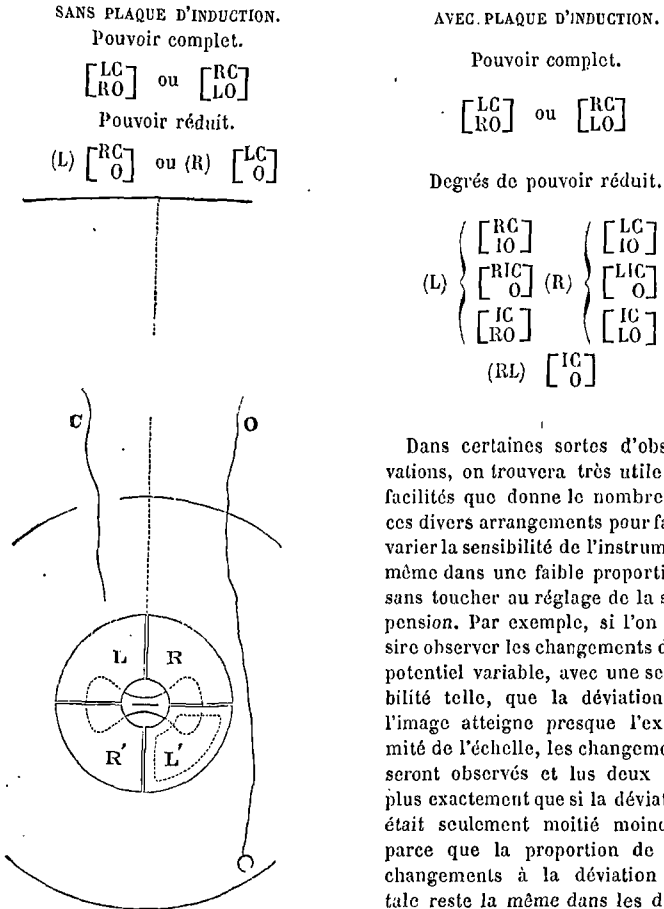


FIG. 19.

Dans certaines sortes d'observations, on trouvera très utile les facilités que donne le nombre de ces divers arrangements pour faire varier la sensibilité de l'instrument même dans une faible proportion, sans toucher au réglage de la suspension. Par exemple, si l'on désire observer les changements d'un potentiel variable, avec une sensibilité telle, que la déviation de l'image atteigne presque l'extrémité de l'échelle, les changements seront observés et lus deux fois plus exactement que si la déviation était seulement moitié moindre, parce que la proportion de ces changements à la déviation totale reste la même dans les deux cas.



plane, est courbée suivant un arc de cercle dont le miroir occupe le centre. L'angle de déviation peut être calculé tout de suite d'après le nombre de divisions de l'échelle parcourues par l'index lumineux.

En substituant la lumière Drummond à la lampe à pétrole, et en employant une échelle de plus grande dimension, l'instrument peut servir d'appareil de démonstration.

Je n'ai pas donné d'indication sur le réglage et l'emploi de l'électromètre, ces indications étant données en détail dans une brochure qui accompagne chaque instrument.

## CHAPITRE VIII

### SUR LA THÉORIE DE LA MESURE ABSOLUE

Dans ces dernières années, les savants ont reconnu combien il importe de rapporter toutes les mesures à un système commun d'unités, ou, en d'autres termes, de rendre les valeurs numériques des quantités physiques indépendantes des instruments particuliers qui ont servi à les mesurer.

On s'imagine aisément la confusion qui existerait dans le monde commercial, s'il n'y avait pas d'étalons reconnus de longueur et de poids, et si chaque commerçant vendait avec des poids arbitraires et des mesures arbitraires de longueur qui lui fussent propres.

Une confusion presque aussi grande a régné dans le monde scientifique jusqu'au moment où le système de mesure absolue s'est développé par les travaux de Gauss, Weber, Thomson, Fleeming Jenkin, Clerk Maxwell, Balfour Stuart et autres.

Pour définir une certaine force électrique, par exemple, un observateur indiquait qu'il fallait, pour la neutraliser, donner une torsion de  $1000^\circ$  au fil de la balance de torsion dont il se servait. La même force électrique, cependant, mesurée à la balance d'un autre observateur, aurait donné un nombre de degrés de torsion tout à fait différent.

Avant l'invention, par Fahrenheit, de la première échelle thermométrique à points de repère absolus, le

même nombre sur des thermomètres différents représentait des températures tout à fait différentes.

Il n'existe pas encore d'échelle absolue pour l'intensité de la lumière.

Ce défaut se faisait principalement sentir dans les méthodes de mesure des courants et des résistances électriques, et dans celles des effets électro-magnétiques (1).

Aujourd'hui, grâce en partie à l'impulsion des compagnies de télégraphie sous-marine, qui n'ont pas hésité à dépenser des sommes considérables pour leur perfectionnement, ces méthodes sont arrivées à un degré de perfection très avancé.

#### UNITÉS ABSOLUES

Le système de mesure absolu, dans son ensemble, consiste en ceci :

On choisit certaines unités de masse, longueur et temps, et l'on en déduit les unités dérivées de densité, aire, volume, vitesse, force, quantité de mouvement, énergie, etc.

De celles-ci on déduit ensuite les unités d'électrisation, potentiel, courant électrique, résistance électrique, etc.

Toutes ces unités, fondamentales et dérivées, sont appelées des unités absolues.

#### INSTRUMENTS ABSOLUS

On appelle instruments absolus ceux des instruments servant à la mesure des quantités électriques et des autres quantités physiques dont les graduations sont disposées de façon à donner en unités absolues les valeurs des quantités mesurées. Comme ces appareils sont en général très coûteux,

(1) Voy. III<sup>e</sup> partie.

teux, très lourds, peu portatifs et peu commodes à manipuler, on construit des instruments plus petits à graduations arbitraires.

On effectue un certain nombre de mesures de la même quantité physique avec ces petits instruments, et on les compare avec les mesures de la même valeur fournies par un instrument absolu; on dresse ensuite une table de comparaison des graduations.

C'est ce qu'on appelle la *détermination des constantes* du petit instrument. Un instrument arbitraire dont les constantes ont été déterminées devient un instrument absolu.

#### CHOIX DES UNITÉS

Le gouvernement anglais a adopté, pour les mesures électriques et magnétiques, le pied, le grain et la seconde comme étalons respectifs des unités de longueur, de masse et de temps, et ce système est encore usité dans les observatoires de l'État.

Ce système, quoique commode dans certains cas, ne convient pas à des mesures scientifiques, parce que les unités plus grandes de chaque espèce ne sont pas des multiples décimaux de l'unité la plus petite.

L'once, par exemple, n'est pas un multiple décimal du grain, ni la livre un multiple décimal de l'once. Le yard n'est pas un multiple décimal du pied, ni le mille du yard. Chaque fois que l'on veut faire la conversion en unités plus grandes ou plus petites des mesures exprimées en unités plus petites ou plus grandes, il faut effectuer une division ou une multiplication.

#### UNITÉS C. G. S.

Pour éviter ce travail et cette source d'erreur, les sa-

vants ont adopté un système décimal, dit le système métrique.

Dans ce système, la seconde est encore prise comme unité de temps,

Le centimètre est l'unité de longueur, et

Le gramme, l'unité de masse.

*Le système de mesure basé sur ces unités est appelé le système centimètre-gramme-seconde, ou, par abréviation, le système C. G. S. (1).*

#### LONGUEUR

Le centimètre est la centième partie du mètre.

Le mètre est théoriquement la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre, c'est-à-dire la dix-millionième partie du résultat obtenu par une mesure particulière de cette quantité. Pratiquement, c'est la distance à 0° C. de deux traits gravés près des bouts d'une barre-étalon de platine conservée à l'Observatoire de Paris.

Si des mesures subséquentes du quadrant terrestre donnaient un nombre qui ne serait pas rigoureusement égal à dix millions de fois cette distance, le mètre-étalon ne serait pas changé, mais on dirait que le quadrant terrestre contient un nombre de mètres supérieur ou inférieur à dix millions. Le mètre est égal à

39,370432 pouces,

ou à

1,09362311 yards (2),

(1) Voy. *Units and Physical Constants*, par le prof. J. D. Everett, F. R. S. Macmillan et C°, 1879.

(2) Pour calculer rapidement la valeur approchée du nombre qui correspond en unités ordinaires anglaises à un nombre exprimé dans le système métrique, on peut poser : 1 mètre = 40 pouces, 1 décimètre = 4 pouces, 1 centimètre =  $\frac{4}{10}$  de pouce, 1 millimètre =  $\frac{4}{25}$  de pouce. Le kilomètre (ou 1000 mètres) est à peu près égal à 5 furlongs.

en supposant le mètre-étalon réglé à 0° C., et le yard-étalon à

$$16 \frac{2}{3} \text{ C. (62° F.).}$$

Les subdivisions du mètre sont :

$$\begin{aligned} 10 \text{ millimètres} &= 1 \text{ centimètre.} \\ 100 \text{ millimètres} &= 10 \text{ centimètres} = 1 \text{ décimètre.} \\ 1000 \text{ millimètres} &= 100 \text{ centimètres} = 10 \text{ décimètres} = 1 \text{ mètre.} \end{aligned}$$

#### MASSE

Le *gramme* est théoriquement la masse d'un centimètre cube d'eau distillée à 4° C. Pratiquement, c'est la millièmc partie de la masse d'un morceau de platine conservé à Paris.

Les masses de deux corps peuvent être comparées en un même lieu par une simple pesée, sans qu'il soit besoin de connaître la force de la pesanteur en ce lieu, puisque cette force est la même aux deux bouts de la balance : par conséquent, les poids sont proportionnels aux masses.

Les masses de deux corps en des lieux différents ne peuvent pas être comparées en envoyant dans chaque lieu le même dynamomètre à ressort, car la force de la pesanteur ayant une valeur différente, les masses ne sont plus proportionnelles aux poids.

*Définition.* — La masse d'un corps est la quantité de matière qu'il renferme.

Le poids d'un corps en un lieu est le produit de sa masse par la force de la pesanteur dans ce lieu.

## UNITÉS DÉRIVÉES C. G. S.

## DENSITÉ

*La densité d'une substance est la masse ou quantité de matière par unité de volume.*

Dans le système C. G. S., c'est le nombre de grammes par centimètre cube. Nous voyons maintenant pourquoi on a choisi comme unité le centimètre au lieu du mètre. C'est afin d'avoir la densité de l'eau représentée par 1 ; en adoptant le mètre pour unité, elle serait représentée par 1 000 000.

Les densités des différentes substances restent alors égales à leurs poids spécifiques, c'est-à-dire au rapport de leurs densités à celle de l'eau ; elles gardent donc leur valeur quand on passe à la mesure absolue. L'adoption du mètre comme unité eût obligé à multiplier les poids spécifiques par 1 000 000 pour avoir les densités.

Notons ici que, des deux unités de densité et de masse, on peut prendre arbitrairement l'une comme fondamentale, et l'autre comme dérivée ; mais c'est de peu d'importance.

L'avantage qu'il y a à partir de l'unité de masse est que la comparaison des masses peut se faire plus rigoureusement que celle des densités.

On peut dire, soit comme plus haut, que la densité d'une substance est la masse (exprimée en unités arbitraires de masse, par exemple en fonction de la masse d'un morceau de platine à Paris) par unité de volume ; soit encore, que l'unité de masse est la quantité par unité de volume d'une substance (l'eau distillée à 4° C.) dont la densité est prise arbitrairement comme unité.

L'étalon en platine de l'unité de masse a été construit autant que possible de façon à rendre ces deux définitions identiques; mais si, en raison de déterminations plus exactes de la densité de l'eau, ces deux définitions cessaient de concorder, l'unité de masse ne serait pas changée, mais on corrigerait la densité de l'eau. Les densités des autres substances étant déterminées expérimentalement par le rapport de ces densités à celle de l'eau, les nombres qui expriment ces rapports (les poids spécifiques) resteront invariables; mais il faudra les multiplier par la nouvelle valeur de la densité de l'eau pour obtenir les densités vraies.

#### VITESSE

*La vitesse d'un corps qui se meut avec une vitesse uniforme est le nombre de centimètres qu'il parcourt en une seconde.*

La vitesse à un instant donné d'un corps qui se meut avec une vitesse variable est le nombre de centimètres qu'il parcourrait dans une seconde s'il effectuait ce parcours d'un mouvement uniforme pendant une seconde avec la vitesse qu'il possède à cet instant.

Un corps se mouvant à la vitesse d'un centimètre par seconde a l'unité de vitesse (1), ou encore, *l'unité de vitesse est la vitesse d'un centimètre par seconde.*

#### ACCÉLÉRATION

Considérons un point se mouvant avec une vitesse variable; si la vitesse va en croissant, on dit que le mouvement du point est *accélééré*.

(1) Cette unité de vitesse est égale à une vitesse de 40 yards (36 mètres) par heure.



Si la vitesse va en diminuant, on dit que le mouvement du point est *retardé*.

Pour la commodité du calcul, on donne à l'accroissement et à la diminution de vitesse le nom commun d'accélération, mais la diminution de vitesse est appelée une accélération négative.

Il est facile de justifier la légitimité de cette convention, car si le mouvement d'un point reçoit à la fois la même accélération et le même retard, sa vitesse restera constante. La somme algébrique de l'accélération et du retard est zéro, ce qui montre que le retard peut être considéré comme une quantité de grandeur égale, mais de signe opposé, à l'accélération positive. Arrivons à la définition de l'unité d'accélération :

*L'accélération uniforme est le nombre d'unités de vitesse dont la vitesse du point mobile varie dans une seconde.*

L'accélération variable à un instant donné est le nombre d'unités de vitesse dont la vitesse du point mobile varierait dans une seconde, si pendant une seconde le taux de la variation conservait la valeur qu'il a à cet instant.

*L'unité d'accélération est un accroissement de vitesse d'un centimètre par seconde.*

#### FORCE

Si un corps, doué d'une masse, se meut avec une vitesse variable, c'est qu'une force agit sur lui (1).

La valeur de la force se mesure par le nombre d'unités d'accélération qu'elle produit en agissant sur l'unité de masse (2); en d'autres termes, la valeur de la force est

(1) Newton, Lois I et II.

(2) Elle se mesure aussi par le nombre d'unités de *quantité de mouvement* qu'elle peut produire dans l'unité de temps.

égale au nombre d'unités de vitesse dont elle augmente la vitesse de l'unité de masse dans l'unité de temps.

*L'unité de force est la force qui, agissant sur une masse d'un gramme pendant une seconde, accroîtrait sa vitesse d'une vitesse d'un centimètre par seconde.*

Cette unité de force a reçu le nom de *dyne*. Or, la vitesse d'un corps qui tombe *dans le vide* à Greenwich croît au taux de 981,17 centimètres par seconde pendant chaque seconde de chute; en d'autres termes, à Greenwich, la terre agit sur un corps situé à sa surface ou au-dessus de sa surface avec une force de 981,17 dynes par unité de masse; ou encore, pour soutenir un gramme à Greenwich, il faut une force de 981,17 dynes (1).

En résumé :

La dyne ou unité de force est la force qui, agissant pendant une seconde sur une masse d'un gramme, lui imprimerait, si cette masse était primitivement au repos, une vitesse d'un centimètre par seconde, ou, si cette masse était primitivement en mouvement dans la direction de la force, ferait dans le même temps varier sa vitesse de la même quantité. Une dyne est  $\frac{1}{981,17}$  de la force qu'exerce la pesanteur sur un gramme à Greenwich.

#### TRAVAIL

*L'unité de travail s'appelle le erg; c'est la quantité de travail développée par une dyne pendant un parcours d'un centimètre; en d'autres termes, elle est égale au travail nécessaire pour faire mouvoir un corps d'un centi-*

(1) Entre l'équateur, où elle a sa plus petite valeur, et le pôle, où elle atteint sa plus grande valeur, l'attraction terrestre varie d'environ  $\frac{1}{196}$  de sa valeur moyenne. (A Paris, ce serait 980,88.)

mètre quand la force contraire est d'une dyne. Pour soulever un gramme d'un centimètre à Greenwich, il faut dépenser 981,17 ergs de travail, et, le corps étant parvenu à l'extrémité de cette course d'un centimètre, si on l'abandonne à lui-même, il développera la même somme de travail en tombant d'un centimètre.

#### APPLICATION DU SYSTÈME C. G. S. A L'ÉLECTRO-STATIQUE.

Arrivons à la mesure des effets électro-statiques dans le système C. G. S.

#### QUANTITÉ

*L'unité électro-statique de quantité est la quantité d'électricité qui, à l'unité de distance, repoussera avec l'unité de force une quantité égale d'électricité de la même espèce ; dans le système C. G. S., c'est la quantité d'électricité qui, à la distance d'un centimètre, repousse une quantité égale avec une force d'une dyne.*

Cette unité étant déterminée expérimentalement (on décrira plus tard la méthode employée à cet effet), voyons comment on peut graduer une balance de torsion, par exemple. Supposons la balle fixe chargée avec deux unités, et faisons-la toucher par la balle mobile : chacune des balles sera alors chargée avec une unité d'électricité, et elles se repousseront mutuellement. Tournons alors le cercle de torsion jusqu'à ce que les deux balles soient rapprochées à la distance d'un centimètre (1). La force qui s'exerce entre elles sera alors d'une dyne, et elle sera exactement équilibrée par la torsion du fil. La force exercée

(1) On suppose les diamètres des balles très petits par rapport à un centimètre.

par la torsion du fil dans cette position particulière du cercle est alors d'une dyne.

En répétant l'expérience avec des charges de 3, 4, 5, etc., unités, on obtiendra des lectures du cercle correspondant à des forces de  $1\frac{1}{3}$ , 2,  $2\frac{1}{2}$ , etc., dynes. On inscrira ces résultats sous forme de table, et des quantités inconnues d'électricité pourront alors être mesurées directement en unités C. G. S. avec cet instrument (1). Les méthodes de ce genre constituent ce qu'on appelle la détermination des constantes de l'instrument.

#### POTENTIEL.

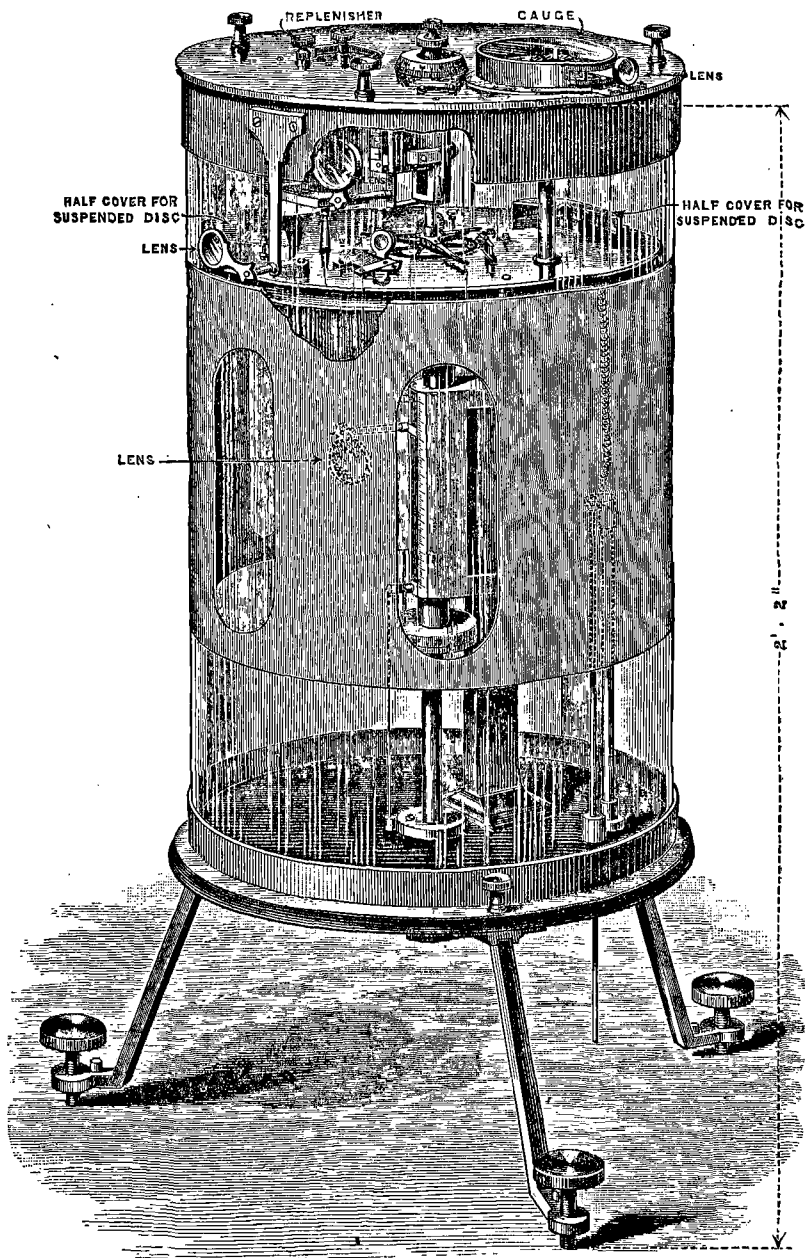
*Dans le système C. G. S., l'unité de potentiel est le potentiel produit par une unité d'électricité à une distance d'un centimètre.*

Nous avons défini la *différence* de potentiel entre deux points, résultant d'une électrisation donnée, comme le travail nécessaire pour faire mouvoir une unité d'électricité de l'un de ces points à l'autre.

*L'unité de différence de potentiel est la différence de potentiel qui doit exister entre deux points, pour que le déplacement d'une unité positive d'électricité de l'un des points à l'autre nécessite un travail d'un erg, en supposant que l'électricité influençante n'éprouve aucun changement dans sa distribution.*

(1) Il ne s'agit ici que d'une simple explication. En réalité, l'expérience ne serait pas exécutée tout à fait comme on vient de la décrire.





PL. IV. — Grand électromètre absolu de Thomson [1' pieds — " pouces].

Légende :

<p><i>Replenisher</i> = Rechargeur.  <i>Gauge</i> = Jauge.  <i>Lens</i> = Lentille.</p>	<p><i>Half Cover for suspended disc</i> = Moitié  du couvercle du disque suspendu.</p>
---	--

## CHAPITRE IX

### ÉLECTROMÈTRES ABSOLUS

Nous arrivons maintenant aux méthodes expérimentales de mesure des potentiels et des quantités d'électricité en unités absolues. Les instruments en usage sont appelés des électromètres absolus et sont tous de l'invention de Sir W. Thomson (1). On a construit divers modèles d'électromètres ; nous décrirons seulement les plus récents.

#### LE NOUVEL ÉLECTROMÈTRE ABSOLU (pl. IV)

L'électromètre absolu consiste essentiellement en deux plateaux horizontaux parallèles isolés l'un de l'autre.

Le plateau supérieur est percé en son milieu d'une ouverture circulaire, que remplit presque entièrement un léger disque suspendu à trois ressorts très doux, de la forme des ressorts de voiture. Au disque on a adapté, en la modifiant, la disposition à cheveu et à points de repère décrite à la page 66. Le réglage est tel, que lorsqu'on voit le cheveu entre les points du repère, le disque suspendu remplit presque exactement l'ouverture, en ce sens que la surface du plateau est continue, sauf un petit espace annulaire autour du bord du disque. Le plateau percé que l'on appelle « plateau de garde » est en communication métallique avec le disque par les supports de ce dernier.

(1) *Report on electrometers — Papers on Electrostatics and Magnetism*, page 287, Sir Wm. Thomson Macmillan, 1872.

Le disque suspendu peut être élevé ou abaissé en tournant sur une vis micrométrique qui déplace un écrou auquel sont fixés les ressorts.

Le plateau inférieur peut aussi être élevé ou abaissé par une vis micrométrique.

La manière la plus simple de se servir de l'instrument est la suivante :

La vis supérieure est réglée de façon que, aucune partie de l'appareil n'étant électrisée, le disque soit suspendu un peu au-dessus de la plaque de garde.

Les deux plateaux (le plateau inférieur d'une part, le plateau de garde et le disque de l'autre) ayant été électrisés en les mettant respectivement en communication avec les corps dont on veut mesurer la différence de potentiels, on déplace le plateau du bas jusqu'à ce que le cheveu apparaisse entre les repères. Cela veut dire qu'à la distance où sont actuellement les deux plateaux, l'attraction fait exactement équilibre à la force due, aux ressorts, qui tend à soulever le disque. La distance des plateaux, l'aire du disque suspendu, et la force qui tend à le soulever, étant connues, la différence de potentiel correspondante peut être calculée par une formule mathématique.

La force qui tend à soulever le disque se détermine par le poids qu'il faut mettre sur le disque pour amener le cheveu dans sa position de visée, lorsque aucune partie de l'appareil n'est électrisée.

Voici l'usage de l'anneau de garde : la formule ne s'applique qu'à la portion centrale d'une plaque attirée, elle ne s'applique pas aux parties voisines des bords. L'effet pratique de l'anneau de garde est de nous donner un disque suspendu dans lequel tout est partie centrale, et où il n'y a pas de bords. Car les bords étant ceux de la plaque de



garde fixe, l'attraction qu'ils subissent n'influence pas le mouvement du disque.

Au bout de quelque temps, Sir W. Thomson trouva préférable de remplacer cette méthode par une autre qui n'est pas tout à fait aussi simple. Dans cette nouvelle méthode, les deux plateaux sont isolés, et celui du haut chargé à un potentiel élevé et constant. Le plateau inférieur est relié alternativement à la terre et au corps dont on observe le potentiel. La différence des attractions dans les deux cas donne la différence des potentiels du corps et de la terre, c'est-à-dire le potentiel du corps.

Pour assurer la constance du potentiel du plateau supérieur, on le relie à un électromètre balance, ou jauge, indépendant, semblable à celui qui sert d'accessoire à l'électromètre à quadrants (fig. 15, p. 66). Il n'est pas nécessaire de connaître le potentiel auquel est chargé le plateau, il suffit de savoir que ce potentiel reste constant. L'électromètre accessoire, ou jauge, est appelé un *électromètre idiostatique*.

Pour se garantir des effets de déperdition, la cage de verre de l'instrument est revêtue de feuilles d'étain, et forme une bouteille de Leyde (ch. X), où est emmagasinée une grande quantité d'électricité. Des ouvertures ménagées dans les feuilles d'étain permettent de voir les organes intérieurs.

Le potentiel du plateau chargé se règle au moyen d'un rechargeur semblable à celui qui sert pour l'électromètre à quadrants (fig. 16, p. 68).

Le disque suspendu est garanti d'effets accidentels d'induction par un couvercle métallique, fait de deux pièces égales, que l'on voit écartées sur le côté de l'instrument.

Un boudin de fil, relié à une tige métallique que porte

un pied de verre et qui traverse le fond de l'instrument, permet d'établir les communications avec le plateau inférieur, tout en le laissant monter et descendre librement.

Deux ou trois verres, de la contenance d'un quart de litre, non figurés sur le dessin, sont placés dans l'intérieur de la cage; ils contiennent des fragments de ponce sulfurique, qui absorbe l'humidité et maintient l'air sec.

Tout l'instrument repose sur trois pieds assez hauts pour que l'on puisse aisément passer la main par-dessous et agir sur la vis du plateau inférieur.

L'instrument est conduit par White, de Glasgow.

#### DÉTERMINATION DES POTENTIELS PAR L'ÉLECTROMÈTRE ABSOLU

Il a été établi dans le mémoire de Sir W. Thomson, cité plus haut, et nous citerons le résultat, sans en donner la démonstration mathématique, que :

$$V = D \sqrt{\frac{8\pi F}{A}}$$

V est le potentiel du corps que l'on examine ;

D est la distance des plateaux ;

$\pi$  est le rapport de la circonférence au diamètre, c'est-à-dire 3,1416 ;

F est l'attraction électrique égale à l'effort ascendant des ressorts ;

A, une aire qui est la moyenne des surfaces du disque suspendu et de l'ouverture percée dans le plateau de garde.

Si, au lieu d'être équilibré par une attraction électrique, l'effort ascendant des ressorts égal à F, était équilibré par un poids que nous appellerons W, c'est-à-dire W grammes,

$W$  étant un nombre variable d'une expérience à l'autre, nous avons :

Force =  $W$  multiplié par la force de gravité au lieu où l'on opère,

ou, en symboles :

$$F = Wg,$$

et la formule devient :

$$V = D \sqrt{\frac{8\pi Wg}{\Lambda}}.$$

Rappelons qu'à Greenwich,  $g$  est égal à 981,17 dynes.

Dans la pratique, on a reconnu qu'il était difficile de déterminer exactement  $D$ , la distance du plateau inférieur au plateau supérieur. C'est pour cette raison et d'autres encore, que l'on a modifié la manœuvre de l'instrument, ainsi qu'il a été dit, page 89.

Soit  $D$  la distance, quand le plateau inférieur est relié à la terre ;  $D'$  la distance quand il est relié au corps à examiner ; soit  $V$  la *différence* de potentiel du plateau supérieur et du plateau inférieur, quand celui-ci est relié à la terre ;  $V'$ , cette différence quand le plateau inférieur est relié au corps à examiner.

Alors, le potentiel du plateau supérieur étant constant, la différence des potentiels du plateau inférieur, quand il est mis à la terre ou relié au corps électrisé, est

$$V - V' \quad (1).$$

(1) Car, soient  $A$  le potentiel du plateau supérieur,  $B$  et  $B'$  les potentiels du plateau inférieur dans les deux expériences :

$$V = A - B, \quad V' = A - B'$$

et  $V - V' = B' - B$ , différence qui est précisément le potentiel cherché.

La formule devient alors

$$V - V' = (D - D') \sqrt{\frac{8\pi W g'}{A}}$$

$V - V'$  est la différence des potentiels de la terre et du corps électrisé;  $D - D'$  est la *différence* des lectures de la vis du plateau inférieur, différence qui peut être appréciée avec une exactitude parfaite, sans que l'on connaisse effectivement les distances.

#### L'ÉLECTROMÈTRE PORTATIF (pl. V)

Sir W. Thomson a aussi inventé un *électromètre portatif*: son échelle est aussi graduée par des comparaisons électriques directes avec un électromètre absolu.

Les détails de l'instrument sont figurés sur la planche V.

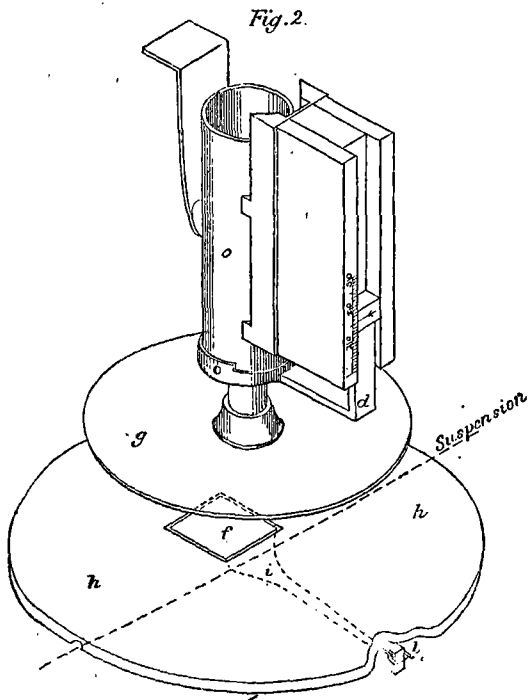
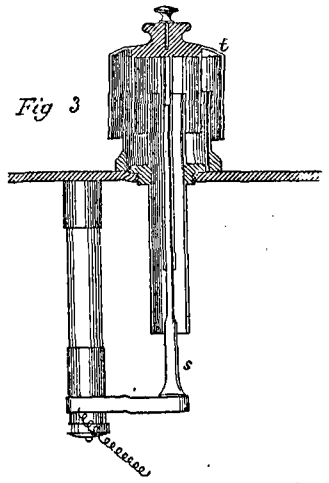
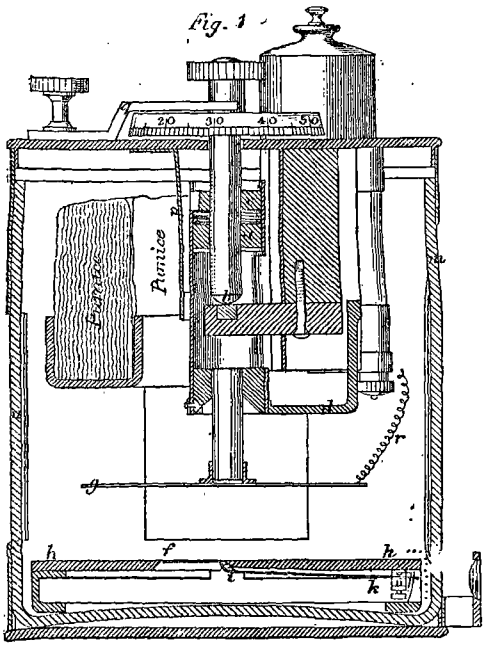
La disposition ressemble un peu à celle du nouvel électromètre absolu. Le « disque attiré » est carré, et avec son plateau de garde, il forme un ensemble (*h, f*, fig. 2) exactement semblable à la jauge de l'électromètre absolu ou de l'électromètre à quadrants.

Il est renversé, placé au fond de l'instrument, et attiré *vers le haut* par le plateau mobile (*g*, fig. 1). La cage forme une bouteille de Leyde, dont l'intérieur est relié à la jauge et au plateau de garde.

Pour employer l'instrument, on donne à la jauge et à la bouteille une charge élevée.

Le plateau mobile est relié à la terre, et l'on agit sur sa vis jusqu'à ce que la jauge soit en équilibre dans sa position de visée.

La lecture du plateau mobile ayant été prise, on le relie au corps dont on doit mesurer le potentiel, et on le fait mouvoir jusqu'à ce que l'équilibre soit de nouveau établi.



PL. V. — Élec tromètre portatif.  
 FIG. 1 et 3,  $\frac{2}{3}$  de grandeur naturelle.



La différence des deux lectures du plateau mobile donne la différence des potentiels de la terre et du corps, en unités de l'instrument, pourvu que le potentiel de la jauge et de la plaque de garde soit demeuré constant pendant toute la durée de l'expérience.

Pour s'en assurer, on prend une deuxième lecture, le plateau mis à la terre.

Si les deux lectures de terre diffèrent beaucoup, l'expérience doit être rejetée. Si elles concordent exactement, le potentiel est resté constant; si elles diffèrent un peu, leur moyenne ne s'écarte guère de ce qu'aurait été une lecture, le plateau mis à la terre, à l'instant où l'on opérerait sur le corps électrisé (1).

La valeur des unités arbitraires de l'instrument est déterminée, une fois pour toutes, en mesurant la même série de potentiels avec l'instrument et avec un électromètre absolu.

La disposition mécanique par laquelle on élève et abaisse le plateau est très ingénieuse : le plateau  $g$  est fixé à une tige de laiton circulaire verticale, qui est serrée par un ressort (fig. 2) contre deux V de laiton. On est ainsi assuré qu'elle se meut toujours parallèlement à elle-même.

Elle est élevée ou abaissée par une vis qui repose par sa tête convexe en acier ( $b$ , fig. 1) sur un plan d'agate. Sur la vis sont deux écrous ( $a$  et  $c$ , fig. 1), dont l'un est fixé au tube qui porte le plateau  $g$ , tandis que l'autre est seulement empêché de tourner à l'intérieur de ce tube. Les deux écrous sont maintenus écartés l'un de l'autre par un ressort à boudin. On empêche ainsi ce que l'on appelle en mécanique

(1) Cela suppose que la déperdition est uniforme, et qu'il s'est écoulé le même temps entre la première lecture, le plateau mis à la terre, et la lecture, le plateau mis au conducteur, qu'entre celle-ci et la seconde lecture, le plateau mis à la terre.

« l'inertie en arrière », ou « le temps perdu » ; en d'autres termes, on s'assure que le mouvement de rotation et le mouvement dans le sens vertical seront bien renversés simultanément.

On maintient la vis au contact de l'agate en pressant avec le doigt la tête filetée. Le nombre des tours entiers de la vis est lu sur l'échelle (fig. 2), les fractions de tours sur le tambour divisé fixé à la tête de la vis (fig. 1).

Les détails de la jauge sont montrés dans les figures 1 et 2. *hh* est le plateau de garde, *f* le disque équilibré, *ik* le levier, *l* la disposition à cheveu et repères. L'armature d'étain est enlevée pour qu'on puisse voir le cheveu, et est remplacée par un écran de fine toile métallique, pour se garantir des influences électriques.

Le *chapeau* (fig. 3) est destiné à garantir la tige qui communique au plateau *g* d'une induction accidentelle. On peut le faire glisser en haut ou en bas à volonté : quand il est abaissé, il établit la communication entre *g* et l'extérieur de la cage.

De la *pierre ponce* (*pumice*) imbibée d'acide sulfurique sert à maintenir l'air sec : elle doit être soigneusement desséchée dans une étuve une fois par mois.

L'instrument est surtout employé pour des observations d'électricité atmosphérique ; il ne se prête pas à un travail très précis (1).

#### BUT DE LA CHARGE DU DISQUE

Dans l'électromètre portatif et dans l'absolu, pour une

(1) Avec beaucoup de soin, on peut mesurer des potentiels égaux à un demi-Daniell ; avec une habitude et un soin ordinaires, des potentiels de deux à trois éléments. L'électromètre à quadrants mesure environ  $\frac{1}{70}$  d'élément, et peut être réglé de façon à mesurer  $\frac{1}{350}$ , et il faut 1100 éléments pour produire une étincelle de 0<sup>mm</sup>,095 de longueur.



différence de potentiel donnée, il faudrait toujours tourner de la même quantité la vis du plateau, lors même que le disque serait faiblement électrisé, ne le fût-il même pas du tout.

En lui donnant une charge élevée, la différence des attractions reste bien la même, mais les attractions totales sont plus grandes, et de petites irrégularités dans le jeu des ressorts ne causent pas d'aussi grosses erreurs.

## CHAPITRE X

### LA BOUTEILLE DE LEYDE

Nous avons montré que, si deux conducteurs ayant des charges de noms contraires, et séparés par un isolant, sont approchés l'un de l'autre, ils s'attirent.

Si nous réussissons à disposer deux conducteurs de grande surface à une très petite distance l'un de l'autre, en les séparant par une matière isolante rigide, nous aurons réuni toutes les conditions d'une attraction énergique.

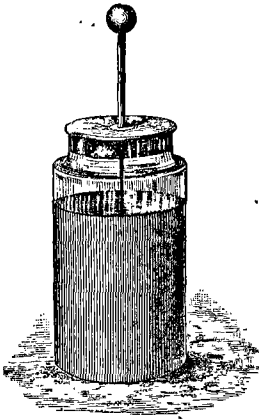


FIG. 20.

Ces conditions sont satisfaites dans la « bouteille de Leyde », qui, sous sa forme habituelle, consiste en une bouteille à large goulot, faite de verre blanc dur (fig. 20), et revêtue au dedans et au dehors de feuilles d'étain. Les feuilles d'étain s'arrêtent à quelques centimètres du goulot. La bouteille est fermée par un couvercle de bois dur, au centre duquel passe une tige de laiton terminée au sommet par une boule. Une chaîne est suspendue au bas de la tige et touche l'armature d'étain intérieure.

L'armature intérieure peut être chargée d'électricité positive, en approchant la boule d'une machine électrique à

plateau de verre, que l'on fait agir jusqu'à ce que des étincelles frappent la boule. Quand les étincelles ne veulent plus jaillir, cela veut dire que l'armature intérieure est chargée à peu près au même potentiel que le conducteur de la machine. Cette charge agit (+) par induction à travers le verre, et induit une charge (—) sur la face interne<sup>1</sup> de l'armature extérieure, une charge (+) sur la face externe.

Si le conducteur extérieur est relié à la terre, celle de ses faces qui est la plus éloignée du conducteur intérieur peut être regardée comme reculée à une distance infinie, et il ne reste sur l'armature extérieure que de l'électricité (—).

Comme l'armature extérieure entoure complètement l'armature intérieure, la charge (—) induite est égale à la charge inductrice (+).

Nous avons ainsi deux charges d'électricité opposées distribuées sur de grandes surfaces et séparées seulement par l'épaisseur du verre. Ces deux charges s'attirent énergiquement, et dès qu'on leur ouvre un passage par où elles puissent se réunir, elles se recombinent avec une grande violence.

*Expérience.* — Prenons une jarre chargée et un « excitateur » formé d'un conducteur à charnière porté par un ou deux manches isolants. Touchons l'armature extérieure de la jarre avec un des bouts de l'excitateur, et approchons l'autre de la boule. Deux tensions (strains) sont mises en jeu : l'une, celle du verre, est constante ; l'autre, celle de l'air entre la boule et l'excitateur, croît à mesure qu'on les rapproche. D'autre part, l'épaisseur de la couche d'air comprise entre les boules diminuant, sa résistance mécanique, c'est-à-dire son pouvoir de s'opposer à la décharge disruptive, diminue. A la fin, on arrive à un point où l'air ne peut plus résister

à l'effort de tension (stress), et les électricités se précipitent au travers et se recombinent avec une étincelle bruyante. On trouve qu'immédiatement après la bouteille est complètement déchargée.

#### CHARGE RÉSIDUELLE

Si, après la décharge, on abandonne la jarre quelque temps à elle-même, on trouve qu'elle a repris une faible charge. Cette seconde charge est appelée « charge résiduelle ». Avec une bouteille de deux litres et quart, elle est généralement assez forte pour produire une étincelle visible en plein jour.

Les phénomènes de charge résiduelle ne peuvent s'expliquer qu'en supposant que l'induction qui se propage à travers le verre consiste en un état de déformation (strain) des molécules du verre. Dans cette hypothèse, nous admettons que le verre de la bouteille chargée subit une déformation considérable, mais qu'il n'est pas parfaitement élastique. Après la décharge des armatures, c'est-à-dire après que la force de déformation a été supprimée, les particules de verre reviennent aussitôt en arrière, mais sans atteindre *tout à fait* la position normale qu'elles occupent quand elles ne sont point déformées. Pour un instant, les armatures sont déchargées, mais le verre est encore dans un état de déformation légère. Il perd petit à petit cette déformation résiduelle au bout de quelques minutes.

Ainsi, tant que l'armature intérieure est restée isolée, un changement s'est produit dans l'arrangement électrique des molécules de verre voisines. *L'état de déformation s'est modifié.*

Dans les phénomènes d'induction ordinaires, l'effet d'un changement dans l'état de déformation d'un isolant (par

l'approche d'un conducteur chargé) est d'induire une charge sur tout conducteur contigu.

Dans le cas présent, la charge résiduelle est produite par le passage d'un état de déformation à un état de déformation moindre, changement qui se produit dans le verre en raison de son élasticité.

#### COMPARAISON MÉCANIQUE

L'exemple mécanique suivant va nous aider à mieux voir ce qui se passe :

*Expérience* : Prenons une bande de gutta-percha de 0<sup>m</sup>,15 de long sur 0<sup>m</sup>,05 de large et 0<sup>m</sup>,003 d'épaisseur; fixons-la par le bas à une table, ou dans un étau, de façon qu'elle se tienne verticale. Pressons ensuite l'extrémité supérieure avec le doigt de façon à courber la lame.

La gutta-percha représente le verre de la bouteille; et la pression du doigt, la force électrique qui produit la déformation.

Lâchons subitement la gutta-percha; en d'autres termes, déchargeons la bouteille: elle se précipite vers une position qui est presque verticale, *mais pas tout à fait*, et s'y arrête un instant. Si on la touche du doigt, on ne sent pas de pression pendant une seconde ou deux.

Cela représente le moment où la bouteille est complètement déchargée. Quelques secondes plus tard, la gutta-percha presse de nouveau contre le doigt, et, si on l'abandonne à elle-même, vient reprendre sa position verticale, c'est-à-dire que la réapparition de la déformation résiduelle développe une charge ou une pression résiduelle.

#### EFFET DES CHOCS

Une autre preuve que les phénomènes de la bouteille

de Leyde sont dus à une déformation, résulte de ce fait que toute agitation mécanique des molécules de verre, qui leur permet de se mouvoir plus aisément les unes sur les autres, hâte l'apparition de la charge résiduelle.

L'expérience suivante a été décrite en 1876 par le docteur John Hopkinson (*Phil. Trans.*, 1876, page 489), et a été heureusement répétée par l'auteur devant un nombreux auditoire, le 23 janvier 1879, à l'Institution Royale.

*Expérience* : Une bouteille de verre, d'environ 7<sup>cm</sup>,5 de hauteur, sert à faire une petite bouteille de Leyde : elle n'est pas recouverte d'armature d'étain.

Les conducteurs sont formés par de l'acide sulfurique concentré : la bouteille en est à moitié remplie, ce qui constitue l'armature intérieure, et on la met dans un vase plat de verre contenant de l'acide, qui forme le conducteur extérieur. On isole le vase de verre en le plaçant sur une plaque de caoutchouc.

Les communications avec la bouteille sont établies par des fils de platine plongeant dans l'acide.

Pour charger la bouteille, on relie à la terre l'acide du vase extérieur, au moyen d'un fil de platine attaché à la conduite d'eau la plus proche, et l'acide de la bouteille à une machine électrique à frottement — un plateau de 38 centimètres de diamètre est d'une grandeur convenable. On charge la bouteille en actionnant la machine pendant deux ou trois minutes, puis on l'isole. Alors on la décharge au moyen d'un fil de platine courbé en  $\Omega$  et fixé à un manche isolant. On maintient les acides en communication pendant 10 ou 20 secondes.

La communication ayant été rompue, l'intérieur et l'ex-

térieur sont reliés par des fils de platine aux quadrants d'un électromètre d'Elliott.

L'apparition de la charge résiduelle détermine un mouvement lent et régulier de l'image lumineuse. Si ce mouvement est trop rapide, il faut serrer entre les doigts les deux fils pendant dix ou quinze secondes, l'un contre l'autre, de façon à décharger plus complètement la bouteille; et on répète cette opération jusqu'à ce que l'on ait atteint une vitesse convenable.

Aussitôt qu'il en est ainsi, on frappe doucement le bord de la bouteille avec un morceau de bois dur (le manche d'un petit marteau, par exemple). *Immédiatement la vitesse avec laquelle se déplace l'image lumineuse est triplée.*

Cela prouve que la charge résiduelle fait son apparition trois fois plus vite que si on ne touchait pas à la bouteille.

Cette expérience s'explique très bien si l'on suppose que l'induction est un état de déformation de l'isolant; nous savons en effet que si un corps imparfaitement élastique est déformé et reprend lentement sa forme normale en vertu de son élasticité, tout choc ou toute vibration, en permettant aux molécules de glisser plus librement les unes sur les autres, accélère beaucoup ce retour à l'état normal.

Si l'on veut montrer cette expérience à un auditoire, il faut substituer à la lampe et à l'échelle ordinaires une lampe Drummond et une échelle d'environ 2<sup>m</sup>,40 de long, éloignée de 3<sup>m</sup>,60 de l'électromètre. Dans ces conditions et avec une lentille convenable, on voit sur l'échelle un disque lumineux brillant d'environ 5 centimètres de diamètre, qui, lorsqu'on ne touche pas à la bouteille, doit marcher d'environ 7,5 centimètres par seconde.

Si on désire répéter l'expérience, on peut décharger

l'électromètre et ramener l'image au zéro en mettant un instant au contact les fils de platine.

Pour amortir les oscillations de l'aiguille de l'électromètre, on ajoute au fil qui la fait communiquer à l'acide un morceau d'une mince feuille de platine, d'environ 1,25 centimètre de long sur 0,625 centimètre de haut, qui est suspendu au bas du fil, au-dessous du niveau du liquide (1).


#### SUPERPOSITION DE DIFFÉRENTES CHARGES


Dans le même mémoire, le docteur Hopkinson a montré que si une bouteille est chargée alternativement d'électricité  $+$  et  $-$ , à diverses reprises, la charge résiduelle est d'abord  $-$  et devient ensuite  $+$ , ce qui prouve, comme il le dit, que « les charges sortent dans un ordre inverse de celui dans lequel elles sont entrées ».

L'expérience réussit, lors même que la charge a été renversée trois ou quatre fois.

L'importance de ce résultat est dans ce fait, qu'il serait impossible de concevoir des « actions à distance » alternatives qui demeurent superposées l'une à l'autre dans le verre; au lieu que l'on comprend très bien que des déformations alternatives des particules soient ainsi superposées.

(1) Voici une manière commode de l'attacher. Le platine est découpé suivant

la forme  et l'extrémité inférieure du fil est recourbée en crochet

de la forme  L'extrémité a du platine est recourbée et suspendue au crochet.



## ANALOGIE MÉCANIQUE

Le 4 octobre 1878, le docteur Hopkinson présentait à la Société Royale (1) un mémoire « sur la déformation torsionnelle qui subsiste dans un fil de verre après que la force de torsion a cessé d'agir ». Dans ce mémoire, il vérifie par expérience une hypothèse faite précédemment par Boltzmann, à savoir que le principe de superposition, dont nous venons de parler, s'applique aux déformations mécaniques produites dans le fil de verre par la torsion. Dans ses expériences, le docteur Hopkinson a reconnu l'exactitude de cette supposition : si diverses forces de torsion agissent sur un fil, l'effet de chacune individuellement s'emmagasine dans le fil, et peut y être retrouvé à son tour, après qu'a cessé d'agir la dernière des forces de torsion.

Ainsi, une analogie complète s'établit entre la torsion d'un fil de verre et les phénomènes de charge résiduelle ; et nous ne pouvons douter que les effets électriques ne soient dus à des déformations mécaniques de l'isolant.

## EFFET DE LA TEMPÉRATURE

Le docteur Hopkinson (2) a montré, en 1877, que tous les phénomènes des bouteilles de Leyde subissent l'influence des changements de température.

C'est là une autre preuve que ces effets sont dus à une déformation du verre, car la dureté et les autres propriétés mécaniques du verre sont toutes affectées par la température ; mais nous ne pouvons concevoir que la température du verre puisse influencer sur une « action directe à distance » s'exerçant à travers le verre en question.

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. XXVIII, 1878, page 148.

(2) *Phil. Trans.* de 1877, vol. CLXVII.

ANALOGIE ENTRE LA BOUTEILLE DE LEYDE ET UNE TIGE  
DÉFORMÉE

M. Ayrton m'a communiqué les résultats (encore inédits) (1) d'une étude expérimentale dans laquelle M. Perry et lui ont comparé la déformation mécanique des tiges avec l'absorption et la réapparition de l'électricité dans des bouteilles de Leyde parfaitement isolées, chaque expérience durant plusieurs jours. Ils ont trouvé que les courbes qui représentent la marche du retour de l'état de déformation à l'état normal sont exactement les mêmes dans le cas mécanique et dans le cas électrique.

AUTRES CONDENSATEURS

Une bouteille de Leyde est quelquefois appelée un *condensateur*, parce que l'on a supposé primitivement que l'énergie des effets observés était due à la condensation d'un fluide ou de fluides électriques.

Outre la bouteille de Leyde que nous avons décrite, on fait des condensateurs de beaucoup d'autres formes. Ils consistent quelquefois en feuilles plates d'un isolant dont les deux faces sont revêtues de feuilles d'étain. On fait les feuilles d'étain un peu plus petites que celles de l'isolant pour les bien séparer. Les feuilles d'étain agissent comme les armatures intérieure et extérieure d'une bouteille de Leyde.

Quelquefois on forme un condensateur à grande surface en faisant alterner un grand nombre de feuilles d'isolant et d'étain. Dans ce cas, les feuilles d'étain de rang 1, 3, 5...<sub>2</sub> sont reliées ensemble et correspondent à une des arma-

(1) Janvier 1880.

tures ; les feuilles de rang 2, 4, 6..., sont également réunies ensemble et correspondent à l'autre armature. L'isolant, dans ces grands condensateurs, est tantôt du mica, tantôt du papier que l'on a plongé dans de la paraffine en fusion.

Le grand condensateur de MM. Clark et Muirhead, qui a été construit pour « mettre en duplex » le câble direct des États-Unis, contient environ 9 000 mètres carrés de feuilles d'étain, et remplit 70 boîtes ayant chacune 0<sup>m</sup>,60 sur 0<sup>m</sup>,45 et 0<sup>m</sup>,175 d'épaisseur.

#### CAPACITÉ

La capacité d'un condensateur a pour mesure la quantité d'électricité à l'unité de potentiel qu'il peut contenir ; en d'autres termes, elle est égale au quotient de la charge par le potentiel.

On trouve que, dans de certaines limites, elle diminue à mesure que l'épaisseur de l'isolant augmente.

Quand une sphère métallique est suspendue au centre d'une salle, elle forme l'armature intérieure d'un condensateur dont l'air est l'isolant, et dont les murs, le plancher et le plafond sont l'armature extérieure reliée à la terre.

Si la salle est très grande, l'isolant peut être regardé comme assez épais pour que des variations dans son épaisseur n'influent pas sur sa capacité.

La capacité ne dépend alors que de la dimension de la sphère, et augmente si le rayon de la sphère grandit.

On peut démontrer mathématiquement que la capacité d'une telle sphère est proportionnelle à son rayon ; et les unités ont été choisies de façon que *la capacité d'un conducteur sphérique isolé est numériquement égale à son rayon.*

## UNITÉS C. G. S.

L'unité C. G. S. de capacité (en mesure électro-statique) est la capacité d'un conducteur sphérique isolé d'un centimètre de rayon.

## CAPACITÉ DE DEUX SPHÈRES CONCENTRIQUES

On peut démontrer mathématiquement que la capacité d'un condensateur formé de deux sphères concentriques (1) est égale au produit de leurs rayons divisé par l'épaisseur de la couche d'air qui les sépare; si donc  $r$  et  $r'$  sont les rayons respectifs des sphères intérieure et extérieure,

$$\text{Capacité} = \frac{r r'}{r' - r}.$$

(1) La sphère intérieure étant chargée et la sphère extérieure mise à la terre.

## CHAPITRE XI

### CAPACITÉ INDUCTIVE SPÉCIFIQUE

---

#### INTRODUCTION

Si l'induction électrique était « une action directe à distance », il faudrait s'attendre à ce qu'elle se transmette également à travers tous les isolants. Un des arguments les plus puissants en faveur de l'hypothèse qu'elle est une déformation des molécules de l'isolant, résulte de ce fait que les divers isolants la transmettent avec des énergies très différentes.

Nous avons défini la capacité d'un condensateur comme la quantité d'électricité à l'unité de potentiel qu'il peut contenir.

Cette quantité dépend :

1° Des dimensions des plaques conductrices; car un grand plateau tient plus d'électricité qu'un petit;

2° De l'énergie de l'action inductive entre chaque centimètre carré des surfaces opposées.

Cette dernière quantité dépend de deux choses :

1° De l'épaisseur de l'isolant : plus les conducteurs seront rapprochés, plus l'action inductive qui s'exerce entre eux sera énergique.

2° *Du pouvoir spécifique que possède la substance, dont l'isolant est composé pour recevoir et transmettre la déformation électrique que nous appelons induction.*

*Ce pouvoir est appelé la capacité inductive spécifique de la substance.*

La capacité inductive spécifique de l'air sec, à la pression et à la température ordinaires, a été prise pour étalon, et sert d'unité : on lui compare les capacités des autres substances.

*Définition.* — Soient deux condensateurs : l'un (a), ayant de l'air comme isolant ; l'autre (b), ayant une autre substance ; supposons ces deux condensateurs exactement identiques à tous autres égards : le rapport de la capacité de (b) à celle de (a) est appelé la capacité inductive spécifique de la substance qui forme l'isolant de (b).

Nous voyons que la capacité inductive spécifique d'une substance est une quantité qui exprime le rapport des pouvoirs que possèdent cette substance et l'air pour transmettre l'induction électrique.

Dans les déterminations de capacité inductive spécifique, il n'est pas toujours nécessaire de faire les deux condensateurs identiquement semblables. Lorsque l'on connaît la forme et les dimensions du condensateur à air, nous pouvons calculer, au moyen d'expériences faites sur lui, ce que serait la capacité d'un condensateur à air identique au condensateur que l'on examine.

*Définition.* — Les substances isolantes à travers lesquelles se produit l'action électrique, telles que les isolants des condensateurs, sont appelées des « diélectriques », du grec *διὰ*, à travers.

La détermination des capacités inductives spécifiques des différents diélectriques est une des branches les plus importantes des recherches électriques.

Elle est d'une grande importance commerciale, car, en télégraphie sous-marine, le nombre de mots que l'on

peut transmettre par minute à travers un câble, c'est-à-dire le revenu brut de la compagnie, dépend, dans une large mesure, de la faible capacité inductive spécifique de la matière isolante du câble.

Pour choisir entre différents isolants, il est donc nécessaire d'avoir une connaissance exacte de leurs capacités.

Dans l'étude théorique de l'électricité, cette question est encore plus importante : comme nous le montrerons dans la IV<sup>e</sup> partie de ce livre, la théorie qui nous donne actuellement l'espoir le mieux fondé de connaître quelque jour ce que c'est exactement que l'électricité, cette théorie exige certains rapports entre les capacités inductives spécifiques et les indices de réfraction des diélectriques transparents. Ce n'est que par des déterminations exactes des capacités inductives spécifiques que l'on pourra vérifier expérimentalement cette théorie.

Nous donnerons donc un exposé complet de toutes les déterminations de capacité inductive spécifique qui ont été faites jusqu'à ce jour (1).

Nous devons prévenir que ces expériences sont de nature très difficile et très compliquée, et qu'il y a des écarts considérables entre les nombres obtenus pour une même substance par divers observateurs.

On ne se rend pas bien compte de la raison de ces différences, quoiqu'on ait reconnu et éliminé depuis peu de nombreuses causes d'erreurs; mais nous ne pouvons encore dire avec certitude si la capacité inductive spécifique vraie d'une substance dépend de l'énergie de l'électrification, de la durée de la charge, ou encore des changements

(1) Janvier 1880.

moléculaires spontanés qui se produisent, d'un mois à l'autre, dans le diélectrique même.

Néanmoins ce n'est que par une étude attentive de ce qui a été fait, que nous pouvons espérer de mettre quelque ordre dans la confusion où nous ont laissés les expériences antérieures.

#### EXPÉRIENCES DE CAVENDISH (1)

Entre 1771 et 1781, Cavendish mesura la capacité de différents condensateurs, en les comparant à certains condensateurs étalons qu'il appelle « *plateaux d'épreuve* ».

Les capacités de ces plateaux d'épreuves étaient elles-mêmes déterminées en mesure absolue, par comparaison avec un globe de 31,25 centimètres de diamètre (12,5 pouces) suspendu au milieu de son laboratoire.

Un condensateur à air fut construit avec deux plateaux de laiton, de 20 centimètres de diamètre (8 pouces), parallèles entre eux, séparés uniquement par une couche d'air qui varia dans les diverses expériences de 22,75 millimètres à 6,475 millimètres (de 0,910 à 0,259 de pouce).

De ces expériences, Cavendish a déduit par le calcul le rapport des capacités du verre et des autres substances à celle de l'air, c'est-à-dire ce que nous appelons leur capacité inductive spécifique.

En comparant les capacités de deux condensateurs, nous devons rappeler que si nous les relient à une même source d'électricité, les chargés qu'ils prendront seront proportionnelles à leurs capacités; par suite, pour connaître le

(1) Voy. *The Electrical Researches of the Hon. Henry Cavendish, F. R. S.*, écrit entre 1771-1781, publié par J. Clerk Maxwell, F. R. S. Cambridge, Univ. Press, 1870. Pages 144-188.



rapport de leurs capacités, il suffit de mesurer le rapport de leurs charges.

La première partie des expériences de Cavendish consistait à comparer les capacités de ses condensateurs, et celles des divers « plateaux d'épreuve » qu'il avait construits comme étalons arbitraires.

Ses condensateurs consistaient en plateaux de verre, de gomme laque et de cire d'abeilles, sur les faces desquels étaient collés des disques circulaires de feuilles d'étain.

Les plateaux d'épreuve étaient en verre avec des disques en feuilles d'étain. Il y en avait une série de dix, de dimensions convenables pour donner des « charges étalonnées », c'est-à-dire de capacités différentes.

En prenant pour unité la capacité du plus petit, il y avait dans la série :

3	plateaux de capacité	1
3	—	3
3	—	9
1	—	27

En combinant convenablement ces dix plateaux, on pouvait construire un condensateur de capacité quelconque comprise entre 1 et 40.

Un de ces plateaux d'épreuve était muni d'un conducteur susceptible de glisser, afin de faire varier légèrement la capacité et réaliser un réglage délicat.

Ce conducteur consistait en un plateau de laiton qui pouvait, ou bien être entièrement placé sur la feuille d'étain, ou bien être déplacé de façon à dépasser un peu le bord de la feuille d'étain et à recouvrir une plus grande surface de verre.

La méthode de comparaison était une « méthode de  
CORDON. Électricité.

I. — 8

réduction à zéro » ; au lieu de mesurer la différence entre les condensateurs et les plateaux d'épreuve, on

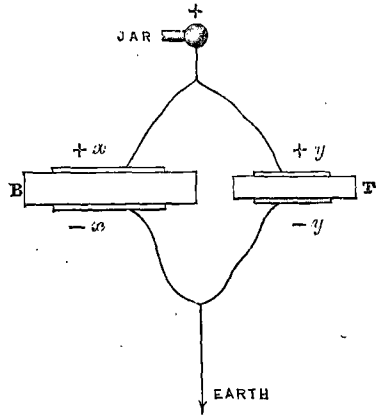


Fig. 21. — Jar = Bouteille. Earth = Terre.

réglait ces derniers jusqu'à ce qu'ils fussent exactement équivalents aux condensateurs, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'il n'y eût plus aucune *différence*.

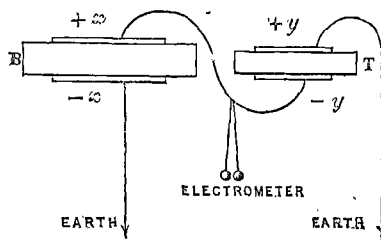


Fig. 22. — Earth = Terre.

Voici la méthode que l'on employait pour régler l'égalité des plateaux d'épreuve et des condensateurs en expérience :

Sur la figure 21, soient B le condensateur et T le plateau

d'épreuve. Une armature de chacun d'eux est reliée à la terre ; les autres armatures sont réunies ensemble au bouton d'une bouteille de Leyde chargée.

Étant reliés à la même bouteille, les deux condensateurs se chargent au même potentiel, et, par suite, les charges  $x$  et  $y$  de chacun sont proportionnelles à leurs capacités.

Après deux secondes environ de charge, on change les communications, et on établit celles de la figure 22 au moyen d'une disposition mécanique convenable, consistant en un système de cordons et de fils métalliques montés sur un châssis de bois.

On voit que cela revient à envoyer à la terre les charges  $+y$  et  $-x$ , et à combiner les charges  $+x$  et  $-y$ . Un électromètre à balles de sureau (p. 46) est attaché au fil de communication.

Si les capacités de B et T sont égales, nous aurons des charges égales, c'est-à-dire  $x = y$  et  $(+x) + (-y) = 0$ , la somme algébrique de charges égales et opposées est nulle, et les balles de sureau ne divergent pas.

Si les balles de sureau divergent et sont chargées d'électricité (+), cela montre que la capacité de B est la plus grande, et qu'il faut augmenter celle de T. Si elles sont chargées d'électricité (-), cela montre que la capacité de T est la plus grande et qu'il faut la diminuer.

Dans la pratique, on a trouvé préférable d'avoir deux plateaux d'épreuve T et T', et par des expériences distinctes de donner à T une capacité un petit peu inférieure, et à T' une capacité un peu supérieure à la capacité de B. On prenait pour capacité de B la moyenne des capacités de T et de T'. La raison en est que l'électromètre est plus sensible quand les balles divergent légèrement que lorsqu'elles retombent tout à fait.

## COMPARAISON DU PLATEAU D'ÉPREUVE ET DE LA SPHÈRE

La comparaison du plateau d'épreuve et de la sphère se faisait exactement de la même manière. La sphère A (fig. 23 et 24) remplaçait l'armature supérieure du conden-

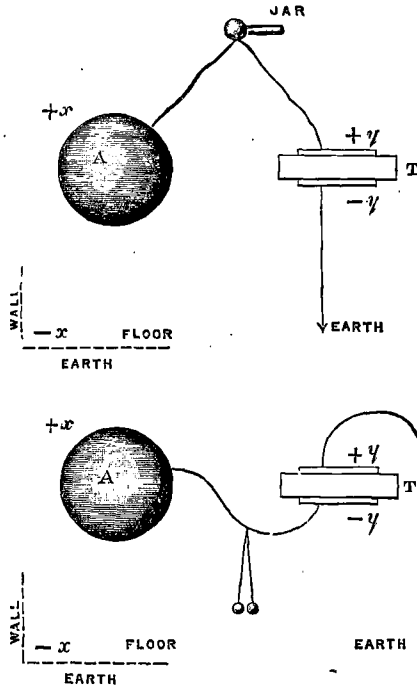


Fig. 23 et 24. — Jar = Bouteille. Wall = Mur. Floor = Plancher. Earth = Terre.

sateur B; les murs et le sol de la salle, que l'on peut toujours regarder comme reliés à la terre, remplaçaient l'armature inférieure. La disposition pour la charge est celle de la figure 23, les charges  $+x$  et  $-y$  étaient recombinaées en établissant les communications comme dans la figure 24.

Le lecteur pourra comparer ces figures aux figures 21 et 22.

#### DIFFUSION DE L'ÉLECTRICITÉ PAR LES BORDS

On a éprouvé quelque difficulté à déterminer le diamètre des surfaces chargées : on a reconnu en effet que l'électricité se *répand* un peu autour des bords des feuilles d'étain, en sorte que, dans les calculs, il est nécessaire de supposer, ces feuilles un peu plus grandes qu'elles ne le sont en réalité.

La valeur de la correction à appliquer se déterminait en comparant des disques d'étain pleins avec d'autres où l'on avait découpé de nombreuses ouvertures. On donnait la même surface aux disques « pleins » et à ceux qui étaient « découpés » ; mais ceux-ci présentaient naturellement une bien plus grande longueur de bords. Le rapport des capacités du condensateur « découpé » et du condensateur « plein » donnait le rapport des aires des surfaces chargées, c'est-à-dire le rapport de l'aire de la feuille d'étain découpée et de l'espace électrisé autour de ses bords, à celle de la feuille pleine et de l'espace électrisé sur son pourtour.

Au moyen de ces données on pouvait calculer l'aire de la surface effectivement électrisée (1).

Cavendish a trouvé que l'effet de la diffusion instantanée de l'électricité est à peu près le même que si les feuilles d'étain avaient été étendues de  $1^{\text{mm}},75$  ( $\frac{7}{100}$  de pouce)

(1) Soient A l'aire de chaque feuille d'étain,

$a$  l'espace électrisé autour de celle qui est pleine,

$b$  — — — — — qui est découpée,

M le rapport des charges,

N le rapport de  $a$  à  $b$ , c'est-à-dire le rapport des longueurs des bords. A, M, N sont connus par expérience; il faut trouver  $a$ . Nous

dans tous les sens, quand l'épaisseur du verre était de 5 millimètres environ ( $\frac{1}{3}$  de pouce), et de 2,25 millimètres ( $\frac{9}{100}$  de pouce), pour une épaisseur de 1<sup>mm</sup>,7 ( $\frac{1}{15}$  de pouce).

#### LES EXPÉRIENCES

Au moyen d'une formule mathématique (1), Cavendish calcula quel aurait du être le rapport des charges des condensateurs et de la sphère, si l'air avait été substitué au verre comme diélectrique. Ensuite il compara expérimentalement les charges.

Le rapport de la « charge observée » à la « charge calculée » est, si la formule est exacte, le rapport des capacités du verre et de l'air, c'est-à-dire la capacité inductive spécifique du verre.

Pour vérifier la formule, la sphère fut comparée à un  
avons :

$$M = \frac{A+a}{A+b} \quad \text{ou} \quad M(A+b) = (A+a),$$

ou

$$(M-1)A = a - Mb,$$

mais  $b = \frac{a}{N}$  : en substituant, nous avons :

$$(M-1)A = a \left(1 - \frac{M}{N}\right)$$

ou

$$a = \frac{(M-1)A}{1 - \frac{M}{N}}.$$

(1) Suivant la théorie, la capacité d'un condensateur à air, formé de plateaux circulaires parallèles de diamètres égaux, est égale à celle d'une sphère isolée dont le diamètre est égal au carré du rayon des plateaux divisé par le double de leur distance.

En langage moderne, la capacité d'une sphère isolée est égale à son rayon ; et celle d'un condensateur à plateaux où  $r$  est le rayon moyen des plateaux, et  $a$  leur distance, est égale à une sphère de rayon  $x$ , où

$$x = \frac{r^2}{4a}.$$

« condensateur à air » formé de deux plateaux de laiton fixes et parallèles, séparés seulement par de l'air. On trouva que la charge du condensateur était de  $\frac{1}{10}$  environ plus forte que ne l'indiquait la formule. Cette différence était due sans doute à l'action des murs, etc., de la salle. La théorie suppose une salle de dimensions infinies : le laboratoire n'avait que 4<sup>m</sup>,80 de côté.

Dans les tables suivantes, la « charge calculée » a été calculée, si j'ai bien compris le mémoire, dans l'hypothèse qu'il n'existe pas de différence de cette nature. L'excès de la charge observée sur la charge calculée est dû, je crois, en partie à la différence de capacité inductive spécifique entre le verre et l'air, en partie à la différence de forme des condensateurs. Le rapport de la charge observée à la charge calculée est la proportion dans laquelle la capacité aurait été accrue par la substitution du verre à l'air, et par la substitution d'un condensateur plan à un condensateur sphérique.

Si ma façon d'interpréter le mémoire est exacte, la charge observée divisée par la charge calculée donne la capacité inductive spécifique du verre, *celle de l'air étant prise égale à 1,1*.

Pour avoir la capacité inductive spécifique vraie du verre, c'est-à-dire la capacité du verre quand celle de l'air est prise pour unité, il faut diminuer les nombres dans le rapport de 11 à 10, et poser :

$$\text{Capacité inductive spécifique} = \frac{10 \text{ charge observée}}{11 \text{ charge calculée}}$$

Voici les résultats des expériences de Cavendish sur des plateaux de verre, de gomme laque et de cire d'abeilles, d'après l'édition du professeur Maxwell : j'ai ajouté une colonne où est faite la correction ci-dessus.

TABLE DES PLATEAUX DE VERRE

Diélectrique.	Épaisseur.	Diamètre.	Id. corrigé.	Densité.	Charge calculée.	Charge observée.	Quotient de la charge observée par la charge calculée.	$\frac{10}{11}$ de la colonne précédente = capacité inductive spécifique.
	pouces.	pouc.	pouc.					
Flint taillé plat.....	0 2115	2 23	2 37	3 270	3 32	26 3	7 03	7 21
Id. morceau plus mince	0 404	2 215	2 385	3 284	6 81	52 3	7 65	6 95
Plateau D.....	0 127	3 85	3 02	3 752	8 93	71 9	8 01	7 28
— W.....	0 172	3 435	3 585	3 787	9 34	74 9	8 01	7 28
— G.....	0 4848	3 575	3 725	3 973	9 38	75 5	8 05	7 32
— N.....	0 106	2 12	2 29	2 082	6 48	51 4	8 31	7 55
— O.....	0 106	2 505	2 675	2 514	8 44	75	8 80	8 08
— Q.....	0 076	2 065	2 245	2 504	8 20	76 5	9 23	8 30
Crown Glass.....	0 0682	3 495	3 675	2 537	24 76	211 3	8 54	7 76
Id. un autre morceau.	0 0650	3 43	3 61	2 532	24 72	208 7	8 41	7 67
Crown taillé.....	0 07	2 035	2 215	2 535	8 76	76 5	8 73	7 93
Fragment du même..	0 0693	3 54	3 72	2 535	24 00	215 1	8 62	7 83
Moyenne des 10 échantillons employés dans les expériences précédentes.....				2 678	»	»	8 22	7 47

PLATEAUX D'AUTRES SUBSTANCES

Diélectrique.	Épaisseur.	Diamètre.	Charge calculée.	Charge observée.	Quotient de la charge observée par la charge calculée.	$\frac{10}{11}$ de la colonne précédente ou capacité inductive spécifique.
	pouces.	pouces.				
Gomme laque.....	0 125	4 23	17 80	80	4 47	4 00
Mélange de résine et de cire d'abeilles. Plateaux.	1 0 4845	3 75	3 63	13 5	3 72	3 38
	2 0 192	3 355	7 22	25 2	3 40	3 17
	3 0 403	4 247	21 89	69	3 15	2 86
Cire d'abeilles déphlegmée. Plateaux.....	4 0 403	4 525	24 85	78 0	3 18	2 89
	5 0 403	4 70	3 89	13	3 34	3 03
Cire d'abeilles déphlegmée. Plateaux.....	1 0 303	3 78	5 90	24 5	4 16	3 78
	2 0 420	3 525	12 05	46 1	3 56	3 23
	3 0 063	2 74	44 00	50 5	3 39	3 08
Cire d'abeilles ordinaire.	0 119	3 475	12 69	51 3	4 04	3 67

Les armatures de toutes ces lames étaient circulaires. Dans le calcul de la charge sur les plateaux de verre, le diamètre de l'armature était corrigé de la diffusion de l'électricité, comme dans la quatrième colonne. On supposait que l'électricité s'étend sur 0,07 de pouce si l'épaisseur est de



0,21 de pouce, et de 0,09 si l'épaisseur est de 0,08; et proportionnellement pour les autres épaisseurs. On ne faisait pas de correction dans le calcul des charges sur les autres lames, l'observateur n'étant pas certain de la valeur qu'il convenait de lui attribuer.

Cavendish donne les détails suivants sur le procédé qu'il employait pour faire les plateaux de résine, de gomme laque et de cire : « Je coule d'abord un gâteau rond et plat de la substance, d'une épaisseur trois ou quatre fois plus grande que celle que je veux avoir, et plus mince vers les bords qu'au milieu : en le coulant, je m'efforce d'éviter les bulles d'air autant que possible.

» Je le chauffe ensuite jusqu'à ramollissement entre deux épaisses plaques de cuivre, et je le comprime à l'épaisseur voulue, en serrant les plaques les unes contre les autres avec des vis. Pour l'empêcher de se coller aux plaques de cuivre, j'interpose entre chaque plaque et le gâteau une feuille mince d'étain : j'ai trouvé que l'étain ne s'attache pas aussi fortement et qu'on peut l'enlever sans risque d'endommager les gâteaux.

» La chaleur nécessaire pour fondre la gomme laque est assez grande pour la faire écumer et bouillir : on ne peut donc en couler un gâteau exempt de bulles d'air. La lame citée dans la table précédente en renfermait le moins que j'ai pu. Elle contenait cependant une grande quantité de petites bulles, mais pas de grosses.

» La cire d'abeilles fond à environ 145 degrés Fahrenheit. Si on la chauffe un peu au-dessus du point d'ébullition de l'eau, elle écume beaucoup, et paraît perdre pas mal de matière aqueuse ; si on la maintient à cette température jusqu'à ce qu'elle ait cessé d'écumer, on peut ensuite la chauffer à une température bien plus élevée sans qu'elle

écume ou étre en ébullition. C'est de la cire ainsi préparée que j'appelle cire déphlegmée.

» Pour que les différentes lames de cire déphlegmée le soient toutes au même degré, j'ai déphlegmé de la cire d'abeilles à une chaleur assez considérable, je l'ai laissée refroidir et durcir, et du pain ainsi obtenu j'ai fait les trois plateaux, en prenant soin de ne pas chauffer plus qu'il n'était nécessaire.

» J'ai pris encore les mêmes précautions pour couler des plateaux d'un mélange de cire et de résine : j'ai oublié de prendre en note les proportions de résine et de cire employées.

» Ce que je désigne sur la table par 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> plateau de cire d'abeilles, c'est en réalité le même que le 3<sup>e</sup>, mais avec une plus petite armature. »

Cavendish continue : « Il ressort de ces expériences :

» 1<sup>o</sup> Qu'il y a une différence très sensible dans la charge (1) de plateaux de mêmes dimensions, suivant la nature du verre dont ils sont faits : la charge des plateaux O et Q, faits en verre vert étranger, est la plus grande relativement à la charge calculée; ensuite vient le crown-glass, et, en dernier lieu, le flint.

» 2<sup>o</sup> Que la charge d'un plateau de laque est, relativement à sa charge calculée, moindre que celle d'un plateau quelconque de verre; et celle d'un plateau de cire, ou d'un mélange de cire ou de résine, encore moindre.

» Mais il faut observer qu'il y a sous ce rapport une différence considérable entre les trois différents plateaux de cire déphlegmée; la même remarque s'applique aux plateaux du mélange de cire et résine.

(1) Ici la charge est proportionnelle à la capacité inductive spécifique.

» Comme la proportion de la charge vraie à la charge calculée (la capacité inductive spécifique) est plus grande pour les plateaux épais que pour les plateaux minces, on pourrait être porté à croire que cela est dû à un défaut d'uniformité dans la diffusion de l'électricité. Mais comme la différence paraît trop grande pour qu'on puisse l'attribuer raisonnablement à cette cause, je penserais volontiers qu'elle est due à quelque différence dans la nature des plateaux. Peut-être tient-elle à ce que certains plateaux ont été moins chauffés que d'autres, et par suite ont subi un effort de compression plus énergique.

» Le morceau de crown-glass taillé qui est mentionné dans la première des tables précédentes, a été pris dans un morceau de crown d'environ  $\frac{1}{4}$  de pouce (6 millimètres) d'épaisseur, et taillé ensuite jusqu'à l'épaisseur indiquée ; l'ouvrier prenait soin d'enlever autant de matière d'un côté que de l'autre, en sorte que le plateau est composé uniquement de la partie centrale du morceau de verre.

» J'agissais ainsi pour la raison suivante : ayant reconnu des différences considérables dans la charge des diverses sortes de verre, j'ai supposé qu'il pourrait bien exister une différence entre l'extérieur et l'intérieur d'un même morceau, et, s'il en était ainsi, cela aurait affecté l'exactitude des expériences faites avec les 10 plateaux de verre taillés dans le même morceau.

» Mais en comparant les charges des plateaux de crown avec celles des deux autres morceaux de crown mentionnés à la table, il ne paraît pas que la différence soit bien marquée.

» L'expérience aurait été beaucoup plus satisfaisante si le morceau de verre taillé et ceux auxquels on le comparait avaient été pris au même pot de verrier. Mais il aurait été

difficile de se procurer des morceaux dans ces conditions ; et comme je n'ai trouvé que de très faibles différences dans la densité de divers échantillons, et que j'ai su que toute la fabrication du crown se fait à la même verrerie, je n'ai pas pris cette précaution. »

#### CONDENSATEURS CYLINDRIQUES

Cavendish fit aussi quelques expériences « sur la charge des bouteilles de Leyde qui ne sont pas formées de plateaux de verre.

» Ces expériences furent faites avec des cylindres creux de verre, ouverts aux deux bouts, et revêtus au dedans et au dehors de feuilles d'étain entourant le cylindre en forme d'anneaux. Les anneaux avaient partout la même largeur, la même au dedans et au dehors, et étaient placés exactement en regard l'un de l'autre ; seulement, comme l'intérieur des deux tubes de thermomètre était trop petit pour qu'on pût y introduire un revêtement de ce genre, on les a remplis de mercure faisant l'office d'armature intérieure.

» Pour trouver l'épaisseur du verre, on suspendait le cylindre par un des bouts à une balance, son axe étant vertical, et son extrémité inférieure plongeant dans un vase d'eau ; et on prenait le changement de poids du cylindre quand il s'enfonçait dans l'eau d'une longueur plus ou moins grande.

» Le résultat de ces expériences est contenu dans la table suivante :

	Épaisseur moyenne.	Rayon extérieur moyen.	Longueur du revêtement.	Densité.	Quotient du diamètre extérieur par l'épais- seur.	Charge calculée.	Charge observée	Quotient de la charge observée par la charge calculée.
Partie d'une bouteille de flint.....	0 084	1 62	4 4	2 254	49 3	85 9	717	8 35
Cylindre de flint.....	0 0704	0 645	0 86	3 281	9 2	87 1	650	7 46
Tube thermométrique I..	0 094	0 14	11	3 098	1 5	14 0	80	7 31
— II.	0 130	0 16	15 5	3 243	1 24	14 1	80 7	7 26
Cylindres de verre à	1 0 045	0 50	7 16	2 665	11 3	77 2	754	9 77
bouteilles vert ...	2 0 060	0 53	8 55	2 664	8 8	76 6	690	9 00
	3 0 078	0 48	7	2 665	6 2	40 8	355	8 65

Il ajoute :

« Les longueurs des revêtements inscrites au tableau sont les longueurs vraies ; mais en calculant les charges de la bouteille et du cylindre en verre blanc, et des trois cylindres en verre vert, ces longueurs ont été augmentées pour tenir compte de la diffusion de l'électricité, d'après l'hypothèse qui a servi à calculer la charge des plateaux.

» Mais en calculant la charge des tubes thermométriques, je n'ai pas fait de correction, parce que je ne savais à combien l'évaluer ; d'ailleurs les longueurs des revêtements sont si grandes que cela peut à peine faire une erreur appréciable. »

Dans ces expériences, il faut prendre pour capacité inductive spécifique le quotient de la charge observée par la charge calculée, Cavendish n'ayant pas fait d'expériences précises sur la capacité d'un condensateur cylindrique à air.

#### EFFET DE LA TEMPÉRATURE

Cavendish a aussi examiné l'effet de la température sur la capacité inductive spécifique du verre, et reconnu qu'à 295 degrés Fahrenheit le verre est à peu près bon con-

ducteur, et à 305 degrés bien meilleur. Il est aussi arrivé à la conclusion que la capacité augmente beaucoup quand le verre devient conducteur, mais reste jusque-là à peu près stationnaire.

#### EFFET DES VARIATIONS DE CHARGE

Cavendish a également fait des expériences pour reconnaître si la capacité inductive spécifique varie avec la force électro-motrice : il ne put découvrir de différence dans les limites de ses expériences (1).

#### EXPÉRIENCES DE FARADAY

Avant de décrire les expériences plus modernes, nous devons rappeler que les recherches de Cavendish n'ont été publiées qu'en septembre 1879, et que ni Faraday, ni aucun des autres expérimentateurs dont nous allons résumer les travaux, ne connaissaient seulement leur existence au moment où ils ont fait leurs propres expériences.

Le 30 novembre 1837, Faraday communiqua à la Société Royale un mémoire (2) « sur l'induction », où il annonce la découverte (la réinvention, devrions-nous dire) de la capacité inductive spécifique; il décrit des méthodes pour la mesurer et donne les résultats qu'il a obtenus pour le verre et d'autres substances.

Son appareil consistait en deux condensateurs sphériques identiques, de la forme représentée dans la figure 25.

L'armature intérieure de chacun d'eux est formée d'une sphère de cuivre jaune (A), de 5,825 centimètres de diamètre; l'armature extérieure, d'une sphère creuse de cuivre jaune (B), de 8,925 centimètres de diamètre inté-

(1) Ce point n'est pas encore établi, février 1880.

(2) *Exp. Res.* 1161, vol. I, page 360.

rieur; ce qui laisse un espace de 1,55 centimètres entre les deux armatures.

La sphère intérieure est portée par une tige isolante de gomme laque (*l*), que traverse un fil de métal allant de la sphère à un petit bouton extérieur (*a*).

La sphère extérieure est coupée suivant son équateur, et les deux moitiés peuvent être séparées pour introduire divers diélectriques.

On pouvait amener différents gaz par le robinet R.

L'espace compris entre les deux sphères pouvait être rempli avec différentes matières isolantes, et on voit qu'en laissant un des appareils plein d'air, et remplissant l'autre d'une substance quelconque, on aura deux condensateurs exactement semblables, à la nature près de leurs diélectriques.

Dans la pratique on trouvait plus commode de donner au diélectrique la forme d'une coupe hémisphérique, de mesurer son effet, et de calculer ensuite quel aurait été l'effet produit en remplissant tout l'espace.

Voici quelle était la méthode suivie dans les expériences : Les deux condensateurs sont placés côte à côte, les armatures extérieures à la terre; on charge l'un d'électricité et on mesure le potentiel de la charge au moyen de la balance de Coulomb (1).

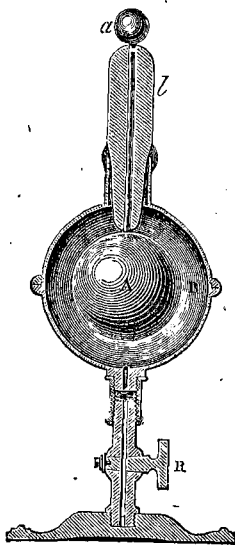


FIG. 25.

(1) Voy. page 48

Les armatures intérieures des deux condensateurs sont alors reliées et on mesure de nouveau le potentiel.

Or nous savons que, si deux condensateurs sont reliés ensemble, la charge se partage entre eux proportionnellement à leurs capacités ; nous savons aussi que si l'on enlève la moitié de sa charge à un condensateur, son potentiel devient la moitié de ce qu'il était auparavant.

Si donc le second condensateur est de même capacité que le premier, il prendra exactement la moitié de la charge, et, *après ce partage, le potentiel sera la moitié de ce qu'il était avant.*

Si le second condensateur est de capacité plus grande que le premier, il prendra plus de la moitié de la charge, et, après le partage, le potentiel sera inférieur à la moitié de ce qu'il était auparavant.

Si le second condensateur est de capacité moindre, le potentiel sera supérieur à la moitié du potentiel primitif.

#### LES EXPÉRIENCES

Quelques expériences préliminaires furent faites avec les deux condensateurs pleins d'air pour vérifier leur égalité ; puis, une coupe hémisphérique de gomme laque était placée dans un des appareils, l'autre restant plein d'air.

Pour compenser les effets de déperdition, dans les différentes expériences, le condensateur chargé le premier était alternativement celui à air, et celui à gomme laque. L'effet de la déperdition devant être de donner au condensateur à gomme laque une capacité trop forte dans un cas, trop faible dans l'autre, la moyenne des deux expériences n'était pas sensiblement affectée par cette erreur.

Les résultats des deux premières expériences furent :



Rapport de la capacité du condensateur à gomme laque à celle du condensateur à air :

Condensateur à air chargé le premier. . . .	1,55
— gomme laque — . . . .	1,37

Après de nombreuses expériences, Faraday arriva à la conclusion que le rapport de la capacité du condensateur à gomme laque à celle du condensateur à air est à peu près exactement 1,5.

De ce résultat, Faraday déduisit par le calcul que si la gomme laque avait entièrement rempli le condensateur, le rapport aurait été au moins 2,0; c'est-à-dire que la capacité inductive spécifique de la gomme laque est 2,0.

Faraday fit des expériences sur d'autres substances, et voici une table de ses résultats :

Diélectrique.	Capacité inductive spécifique.
Gomme laque.....	2,0
Soufre.....	2,24
Verre.....	Plus de 1,76
Térébenthine.....	Plus de 1,00

#### GAZ

Une longue série d'expériences très soignées fut faite sur les gaz, dont il ne compara pas moins de vingt-cinq couples. Des comparaisons furent également faites entre l'air sec et humide, chaud et froid, à haute et à basse pression. Mais, en aucun cas, Faraday ne réussit à découvrir de différence.

#### AUTRES EXPÉRIENCES

Depuis Faraday, l'étude des capacités inductives spéci-

fiques ne fut plus abordée jusqu'en 1871 (1), époque à laquelle MM. Gibson et Barclay publièrent un mémoire sur cette question. Depuis cette date, il ne s'est guère passé d'année qui n'ait ajouté quelque chose à nos connaissances sur ce sujet.

EXPÉRIENCES DE MM. GIBSON ET BARCLAY SUR LA PARAFFINE  
(pl. VI et VII) (2).

Les principaux instruments employés sont :

- 1° L'électromètre à quadrants, modèle de White (page 59);
- 2° Le platymètre;
- 3° Le condensateur à glissement.

LE PLATYMÈTRE

Le platymètre consiste essentiellement en deux condensateurs cylindriques d'égale capacité dont les armatures intérieures sont en communication métallique.

On le voit sur la planche VI, fig. 1; les deux conducteurs intérieurs forment un seul cylindre *cc*; les conducteurs extérieurs sont deux cylindres courts *pp*, *p'p'*.

CONDUITE DE L'EXPÉRIENCE (pl. VII, fig. 3).

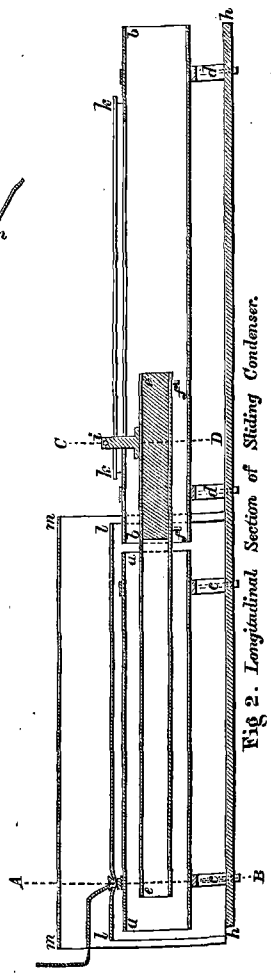
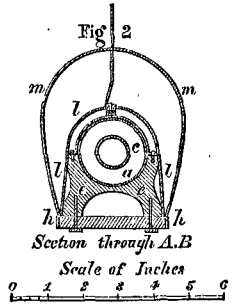
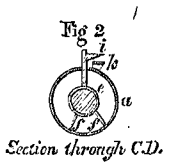
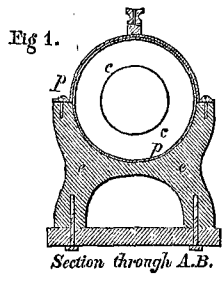
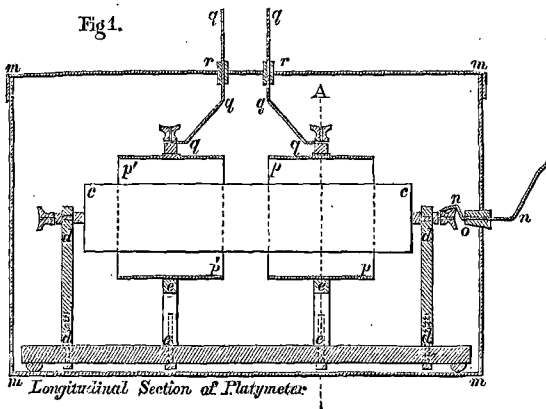
Relions à la terre une des paires de quadrants de l'électromètre, et l'autre paire au conducteur *cc* commun aux deux condensateurs du platymètre.

Supposons l'un des cylindres extérieurs *pp* chargé positivement; il induira sur le cylindre *cc* une charge opposée

(1) Dans cet intervalle, 1862 à 1864, se placent les travaux de M. Gaugain sur le même sujet, travaux qui méritent d'être mentionnés dans une étude détaillée de la capacité inductive spécifique. (Voy. l'appendice II au présent chapitre.)

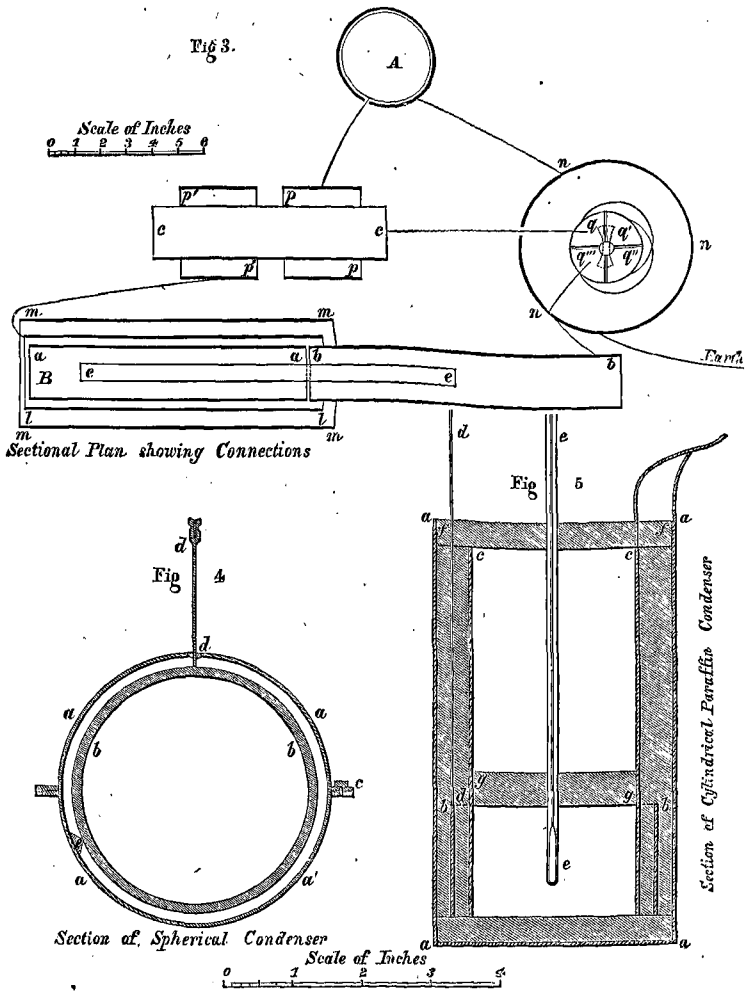
(2) *Phil. Trans.*, 1871, page 573.





PL. VI. — Expériences de Gibson et Barclay sur la capacité inductive spécifique.  
Échelle en pouces.

FIG. 1 : Coupe longitudinale du platymètre; — coupe par A.B.  
FIG. 2 : Coupe longitudinale du condensateur à glissement; — coupe par A.B.; — coupe par C.D.



PL. VII. — Expériences de Gibson et Barclay sur la capacité inductive spécifique.  
Échelle en pouces.

FIG. 3 : Plan-coupe montrant les communications. — FIG. 4 : Coupe du condensateur sphérique. — FIG. 5 : Coupe du condensateur cylindrique à paraffine ; — Earth, terre.



à la sienne, et une semblable à la sienne sur les quadrants. Mettons à la terre les quadrants toujours reliés au cylindre, et isolons-les de nouveau. L'électricité positive s'est échappée, et l'électricité négative, retenue par la positive du cylindre extérieur, ne produira pas d'effet sur l'électromètre tant que l'induction du cylindre extérieur sur l'intérieur ne sera pas modifiée. Ainsi, il n'y aura pas de déviation.

Supposons maintenant que l'on réunisse les deux cylindres extérieurs égaux et semblables  $pp$  et  $p'p'$ .

L'effet inducteur de  $pp$  sur  $cc$  est réduit de moitié, puisque  $pp$  a perdu la moitié de sa charge; mais en même temps  $p'p'$ , ayant gagné la moitié de la charge de  $pp$ , va exercer une action exactement égale et semblable à celle de  $pp$ . Ainsi la somme des actions des deux cylindres  $pp$ ,  $p'p'$ , à demi-charge, sur le cylindre intérieur  $cc$ , produit exactement la même action que celle qu'exerçait auparavant le seul cylindre  $pp$  à pleine charge: il n'y aura donc pas encore de déviation de l'électromètre.

Ainsi, nous voyons que tant que les capacités des deux condensateurs, c'est-à-dire  $pp$  et une partie de  $cc$ , et  $p'p'$  et une partie de  $cc$ , seront égales, il n'y aura pas de déviation.

Si maintenant nous répétons l'expérience avec deux autres condensateurs ajoutés l'un à  $pp$  et l'autre à  $p'p'$ , il n'y aura encore pas de déviation si les nouveaux condensateurs sont égaux: mais s'ils diffèrent, l'aiguille se déplacera (1).

(1) Si on ne se servait pas du platymètre, on ne pourrait comparer les nouveaux condensateurs qu'en les chargeant à des potentiels égaux et contraires au moyen d'une très forte pile. Avec le platymètre, on peut employer une machine électrique ou une bouteille de Leyde.

Si un condensateur de capacité fixe est relié à  $pp$ , et un autre de capacité variable à  $p'p'$ , et si nous faisons varier ce dernier jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de déviation, nous saurons que nous avons réglé les nouveaux condensateurs à l'égalité.

On obtenait un condensateur de capacité fixe et aisée à calculer, avec l'air pour diélectrique, en fixant une sphère métallique de rayon connu à l'intérieur d'une autre de rayon également connu (pl. VII, fig. 4) (1).

Ce condensateur était attaché à l'un des cylindres extérieurs  $pp$ , et un condensateur à capacité variable, appelé « condensateur à glissement », était attaché à l'autre,  $p'p'$  (pl. VII, fig. 3).

Le condensateur à glissement étant réglé à l'égalité avec le condensateur fixe connu, on lisait sa graduation, qu'on notait.

Le condensateur fixe à air était alors enlevé et remplacé par un autre ayant pour diélectrique la substance à examiner; et le condensateur à glissement était encore une fois réglé à l'égalité.

Il est clair que le rapport des deux capacités du condensateur à glissement est égal au rapport des capacités du condensateur à air et du condensateur dont on examine le diélectrique.

#### LE CONDENSATEUR À GLISSEMENT

Le condensateur à glissement est représenté sur la planche VI, fig. 2.

Il consiste en un tube isolé fixe,  $aa$ , et en un autre  $ee$  qui peut glisser dans le premier. Quand  $ee$  et  $aa$  forment

(1) Page 108.



les armatures d'un condensateur, sa capacité est plus ou moins grande, selon que *ee* pénètre plus ou moins dans l'intérieur de *aa*.

Le tube *bb* n'agit que comme support du tube mobile *ee*, et porte la graduation sur laquelle on lit la position de *ee*. Il n'a pas d'usage électrique, et on le maintient relié à la terre. La partie ombrée de *ee* est chargée de poids et glisse sur quatre pieds de laiton *ff*, à l'intérieur de *bb*.

On calculait la valeur d'une division de l'échelle, c'est-à-dire le changement de capacité correspondant à un déplacement d'une division. On peut calculer cette valeur quand on connaît les rayons des deux cylindres (1). La capacité totale du condensateur à glissement ne peut être calculée avec exactitude (2).

On peut alors déterminer combien de divisions de l'échelle sont équivalentes à la capacité du condensateur sphérique, c'est-à-dire de combien il faut déplacer le condensateur à glissement, pour ramener l'aiguille au zéro, si, après que l'équilibre a été établi, la capacité du condensateur sphérique venait subitement à doubler.

Cela connu, on connaît aussi le rapport de la capacité représentée par une lecture de l'échelle à la capacité représentée par une autre lecture.

(1) Soient *r* le rayon du cylindre intérieur, *r'* celui du cylindre extérieur, *l* la longueur d'une division de l'échelle,  $\Delta c$  le changement de capacité produit en déplaçant le cylindre d'une division; on peut démontrer mathématiquement que

$$\Delta c = \frac{l}{2 \log \frac{r'}{r}}$$

(2) [A cause de l'irrégularité de la distribution électrique aux extrémités du cylindre.]

## LES CONDENSATEURS A PARAFFINE

On préparait des condensateurs ayant de la paraffine au lieu d'air comme diélectrique. L'un consistait en une boîte plate circulaire en laiton, à l'intérieur de laquelle on avait posé sur trois pointes d'ébonite un disque de laiton. De la paraffine fondue, coulée dans l'intervalle et solidifiée, remplissait l'espace entre le disque et la boîte. A cause de certains défauts de ce condensateur, on en fit un autre, formé de deux tubes concentriques (pl. VII, fig. 5), dont l'intervalle était rempli de paraffine.

Le condensateur à paraffine étant substitué au condensateur à air, on réglait à l'égalité le condensateur à glissement.

La comparaison des lectures sur la graduation du condensateur à glissement donnait le rapport des capacités des condensateurs à air et à paraffine, et d'après ce résultat on pouvait calculer la capacité inductive spécifique de la paraffine, en tenant compte des différences de forme et de dimensions des condensateurs à air et à paraffine.

## RÉSULTATS

Les résultats obtenus, après avoir fait diverses corrections, étaient :

D'après les expériences faites avec le condensateur disque et paraffine dans une boîte :

Capacité inductive spécifique de la paraffine = 1,975.

D'après les expériences faites avec le condensateur cylindrique à paraffine :

Capacité inductive spécifique de la paraffine = 1,977.

C'est ce dernier nombre qui est adopté par les auteurs.

La densité de la paraffine à 11° C. était : 0,9080.

## EXPÉRIENCES DE BOLTZMANN (1), première méthode.

En 1874, le professeur Boltzmann publia le compte rendu de quelques déterminations de capacité inductive spécifique. Un de ses condensateurs était formé de deux plateaux circulaires parallèles, isolés l'un de l'autre, et montés verticalement sur une glissière graduée, de façon à pouvoir connaître leur écartement.

On mettait dans ce condensateur divers diélectriques, et la distance des plateaux était généralement réglée de façon qu'ils ne touchaient pas le diélectrique.

Quand un plateau diélectrique était interposé, on déterminait expérimentalement la capacité du condensateur, et de cette valeur on déduisait la capacité inductive spécifique par la formule suivante :

Soient  $m$  l'écartement des plateaux,  $n$  l'épaisseur du diélectrique,  $K$  sa capacité inductive spécifique.

Quand il n'y a que de l'air entre les plateaux, la capacité est inversement proportionnelle à leur distance  $m$ . Si nous remplissons l'intervalle des plateaux avec le diélectrique de capacité inductive spécifique  $K$ , nous produirons le même accroissement de capacité que si nous avions réduit la distance des plateaux de  $m$  à  $\frac{m}{K}$ , et le rapport des capacités sera celui de  $m$  à  $\frac{m}{K}$ , c'est-à-dire de  $K$  à 1.

Mais si le diélectrique n'a qu'une épaisseur  $n$ , il déplace une couche d'air d'épaisseur  $n$ , et la remplace par une couche de matière dont l'effet est le même que si la couche  $n$  avait été réduite à l'épaisseur  $\frac{n}{K}$ .

(1) *Carl's Repertorium*, X, p. 109, et *Wiener Sitzungsberichte*, vol. LXVII, part. II, p. 17.

La capacité va donc augmenter, comme si les plateaux avaient été rapprochés d'une distance  $n$ , et éloignés ensuite d'une distance moindre  $\frac{n}{K}$ ; elle sera inversement proportionnelle à

$$m - n + \frac{n}{K}$$

et le rapport des capacités sera l'inverse du rapport de  $m$  à l'expression précédente :

$$\frac{\text{Capacité du condensateur à air}}{\text{Capacité du même condensateur à diélectrique}} = \frac{m - n + \frac{n}{K}}{m}. \quad (1)$$

Comme  $m$ ,  $n$  et le rapport des capacités sont des quantités connues,  $K$  peut être calculé au moyen de cette équation. Car,  $R$  étant le rapport des capacités, on tire, par une transformation algébrique ordinaire :

$$K = 1 + \frac{m}{n} (R - 1). \quad (2)$$

Le fait que la capacité du condensateur à air est inversement proportionnelle à la distance des plateaux, et n'est affectée par aucune influence perturbatrice, avait été soigneusement vérifié.

#### L'ÉLECTROMÈTRE ET LA PILE

On employait un électromètre de Thomson et une pile de 18 éléments Daniell (1).

(1) Chapitre XVIII.

## LES EXPÉRIENCES

La comparaison des capacités des condensateurs se faisait comme il suit :

1° La pile est reliée directement à l'électromètre, et la déviation notée.

2° Un plateau du condensateur contenant de l'air seulement est attaché à la pile, l'autre plateau mis à la terre.

3° Le plateau chargé du condensateur est détaché de la pile, et relié à l'électromètre.

La déviation était alors plus petite que dans le cas 1°, et de la différence on pouvait déduire le rapport de la capacité du condensateur à celle de l'électromètre (1).

Les trois opérations sont répétées avec le diélectrique interposé entre les plateaux, ce qui donne le rapport des capacités du condensateur à « diélectrique » et de l'électromètre. Nous connaissons donc les rapports des capacités :

$$\frac{\text{Condensateur à air}}{\text{Electromètre}} \quad \text{et} \quad \frac{\text{Condensateur à diélectrique}}{\text{Electromètre}}$$

Le rapport de ces deux rapports est le rapport de la capacité du condensateur à air à celle du condensateur à

(1) En effet, le rapport des déviations dans les cas 1° et 3° est l'inverse du rapport de la capacité du condensateur seul à la capacité de l'électromètre et du condensateur ensemble.

Posant DE et DC pour ces déviations, CE et CC pour les capacités respectives de l'électromètre et du condensateur, nous avons :

$$\frac{DE}{DC} = \frac{CE + CC}{CC} \quad \text{ou} \quad \frac{CC}{CE} = \frac{DC}{DE - DC}$$

diélectrique, c'est-à-dire la quantité  $R$  de la formule (2), page 140.

Les expériences étaient conduites comme il suit :

*Première partie.* — Un fil DC (fig. 26) (1) est relié à l'électromètre; trois autres fils I, II, III, attachés comme le montre la figure, sont disposés de façon qu'on puisse leur faire toucher DC quand cela est nécessaire.

Avant de commencer une expérience, on abaisse I, ce

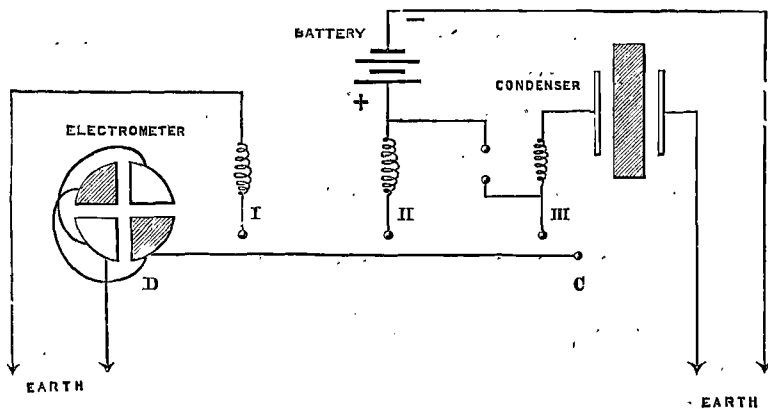


FIG. 26. — Battery = Pile. Electrometer = Electromètre. Condenser = Condensateur. Earth = Terre.

qui décharge l'électromètre; puis on relève I et l'on abaisse II : l'électromètre est chargé directement par la pile, et l'on note sa déviation comme « résultat de la pile ».

On relève II, et successivement on abaisse et on relève I : l'appareil est alors prêt pour la deuxième partie de l'expérience.

*Deuxième partie.* — Le diélectrique étant retiré du con-

1) Les portions des fils situées au-dessus des boudins sont supposées fixes.

densateur, on soulève III au-dessus de la position de repos, de façon à charger le condensateur ; puis on l'abaisse pour relier le condensateur à l'électromètre.

La déviation est notée comme « résultat du condensateur à air ».

Finalement, on répète les opérations de la deuxième partie avec le diélectrique interposé et l'on note la déviation comme « résultat du condensateur à diélectrique ».

Pour s'assurer qu'il n'y a d'électrisation accidentelle en aucun point de l'appareil, II est mis à la terre, et toutes les opérations sont répétées. Si l'on peut le faire sans produire de déviation, c'est qu'il n'y a pas de charge accidentelle.

#### DURÉE DE LA CHARGE

Le condensateur et l'électromètre restent en contact assez longtemps pour qu'on puisse lire la déviation ; puis on les décharge tous deux en abaissant I.

Pour des expériences plus rapides, un système de ressorts (non figuré) était attaché au fil III, et le mettait à la terre immédiatement après chacun de ses contacts inférieur et supérieur.

Pour examiner les effets de l'absorption, on faisait des expériences, d'abord aussi vite que possible, en sorte que les contacts duraient seulement une fraction de seconde ; ensuite lentement, chaque opération durant une à deux minutes. On ne constata aucune différence dans les résultats quand on employait des matières bien isolantes.

De même, le condensateur chargé pendant longtemps, puis déchargé un instant, étant relié à l'électromètre, on ne put constater aucune charge résiduelle.

## CONDENSATEUR A MERCURE

Pour examiner le cas où il n'y a pas d'air dans le condensateur, c'est-à-dire où les plateaux sont en contact métallique avec le diélectrique, on construisit un « condensateur à mercure ».

La lame isolante était placée dans un plat contenant du mercure, et l'on versait sur sa surface supérieure du mercure qu'une garniture de papier posée sur le contour de la lame empêchait de s'écouler. Les résultats furent d'accord avec les précédents.

## MATIÈRES IMPARFAITEMENT ISOLANTES

Enfin on essaya quelques matières imparfaitement isolantes comme le verre, la stéarine, la gutta-percha, etc. ; mais telle était l'influence des variations de la durée et de l'énergie de la charge, qu'on ne put obtenir de résultats présentant quelque concordance.

## RÉSULTATS

Les déterminations suivantes furent faites :

Diélectrique.	Capacité inductive spécifique.
Ébonite:.....	3,15
Paraffine.....	2,32
Soufre.....	3,81
Résine .....	2,55

## DEUXIÈME MÉTHODE DE BOLTZMANN (1)

Le 24 juillet 1873, le professeur Boltzmann lut devant l'Académie de Vienne un mémoire « Sur les actions élec-

(1) *Experimental Untersuchung über die electro-statische Fernwirkung dielectrischer Körper.* (Wiener Sitzungsberichte, vol. LXVIII, part. II, p. 81.)



trostatiques exercées à distance par les corps diélectriques », où il étudie la question de la capacité inductive spécifique à un point de vue absolument neuf.

Si une balle métallique non électrisée, suspendue à un fil long et fin, est attirée par une balle métallique fixe chargée d'électricité, la grandeur de l'attraction ne dépendra que des dimensions des balles, de leur éloignement et de l'énergie de la charge; et l'on pourra la calculer par des méthodes mathématiques connues.

Si une balle d'une matière isolante, comme le soufre, est substituée à la balle métallique suspendue, l'attraction ne dépendra pas seulement de la distance et des dimensions des balles, et de la charge, mais aussi de la capacité inductive spécifique du soufre.

De la comparaison des attractions d'une balle de soufre et d'une balle de métal, dans les mêmes conditions, on peut déduire la capacité inductive spécifique du soufre.

Le mémoire est le compte rendu d'expériences où l'on comparait les attractions exercées sur des balles métalliques, et celles exercées sur des balles de divers diélectriques.

La première méthode employée n'était pas très rigoureuse; mais, comme elle est simple, nous allons la décrire pour que l'on comprenne plus aisément les méthodes plus compliquées qui en sont le développement.

La « balle métallique » et la « balle de soufre » ont chacune 7 millimètres de diamètre, et sont suspendues à 90 millimètres d'intervalle à des fils de cocon de 2 mètres de long (fig. 27).

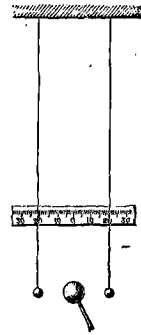


FIG. 27.

Une boule métallique chargée, que nous appellerons à l'avenir la « balle active », de 26 millimètres de diamètre, est placée exactement au milieu des précédentes. Les deux balles suspendues sont électrisées par induction, et attirées avec une force dépendant de l'intensité de l'« action à distance » sur chaque balle.

Pour mesurer l'attraction, une échelle était placée derrière les fils, dont la position était lue sur cette échelle au moyen de deux microscopes (1). Les déviations étant très petites, on considère les attractions comme proportionnelles au nombre des divisions parcourues par les fils.

Le rapport des déviations était inscrit :

$$\frac{\text{Force exercée sur la balle de métal}}{\text{Force exercée sur la balle de soufre}}$$

et était appelé E.

Comme l'attraction sur la balle de métal était toujours la plus grande, E était toujours plus grand que l'unité.

Pour que les poids et les volumes des deux balles pussent être exactement égaux, on les faisait toutes deux avec le diélectrique à examiner, et celle qui était choisie pour servir de balle métallique, était dorée, ou couverte de feuilles d'étain.

La première expérience fut faite avec du soufre, et le résultat fut :

$$E = \frac{\text{Attraction sur la balle de métal}}{\text{Attraction sur la balle de soufre}} = 1,90.$$

Le professeur Boltzmann démontre que la capacité induc-

(1) L'introduction de la « balle active » détermine dans les fils des oscillations, dont on observe les limites et dont on prend la moyenne comme position de déviation.

tive spécifique  $K$  peut être calculée au moyen de  $E$  par la formule (1) :

$$E = \frac{K + 2}{K - 1}$$

qui donne

$$K = \frac{E + 2}{E - 1}.$$

Ainsi la capacité de soufre, déduite de cette première et grossière expérience, serait

$$E = 1,90$$

$$K = \frac{3,90}{0,90} = 4,3.$$

Les expériences étaient répétées en donnant à la balle active des charges alternativement positives et négatives.

Cette méthode est sujette à diverses causes d'erreur. Son principal défaut est que son exactitude dépend entièrement de l'exactitude avec laquelle la balle active est placée à égale distance des balles suspendues, ce qui est un réglage très difficile à obtenir.

Les balles suspendues étaient faites grossièrement, et fortement déplacées par les courants d'air. Les fils de soie par lesquels elles étaient suspendues n'étaient pas non plus d'excellents isolants.

Pour ces raisons, le professeur Boltzmann a modifié sa méthode comme il suit :

(1) Le professeur Boltzmann calcule d'abord l'attraction d'une balle faite d'un diélectrique quelconque, et obtient une expression renfermant  $K$ . Il obtient ensuite l'attraction d'une sphère métallique en faisant  $K = \infty$  dans sa formule. Divisant une expression par l'autre, il trouve le rapport  $E$  égal à :

$$\frac{K + 2}{K - 1} \quad (1 + \text{une quantité très faible}).$$

Voir l'appendice I à ce chapitre.

## MÉTHODE PERFECTIONNÉE. — INSTRUMENTS

Les balles, au lieu d'être simplement suspendues à un fil comme dans la figure 27, sont attachées successivement au même point, à un bout de l'aiguille d'une balance de torsion, et les attractions sont calculées d'après leurs déviations respectives.

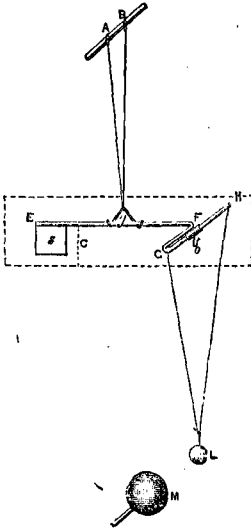


FIG. 28.

L'appareil de torsion est représenté dans la figure 28. Son aiguille est formée d'un fil raide EFGH au bout duquel la balle de métal ou de soufre est suspendue par deux fils fins fixés en G et H.

A l'autre bout de l'aiguille est un miroir dans lequel on observe les déviations au moyen d'une échelle et d'une lunette (1).

L'aiguille est suspendue aux points A et B par une suspension bifilaire (2). M est la balle active, qui attire la balle L et est mise en communication avec une bouteille de Leyde.

Pour protéger l'aiguille elle-même contre l'action des corps électrisés, on la renferme dans une cage conductrice triangulaire, faite de papier doré et reliée à la terre.

Cette cage est indiquée en traits pointillés, dans la

(1) Cette méthode d'observation diffère légèrement de la méthode de la « lampe et de l'échelle » décrite précédemment. Voir chapitre XIV.

(2) Voy. pages 57 et 60.

figure 28, et représentée dans son ensemble dans la figure 29.

L'appareil est monté sur un support, comme on le voit sur le côté droit de la figure 29.

Comme les balles de métal et de soufre sont mises en L successivement, et non simultanément, il est nécessaire de s'assurer que le potentiel de la balle active est resté constant pendant toute l'expérience. Dans ce but, on em-

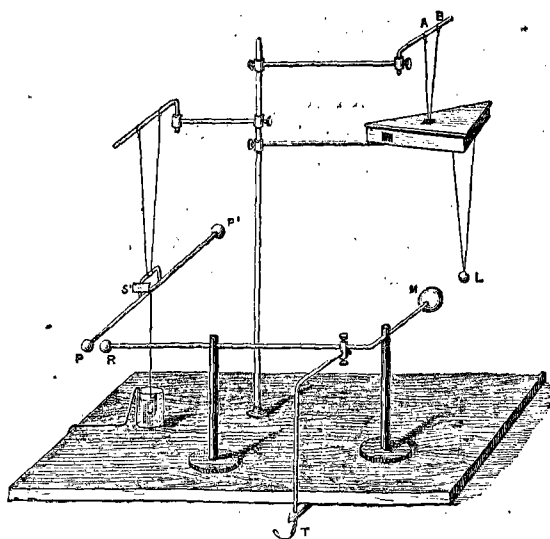


Fig. 29.

ploie un électromètre séparé, représenté à gauche de la figure 29. Une balle métallique P, au bout d'une tige métallique suspendue, est attirée par une balle fixe R, en communication métallique avec la balle active M.

P' est un simple contre-poids. La tige PP' est reliée à la terre par un fil de platine terminé par une lame de platine plongeant dans un vase d'acide sulfurique étendu. Un autre

fil réunit le vase à la conduite d'eau la plus voisine. La lame J aide à amortir les oscillations du bras PP'.

On lit les déviations de PP' au moyen d'un miroir S'.

M et R peuvent être chargés d'électricité au moyen du fil T.

Pour protéger les tiges suspendues des courants d'air, l'appareil tout entier est couvert, pendant qu'on s'en sert, d'une cage de verre, avec une glace plane sur le devant, à travers laquelle on peut observer les miroirs.

On n'a pas reconnu nécessaire de maintenir le potentiel de M absolument constant, les déviations de P permettant de calculer les petites variations de potentiel au cours des expériences, et d'en tenir compte.

Dans les expériences, on observait d'abord la déviation de l'aiguille EFGH avec une balle de soufre en L, puis avec une balle de métal, et de nouveau avec une balle de soufre.

Une porte sur le côté de la cage de verre permettait de changer les balles, et une petite pince placée en C (fig. 28) tenait la tige fixe pendant qu'on faisait cet échange.

Dans le cas où le miroir et la balle ne se faisaient pas exactement équilibre, on pouvait faire glisser la tige sur l'étrier g.

#### RÉGLAGE DE LA CHARGE

Pour régler la charge, on employait la disposition de la figure 30.

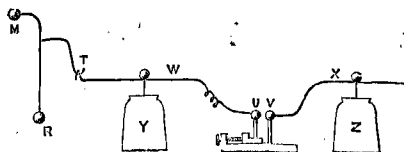


FIG. 30.

Une bouteille de Leyde Y était attachée aux balles MR, et par le fil W à un « électromètre à décharges », UV.

## ÉLECTROMÈTRE A DÉCHARGES

Il consiste en deux boules métalliques isolées UV (fig. 30), dont l'écartement peut être réglé par une vis. Si des étincelles passent de l'une à l'autre, on trouve que dans les mêmes circonstances et pour un écartement donné, la quantité d'électricité qui passe dans une étincelle est à peu près constante.

## SUITE DE LA MÉTHODE

Une bouteille chargée Z est reliée par un fil X à la boule V et on fait passer une ou plusieurs étincelles. Le potentiel auquel se chargent les boules MR est proportionnel au nombre des étincelles, car il est égal à la quantité d'électricité qui a passé, divisée par la capacité de la bouteille Y, des fils et des boules M, R, T W, U.

## CHARGES DE COURTE DURÉE

Pour examiner l'effet de charges de courte durée, on employait la disposition de la figure 31. Le fil W est coupé en *ab*, et les extrémités *ab* portent des coupes à mercure, qui peuvent être reliées au moyen d'un fil recourbé *c*. *c* est attaché à un pendule, et établit et rompt alternativement le contact à de courts intervalles.

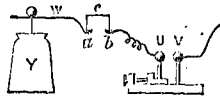


FIG. 31.

On commence à établir le contact en *ab*, et on charge les balles en faisant passer une étincelle entre UV; ensuite le contact est rompu en *ab*, et U mis à la terre.

Alors le contact est rétabli en *ab*, et tout l'appareil se décharge : toutes les opérations prennent moins de  $\frac{1}{10}$  de seconde.

## CHARGES ALTERNATIVES RAPIDES

Pour charger les balles M et R alternativement d'électricité (+) et (-), un fil *g* (fig. 32) les relie à un gros diapason *d* donnant 180 vibrations par seconde. Une lame de métal *e*, attachée à l'extrémité d'une des branches du diapason, touche alternativement les fils *h* et *i*, conduisant respectivement aux pôles (+) et (-) d'une machine de

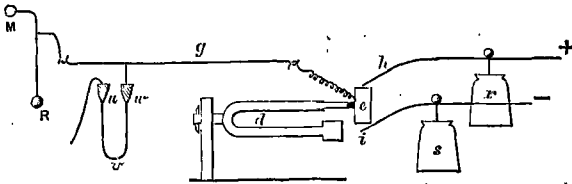


FIG. 32.

Holtz. Deux bouteilles de Leyde, *r* et *s*, maintiennent l'afflux d'électricité suffisamment constant.

Pour prévenir l'accumulation de l'une ou l'autre électricité, le fil *g* est réuni à la terre par un long tube de verre de très petit diamètre, *uvw*, rempli d'eau distillée. Cette dérivation permet à toute charge permanente de s'échapper lentement; mais, comme sa conductibilité est très faible, elle ne diminue pas sensiblement l'effet d'aucune des charges alternatives, pendant le  $\frac{1}{180}$  de seconde qu'elles durent.

## MANIÈRE DE COULER LES BALLES

Les balles de soufre et d'autres matières fusibles étaient coulées avec soin dans une sorte de moule à balles, et refroidies très lentement pour qu'elles ne présentent pas de cavités. Pour les empêcher de coller, l'intérieur du moule



était préalablement frotté d'un peu d'huile, ou, dans le cas des balles de résine, mouillé d'un peu d'eau distillée.

Les balles de résine n'étaient pas essuyées, mais on laissait l'eau s'évaporer.

Les balles de soufre étaient nettoyées avec soin, et déchargées de l'électrisation qu'elles pouvaient avoir prise par le frottement, en les passant à la flamme d'une lampe à alcool. Quelquefois on les déchargeait en les tenant longtemps suspendues sous une cloche de verre.

Les balles d'ébonite étaient faites au tour.

Deux balles de chaque matière ayant été choisies de poids aussi égaux que possible, on prenait la plus lourde pour en faire la « balle métallique », et on y perçait de petits trous jusqu'à ce qu'elle fût exactement de même poids que l'autre. On la dorait alors en la couvrant de feuilles d'or.

#### CORRECTIONS (1)

On tenait compte de l'effet des changements de potentiel de la balle active, en notant les déviations de la tige PP'.

Les déviations corrigées de la balance sont inscrites sous le nom « d'attractions réduites ».

On reconnut qu'une conduction lente par les fils de soie introduisait des erreurs dans les expériences, et on mit à la place des fils de gomme laque.

Pour montrer qu'il n'y aurait pas d'action de ce genre par les fils de gomme laque eux-mêmes, on suspendit la balle de soufre au petit crochet *o* (fig. 28), où elle était protégée par la boîte de papier doré, et on électrisa la balle active. La tige ne subit aucune déviation.

On tint compte de ce fait que la balle métallique et celle

(1) Quelques-unes de ces corrections ont été données dans un mémoire ultérieur, lu le 8 octobre 1874. *Wien. Sitz.*, vol. LXX, part. II, p. 307.

de soufre, quand elles sont attirées, n'arrivent pas au repos dans la même position, mais à des distances différentes de la balle active.

On introduisit une correction pour la petite différence de volume de la balle de soufre et de la balle de métal.

Enfin on reconnut nécessaire de recouvrir d'une feuille d'étain reliée à la terre la plus grande partie de la cage, qui, sans cette précaution, se chargeait peu à peu.

#### ÉLECTRISATION

Dans ces expériences, la surface de la balle active était chargée à un potentiel correspondant à une longueur d'étincelle de 1 à 3 millimètres.

Le rayon de cette balle était, dans les diverses expériences, de 20<sup>mm</sup>,5, et la distance des centres des balles était dans les diverses expériences de 49 à 62 millimètres.

Or, comme le potentiel décroît proportionnellement à la distance, le potentiel sur la surface équipotentielle passant par le centre de la ballé suspendue, sera de

$$\frac{20,5}{49} \text{ à } \frac{20,5}{62},$$

soit  $\frac{2}{3}$  à  $\frac{1}{3}$  de celui de la balle active.

D'après M. de la Rue (voir chap. xxxiv), le potentiel susceptible de produire une étincelle de 1 millimètre serait celui de 2000 éléments au chlorure d'argent; et pour une étincelle de 3 millimètres, de 3450 éléments.

Le potentiel auquel sont électrisées les balles suspendues serait donc celui de 600 à 800 éléments pour la petite étincelle, celui de 1100 à 1400 pour la grande.

Entre ces limites, on n'a pas observé de différences considérables de capacité.

## EFFET D'UNE CHARGE PROLONGÉE

Quand les balles de paraffine et de résine étaient chargées pendant longtemps, leur attraction augmentait. C'est là un phénomène de « charge résiduelle », ou, comme l'appelait Faraday, « d'absorption électrique ». Boltzmann lui donne le nom très expressif « d'action diélectrique ultérieure ».

Après une charge de cinq à dix minutes, on trouva que la balle de paraffine était attirée aussi fortement qu'une balle de métal, au lieu que l'attraction sur une balle de soufre n'avait pas du tout augmenté (1).

## RÉSULTATS

La table suivante donne les capacités inductives spécifiques calculées d'après des expériences où la charge ne durait que  $\frac{1}{360}$  à  $\frac{1}{64}$  de seconde, et qui par suite n'étaient pas compliquées des phénomènes de charge résiduelle.

A côté sont les nombres obtenus par la méthode du condensateur, et reproduits de la table de la page 141.

Diélectrique.	Capacité inductive spécifique	
	d'après les expériences d'attraction.	par la méthode du condensateur.
Soufre.....	3,90	3,84
Ebonite.....	3,48	3,15
Paraffine.....	2,32	2,32
Résine.....	2,48	2,55

## COMPARAISON DES RÉSULTATS

Les deux tables suivantes donnent le rapport des attractions observées pour des durées de charge différentes, et

(1) [Voir les expériences de M. Gauguin, appendice II.]

les capacités inductives spécifiques apparentes calculées d'après ces attractions :

Diélectrique.	E = rapport des attractions.					
	$\frac{1}{300}$ à $\frac{1}{64}$	0,9	1,8	$22\frac{1}{2}$	45	90
Soufre .....	2,033	»	2,125	»	2,110	»
Ebonite .....	2,211	»	2,064	»	2,094	»
Paraffine .....	3,269	2,980	2,920	»	1,420	»
Résine .....	3,025	2,140	1,927	1,730	1,700	1,650

Diélectrique.	Capacité inductive spécifique apparente.					
	$\frac{1}{300}$ à $\frac{1}{64}$	0,9	1,8	$22\frac{1}{2}$	45	90
Soufre .....	3,90	»	3,66	»	3,70	»
Ebonite .....	3,48	»	3,82	»	3,74	»
Paraffine .....	2,32	2,51	2,56	»	8,12	»
Résine .....	2,48	3,63	4,23	5,11	5,28	5,61

Nous voyons par cette table que, seule, la capacité du soufre présente des variations irrégulières, qu'il faut sans doute attribuer à des erreurs d'expériences (1). La capacité de l'ébonite paraît croître jusqu'à un certain maximum où elle reste constante. La paraffine montre un accroissement régulier, jusqu'à 1,8 seconde : à un certain point entre 1,8 et 45 secondes, il semble qu'il survient quelque changement dans sa structure, et la capacité devient très grande. Il est à regretter que le professeur Boltzmann n'ait pas fait d'expérience sur la paraffine pour une charge de  $22\frac{1}{2}$  secondes.

Pour la résine, l'accroissement paraît être parfaitement

(1) Il est probable que la balle était partiellement cristallisée, et son axe n'avait pas toujours la même direction dans les différentes expériences. Voir plus bas.

continu et régulier, jusqu'aux plus longues durées de charge dont il ait été fait usage dans les expériences.

Une autre série d'expériences (1), pour laquelle on avait pris diverses précautions spéciales, donna pour la paraffine :  $K = 2,343$ .

La durée de la charge n'est pas mentionnée, mais elle était probablement de  $\frac{1}{300}$  à  $\frac{1}{64}$  de seconde.

#### SOUFRE CRISTALLISÉ

Le 8 octobre 1874, le professeur Boltzman (2) lut un autre mémoire sur la capacité inductive spécifique du soufre cristallisé. Il trouva que la capacité inductive d'un cristal est différente dans différentes directions rapportées aux axes du cristal. Dans la théorie où l'on suppose que l'induction est un état de déformation, cette différence serait précisément celle à laquelle l'on devait s'attendre.

Nous savons qu'un cristal, de soufre par exemple, a trois « axes principaux d'élasticité », c'est-à-dire qu'il y a dans le cristal trois lignes principales le long desquelles les élasticités sont différentes.

Or la transmission d'une déformation dans un milieu dépend de l'élasticité du milieu suivant la direction de transmission, et par suite, la capacité inductive spécifique d'un diélectrique doit varier avec l'élasticité du diélectrique le long de la ligne de force électrique.

Dans les expériences du professeur Boltzmann, on préparait des sphères de soufre cristallisé, et on les suspendait en faisant faire à leurs axes différents angles avec la ligne de force électrique, et on mesurait alors l'attraction de la façon que nous venons de décrire.

(1) *Wiener Sitz.*, vol. LXIX, part. II, page 812.

(2) *Wiener Sitz.*, vol. LXX, part. II, page 342.

Voici les résultats obtenus pour le soufre,  $g$ ,  $m$  et  $k$  étant les trois axes principaux d'élasticité.

$$\begin{aligned} K_g &= 4,773 \\ K_m &= 3,970 \\ K_k &= 3,811 \text{ (1)}. \end{aligned}$$

#### EXPÉRIENCES DE ROMICH ET FAJDIGA (2)

Les expériences du professeur Boltzmann ont été continuées dans son laboratoire par deux de ses élèves, MM. Romich et Fajdiga. Leur mémoire fut lu le 8 octobre 1874.

L'objet de leur recherche était de déterminer si les différences d'attraction observées dépendaient des propriétés diélectriques de la balle, ou seulement de la nature de sa surface.

Dans le premier cas, une balle de soufre, revêtue d'une mince couche de paraffine, doit agir comme une balle de soufre; et comme une balle de paraffine, dans le second cas.

On fit une série d'expériences dont voici les résultats :

Nature de la balle.		E = Rapport des attractions.	
Balle de soufre	Non revêtue.....	{ 2,05 } { 2,07 }	2,06
	Revêtue de paraffine ...	{ 2,01 } { 2,12 }	2,06
	Revêtue de résine.....	.....	2,51
	Vernie à la gomme laque.	.....	2,01
Balle de paraffine	Non revêtue.....	.....	3,320
	Vernie à la gomme laque.	.....	3,314

(1) On verra dans la IV<sup>e</sup> partie l'importance de ces résultats.

(2) *Wiener Sitz.*, vol. LXX, part. II, page 367.

Ces expériences montrent clairement que l'attraction de la balle est déterminée par toute sa masse, et non par sa surface.

La seule exception apparente est celle de la balle couverte de résine ; mais les auteurs expliquent que la couche de résine était si épaisse qu'elle formait une fraction importante de la masse de la balle.

#### EXPÉRIENCES DE ROMICH ET NOWAK (1)

A la même séance de l'Académie, on lut un autre mémoire de MM. Romich et Nowack, ce dernier également élève au laboratoire du professeur Boltzmann. Le but principal de ces recherches était d'examiner, pour différentes substances, l'absorption électrique ou « action ultérieure ».

A cet effet, on avait fait deux séries de mesures. Dans les unes, la charge était renversée 64 fois par minute, un peu plus d'une fois par seconde ; dans les autres, la balle active demeurait chargée de la même manière pendant toute la durée de l'expérience.

La table suivante donne les résultats. La balle souffre-graphite avait été faite en mêlant du graphite pulvérisé à du soufre fondu.

(1) *Wiener Sitz.*, vol. LXX, part. II, page 380.

Diélectrique.	Capacité inductive spécifique	
	déterminée par les charges alternatives.	déterminée par la charge permanente.
Verre .....	7,5	159
Spath fluor.....	1 6,7	7,1
	2 7,2	9,9
	3 6,7	7,9
Quartz.....	1 4,6	$\infty$
	2 4,6	1000
Spath d'Irlande	Perpendiculaire à l'axe optique .....	
	7,7	9,9
	7,5	8,5
	8,4	8,6
Sélénium	Autre balle.....	
	10,2	151
	$\infty$	35
Sulfure et graphite.....	Plus tard.....	
	$\infty$	201
Une autre balle de sélénium	59	49
	8,4	56
Sulfure et graphite.....	24 heures après la fusion.	
	116	126
	4,0	4,4

Quand la capacité inductive est inscrite comme  $\infty$  (infini), ou très grande, cela signifie que les attractions sur les balles de métal et de diélectrique sont sensiblement égales (1).

(1) La capacité inductive spécifique de tous les bons conducteurs est infinie, comme on peut le voir par la formule (2) de la page 140. On se souvient, en effet, que l'introduction d'une couche d'épaisseur  $n$  et de capacité inductive spécifique  $K$  dans un condensateur à air, augmente sa capacité, comme si la distance des plateaux avait varié de  $m$  à  $m - n + \frac{n}{K}$ . Mais si une lame métallique d'épaisseur  $n$  était introduite, la capacité augmenterait comme si la distance des plateaux avait diminué de  $m$  à  $m - n$ . Ceci est évident si nous supposons que la lame métallique touche un des plateaux du condensateur. Ainsi, la capacité devra correspondre à la fois à la distance

$$m - n$$

et à la distance

$$m - n + \frac{n}{K}$$

Ce qui ne peut être vrai que si  $\frac{n}{K} = 0$ , ou  $K = \infty$ .



Ces expériences semblent montrer que, pour les matières imparfaitement isolantes, la capacité inductive spécifique croît indéfiniment, à mesure que la charge continue. Il est difficile de dire quelle est la durée de charge assez courte pour donner la capacité instantanée vraie.

Mais avec des isolants parfaits, la capacité semble une quantité assez constante.

#### EXPÉRIENCES DE SCHILLER (1)

En 1874, Schiller publia le compte rendu de quelques expériences sur la capacité inductive spécifique, au moyen de la méthode des « oscillations électriques » ; dans cette méthode, le condensateur n'était chargé que pendant environ  $\frac{1}{20000}$  de seconde. La méthode sera décrite à la fin du chapitre XXIX.

Il a fait aussi quelques expériences par une méthode plus lente, où la charge durait chaque fois  $\frac{1}{25}$  de seconde.

Dans cette méthode, un condensateur était chargé et déchargé à travers un « galvanomètre » environ 20 à 25 fois par seconde (2).

Le rapport des déviations de l'aiguille, selon qu'il y avait dans le condensateur de l'air ou d'autres diélectriques, donnait le rapport des charges du condensateur dans ces différents cas, c'est-à-dire le rapport de ses capacités. On obtint les résultats suivants :

(1) *Pogg. Ann.* 152, 1874, page 535.

(2) Un galvanomètre est un instrument qui mesure la quantité totale d'électricité qui le traverse dans une seconde, voir chap. XIX.

Diélectrique.	Capacité inductive spécifique.		Durée de la charge.
	Méthode lente.	Méthode d'oscillation.	
			secondes.
Ébonite .....	2,76	2,21	0,0000652
Caoutchouc brun.....	2,34	2,12	0,0000630
Id. vulcanisé.....	2,94	2,69	0,0000706
Paraffine refroidie brusquement et presque transparente.....	1,92	1,68	0,0000568
Paraffine refroidie lentement, blanche .....	2,47	1,81	0,0000858
Paraffine, autre plateau.....		1,89	0,0000580 0,0000898
Verre demi-opaque « Halbweises ».....	»	2,96	0,0000752
Autre plateau .....	»	3,66	0,0000838
*Verre « kalk-weises ».....	4,12	»	»
Verre transparent.....	6,34	5,78 5,88	0,0000859 0,0001281

## EXPÉRIENCES DE SILOW (1)

En 1875, Silow publia le résultat de quelques expériences sur la capacité inductive spécifique des liquides.

Il employait un électromètre, de la forme représentée en plan sur la figure 33, consistant en un vase cylindrique de verre revêtu d'étain à l'intérieur.

Ce revêtement d'étain n'était pas continu, mais formait quatre quadrants réunis de la même manière que dans l'électromètre de Thomson. L'aiguille consistait en une tige légère portant à ses extrémités des pièces métalliques recourbées parallèlement aux parois du cylindre.

Le cylindre pouvait être rempli de divers liquides.

(1) *Pogg. Ann.* 156, 1875, page 389.

L'aiguille était toujours reliée à la terre.

On notait d'abord la déviation produite par une pile donnée, quand le cylindre était vide, c'est-à-dire quand il n'y avait que de l'air entre les pièces métalliques de l'aiguille et le cylindre.

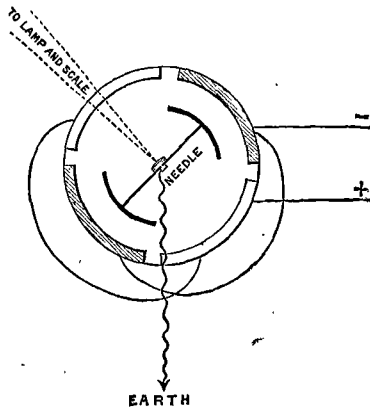


FIG. 33. — Needle = Aiguille. To lamp and scale = A la lampe et à l'échelle.  
Earth = Terre.

Le cylindre étant rempli, la déviation due à la même pile augmentait, parce que le liquide a la propriété de transmettre plus facilement l'induction. Du rapport des deux déviations, on peut déduire la capacité inductive spécifique du liquide.

Si l'électromètre avait été parfaitement symétrique, la capacité inductive spécifique du liquide aurait été exprimée simplement par le rapport des déviations ; mais comme il est impossible d'éviter certaines irrégularités de construction, on graduait l'instrument, en observant une série de déviations produites par des piles de différentes puissances.

Les déterminations suivantes ont été faites pour l'huile de térébenthine, en opérant sur deux échantillons. Dans une série d'expériences, Silow a trouvé pour l'un :

	Capacité inductive spécifique.
Huile de térébenthine I.....	2,277
	2,279
	2,2505
—	moyenne..... 2,2688

pour l'autre :

Huile de térébenthine II.....	2,173
-------------------------------	-------

#### DEUXIÈME MÉTHODE DE SILOW (1)

En 1876, le même auteur publia un compte rendu de quelques nouvelles expériences, faites par une autre méthode.

Dans cette méthode, on emploie un condensateur, une pile et un galvanomètre. Au moyen d'un « commutateur rapide » (2), alternativement on charge le condensateur par la pile, et on le décharge à travers le galvanomètre, de 900 à 1500 fois par minute; c'est-à-dire que 900 à 1500 charges du condensateur traversent le galvanomètre dans une minute.

Or, comme la déviation du galvanomètre dépend de la quantité totale d'électricité qui le traverse dans un temps donné, elle indiquera, si la vitesse est uniformé, la valeur moyenne des charges du condensateur. En faisant successivement les expériences avec l'air et les autres diélectriques, on peut calculer les capacités inductives spécifiques de ces derniers.

(1) *Pogg. Ann.* 158, 1876, page 306.

(2) Chapitre XIX, planche XXI.

On a obtenu les résultats suivants :

Diélectrique.	Capacité inductive spécifique.	
Huile de térébenthine II.....	2,153	
Pétrole, 2 échantillons {	I.....	2,071
	II.....	2,037
Benzol cristallisé.....	2,198	

#### EXPÉRIENCES DE WÜLLNER (1)

En 1877, Wüllner a publié le compte rendu de quelques déterminations de capacité inductive spécifique de différentes substances.

Il a employé deux méthodes. Dans la première, le condensateur était formé de deux plateaux métalliques horizontaux. Le plateau inférieur était relié à la terre, et supportait le diélectrique; celui du dessus était suspendu horizontalement par une corde passant sur une poulie, de façon que l'on pût l'élever ou l'abaisser. La distance des plateaux se mesurait au moyen d'un microscope.

Le condensateur étant chargé, on observait le potentiel :  
1° quand le diélectrique était entre les deux plateaux ;  
2° après qu'il avait été retiré.

Le rapport des capacités du condensateur était alors l'inverse du rapport des potentiels dans ces deux cas.

Pour calculer les effets de la déperdition, on soulevait le plateau supérieur au-dessus du reste du condensateur, avant et après chaque opération, et l'on mesurait sa charge.

La différence des deux mesures représentait la perte durant l'expérience.

(1) *Sitzungsber-königl. bayer. Akad.*, 1877, page 1.

## DEUXIÈME MÉTHODE DE WÜLLNER

On reconnut toutefois que la méthode précédente était fort peu rigoureuse, et l'on en adopta une autre. On employait le même condensateur, mais on obtenait un potentiel constant au moyen d'une pile de 12 éléments, dont un des pôles extrêmes était mis à la terre.

Le condensateur était chargé par la pile, et sa charge mesurée avec un électromètre de torsion, et exprimée en fonction du nombre de degrés de torsion nécessaire pour ramener l'aiguille déviée à une position de zéro constante.

On obtint les résultats suivants :

Diélectrique.	Capacité inductive spécifique
Paraffine.....	1,96
Ébonite .....	2,56
Soufre.....	2,88 — 3,21
Gomme laque { I.....	3,73
{ II.....	2,95
Verre .....	6,10

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES DE WÜLLNER

Wüllner arrive aux conclusions générales suivantes sur le sujet qui nous occupe :

« L'épaisseur du diélectrique n'influe pas sur sa capacité inductive spécifique.

» La capacité augmente si l'électrisation se prolonge, rapidement d'abord, plus lentement ensuite, et s'approche graduellement d'un maximum fixe.

» La capacité que l'on atteint au bout d'un temps donné augmente par la répétition fréquente des expériences sur le même plateau, et aussi par la durée des charges.

Par des charges fréquentes, on produit dans le soufre un accroissement de capacité qui dure très longtemps.

» Ce changement n'est pas permanent, mais disparaît graduellement au bout d'un temps assez long.

» *La capacité instantanée (c'est-à-dire la capacité lorsque la charge ne dure qu'une très petite fraction de seconde) est de nature tout autre que la capacité qui croît lentement avec la durée de l'électrisation. La « capacité instantanée » est indépendante de la conductibilité; il n'en est pas de même de la « capacité lente ».*

Si les conclusions précédentes sont confirmées par des expériences ultérieures, elles expliqueront sans doute le désaccord marqué des résultats des divers observateurs; car, dans des expériences de durées différentes, les capacités observées sont dues en partie à la capacité instantanée, en partie à la valeur que la capacité lente peut avoir atteinte à la fin de l'expérience. Cette manière de voir est corroborée par ce fait que les résultats des divers observateurs s'accordent bien mieux pour les bons isolants que pour les mauvais; or, dans cet ordre d'idées, les deux capacités seraient égales dans un isolant parfait.

#### EXPÉRIENCES DE M. HOPKINSON SUR LE FLINTGLASS DES APPAREILS D'OPTIQUE (1)

Le 17 mai 1877, un mémoire du docteur Hopkinson « sur la capacité électro-statique du verre » fut communiqué à la Société Royale.

Les instruments employés étaient :

1° Le condensateur à glissement, construit pour les expériences de MM. Gibson et Barclay (2);

(1) *Phil. Trans.*, 1878, page 17.

(2) *Voy.* page 136.

- 2° Un électromètre Thomson (modèle de White);
- 3° Une pile de 42 éléments Daniell, dont le milieu était relié à la terre (1).

Il suffit, pour ce qui nous occupe, de savoir que c'est là une disposition qui permet d'avoir simultanément des potentiels égaux et contraires.

4° Un condensateur à anneau de garde.

Cet instrument consiste en un disque de cuivre isolé fixe  $k$  (fig. 34, 35), entouré d'un anneau plat, en sorte que le disque et l'anneau forment ensemble un large plateau circulaire, avec un espace annulaire d'un millimètre autour du disque.

Au-dessous est un autre plateau  $e$ , plus grand que le disque, que l'on peut élever ou abaisser au moyen d'une vis micrométrique.

Les lames de verre à examiner étaient placées entre  $e$  et  $k$ , de manière à former le diélectrique du condensateur à anneau de garde.

Le verre ayant été introduit, on déplace le condensateur à glissement jusqu'à ce qu'il ait la même capacité que le condensateur à anneau de garde, et l'on fait la lecture de la vis du plateau  $e$ . On retire la lame de verre, ce qui diminue la capacité du condensateur à anneau de garde.

$e$  est alors soulevé, au moyen de la vis, jusqu'à ce que la capacité soit égale de nouveau à celle du condensateur à glissement.

On fait de nouveau la lecture de la vis, et de la différence des lectures on peut déduire par calcul la différence de capacité produite par le verre.

(1) Voy. chapitre XVIII.



## COMPARAISON DES CONDENSATEURS

L'égalité des condensateurs est déterminée comme il suit : nous comparons le condensateur à glissement avec celui qui est formé de  $k$  et  $e$ , sans le plateau de garde.

Les communications sont établies comme sur la figure 34, et la pile charge le disque  $k$  et son plateau de garde d'une

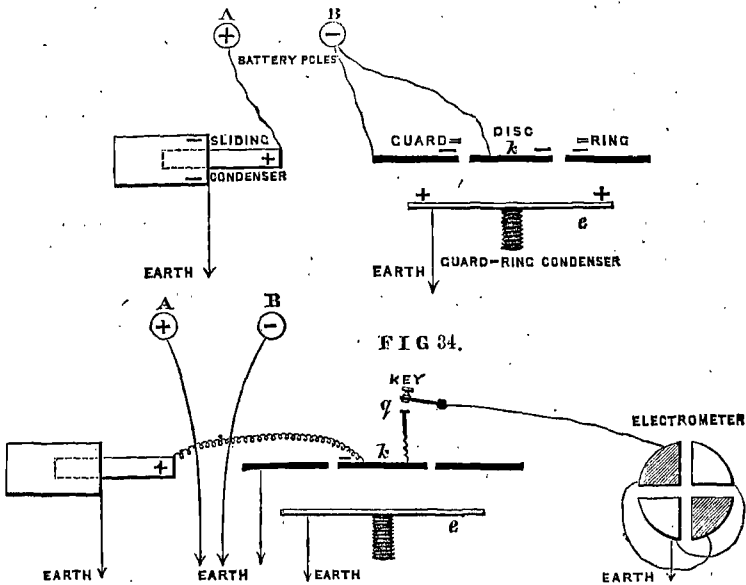


FIG 34.

Fig. 34 et 35. — *Battery poles* = Pôles de la pile. *Sliding condenser* = Condensateur à glissement. *Guard-ring* = Anneau de garde. *Disc* = Disque. *Guard-ring condenser* = Condensateur à anneau de garde. *Key* = Clou. *Electrometer* = Électromètre. *Earth* = Terre.

part, l'armature intérieure du condensateur à glissement de l'autre, à des potentiels égaux et contraires.

Si les capacités sont égales, les charges seront aussi égales et contraires. Si les capacités sont inégales, les charges seront inégales.

Par un mouvement brusque d'un « commutateur » ingénieusement combiné, les communications sont transformées en celles de la figure 35.

La pile, mise à la terre, n'exerce plus d'action, et la charge (+) du condensateur à glissement se combine à la charge (—) de  $k$ .

Si les capacités sont égales, la charge résultante sera zéro.

Pour vérifier qu'il en est ainsi, on établit immédiatement le contact en  $q$  (fig. 35), ce qui met les condensateurs en communication avec l'électromètre.

Si les capacités sont égales, il n'y aura pas de déviation.

Si le condensateur à glissement est le plus grand, il y aura une déviation (+), et il faut soulever  $e$ ; si le condensateur à anneau de garde est le plus grand, il y a une déviation (—), et il faut abaisser  $e$ .

Le seul usage du plateau de garde est de faciliter le calcul; car, ainsi que nous l'avons dit en traitant de l'électromètre absolu, la distribution de l'électricité est compliquée sur les bords d'un plateau, mais uniforme près du centre. L'effet de l'anneau de garde est de faire de  $k$  un plateau où tout est centre.

On a obtenu les résultats suivants :

Espèce du verre (1).	Densité.	Capacité inductive spécifique.	C. I. S. densité
Flint très léger.....	2,87	6,57	2,29
Flint léger.....	3,2	6,85	2,14
Flint lourd.....	3,66	7,4	2,02
Flint double extra lourd.....	4,5	10,1	2,25

(1) Ces verres sont ceux que font MM. Chance pour des usages optiques.

D'après ces expériences, il semble qu'il y ait quelque relation entre la densité et la capacité : il est probable cependant que cette relation n'a pas une grande importance.

## EXPÉRIENCES DE GORDON (1)

La grande difficulté qu'ont rencontrée tous ceux qui ont étudié la capacité inductive spécifique, tient à ce fait que, si un diélectrique est chargé pendant un temps appréciable, une partie de la charge est « absorbée », et les observations sont compliquées des phénomènes de « charge résiduelle ».

L'auteur a fait quelques expériences sur la capacité inductive spécifique de diverses substances, par une méthode où l'on se garantit de deux manières des effets d'absorption.

1° Les plateaux métalliques électrisés du condensateur ne touchent pas le diélectrique, et

2° La charge ne dure que  $\frac{1}{12000}$  de seconde.

## LA BALANCE D'INDUCTION (pl. VIII, IX, X)

Le principal instrument dont je me sers est un condensateur très compliqué appelé la « balance d'induction », dont l'idée générale est due à Sir William Thomson et au professeur Clerk Maxwell.

Il est essentiellement formé de cinq disques métalliques circulaires et parallèles, *abcde*; *bcd*e sont fixes; *a* peut être déplacé parallèlement à lui-même au moyen d'une vis. *ace* ont 15 centimètres de diamètre, *b* et *d* 10 centimètres.

(1) *Phil. Trans.*, 1879, page 417.

Il y a un espace d'environ 2,5 cent. entre chaque plateau et le suivant.

Nous allons donner les détails de sa construction; mais, auparavant, nous en expliquerons le mode d'emploi.

#### THÉORIE DE LA BALANCE D'INDUCTION (pl. VIII)

La source d'électricité (les pôles d'une bobine sur la planche VIII) est susceptible de fournir des potentiels égaux et opposés. Quand nous employons le double signe ( $\pm \mp$ ), cela signifie que le signe de l'électrisation peut être inversé rapidement. Pour l'instant, nous supposons que les électrisations de toutes les parties de l'appareil aient le signe supérieur, et que l'inverseur ne fonctionne pas.

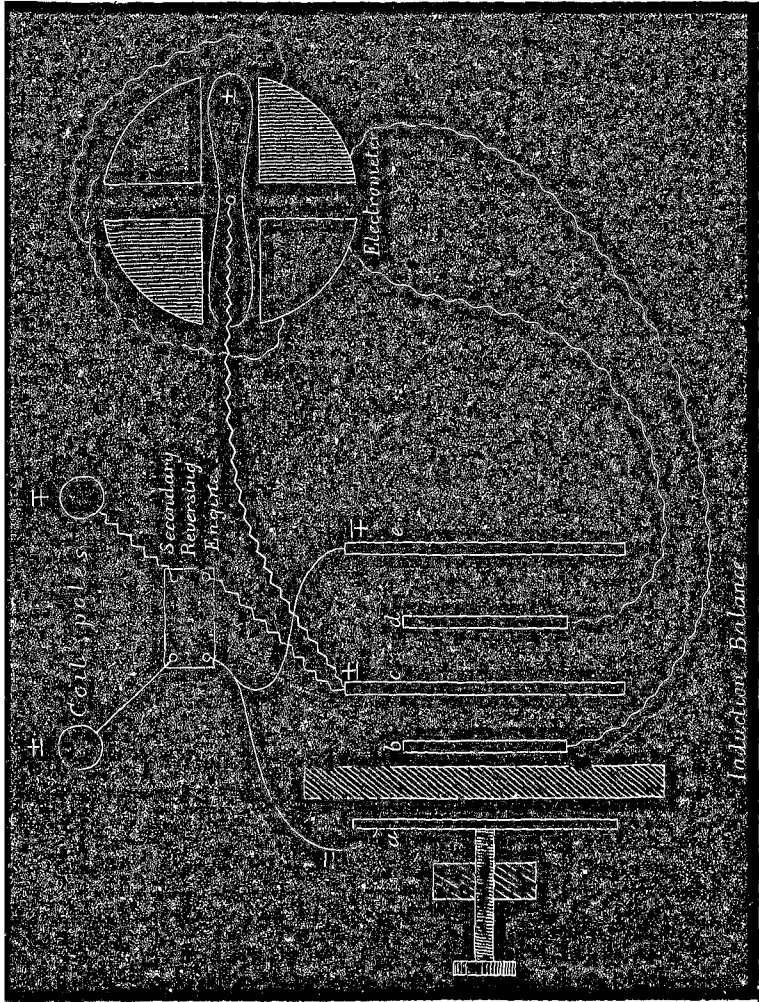
On voit que l'un des pôles de la bobine est relié aux plateaux extérieurs  $a$  et  $e$ , et l'autre au plateau du milieu  $c$ .

Les deux petits plateaux  $b$  et  $d$  sont reliés aux quadrants d'un électromètre.

Le plateau central  $c$  ne peut causer aucune déviation de l'aiguille : car, étant placé à égale distance des petits plateaux, il produit des charges égales et de même signe sur chacun d'eux, et, par suite, sur les quadrants.

Les plateaux extérieurs ne produisent pas non plus d'effet sur l'aiguille, tant qu'il n'y a que de l'air dans la balance, et qu'ils sont symétriquement placés, c'est-à-dire tant que la distance  $ab$  est égale à la distance  $ed$ .

Mais si, au moyen de la vis, on écarte  $a$  de  $b$  (de façon à rendre la distance  $ab$  plus grande que  $ed$ ), l'action inductive de  $a$  sur  $b$  sera *moindre* que celle de  $e$  sur  $d$ , et l'aiguille sera déviée dans le sens qui montre que les quadrants non couverts de hachures sont les plus fortement électrisés.



PL. VIII. — Diagramme de la balance d'induction.

Coil poles = Pôles de la bobine. Secondary Reversing Engine = Inverseur secondaire. Electrometer = Électromètre.  
 Induction balance = Balance d'induction.



Mais si, d'autre part, un diélectrique de capacité inductive spécifique plus grande que celle de l'air, est placé entre  $a$  et  $b$ , l'action inductive de  $a$  sur  $b$  sera plus grande que celle de  $c$  sur  $d$ , et l'aiguille sera déviée en sens inverse.

Il est clair que, si nous introduisons un diélectrique et si, en même temps, nous éloignons  $a$  de  $b$  au moyen de la vis, nous trouverons pour  $a$  une position telle que l'accroissement d'induction dû au diélectrique soit exactement compensé par la diminution causée par l'éloignement, en sorte que l'aiguille reste au zéro.

La distance dont il faudra déplacer  $a$  pour compenser une lame diélectrique donnée, ne dépendra que de l'épaisseur de cette lame et de sa *capacité inductive spécifique*.

Dans les expériences, on lit la position de  $a$  qui amène au zéro l'aiguille de l'électromètre : 1° quand il n'y a que de l'air dans la balance ; 2° quand on a introduit le diélectrique.

La différence de ces lectures est la distance dont on a déplacé  $a$  ; on mesure l'épaisseur du diélectrique, et l'on peut calculer la capacité inductive spécifique par la formule suivante :

#### FORMULE POUR LE CALCUL (1)

Soient  $a_1$  la lecture de  $a$  quand il n'y a que de l'air dans la balance, et  $a_2$  la lecture quand on a introduit le diélectrique ; alors  $(a_2 - a_1)$  est la distance dont  $a$  a été déplacé.

Une lame diélectrique d'épaisseur  $b$ , et de capacité inductive spécifique  $K$ , agit comme une couche d'air d'épais-

(1) Comparez page 139.

seur  $\frac{b}{K}$ . C'est-à-dire qu'un condensateur, dont le diélectrique a l'épaisseur  $b$  et la capacité inductive spécifique  $K$ , est égal à un condensateur semblable ayant pour diélectrique une lame d'air d'épaisseur  $\frac{b}{K}$ .

Il faut nous rappeler qu'en introduisant dans la balance une lame diélectrique d'épaisseur  $b$ , on déplace une couche d'air de la même épaisseur  $b$ .

L'effet de l'introduction du diélectrique est d'*accroître* la capacité du condensateur formé des plateaux  $a$  et  $b$  de la même quantité que si nous avions rapproché les plateaux de la distance  $b$  et si nous les avions ensuite écartés de  $\frac{b}{K}$ ; c'est-à-dire ( $b$  étant plus grand que  $\frac{b}{K}$ ), comme si nous avions diminué la distance des plateaux de  $b - \frac{b}{K}$ .

Mais en déplaçant  $a$  de façon à maintenir l'aiguille au zéro, nous avons produit une *diminution* de capacité exactement égale, en augmentant la distance entre  $a$  et  $b$  d'une quantité  $(a_2 - a_1)$ . Il est clair que cet accroissement effectif de distance doit être exactement égal à la diminution théorique de distance produite par le diélectrique, et nous devons avoir :

$$b - \frac{b}{K} = (a_2 - a_1);$$

ou, en d'autres termes :

$$K = \frac{b}{b - (a_2 - a_1)}.$$

Cette formule servait à calculer les résultats des expériences.



Remarquons que nous n'avons pas besoin de connaître les distances  $a_1b$  ou  $a_2b$ , mais seulement leur différence, qui est bien plus aisée à mesurer.

#### LES INVERSIONS DE COURANT

Jusqu'à présent, nous avons supposé l'aiguille chargée positivement à la façon ordinaire. Supposons que l'équilibre n'est pas établi, que l'action de  $a$  est plus grande que celle de  $e$ , et que les électricités ont les signes supérieurs :  $a$  et  $e$  induiront de l'électricité (+) sur  $b$  et  $d$ , et de l'électricité (—) sur les quatre quadrants; l'électrisation des quadrants ombrés sera la plus énergique, et l'aiguille tournera vers la droite (dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre).

Supposons maintenant l'électrisation des plateaux *acc* inversée quant au signe, mais gardant la même valeur numérique qu'auparavant.  $a$  et  $e$  induiront une charge (—) sur  $b$  et  $d$ , une charge (+) sur les quadrants. Les quadrants ombrés seront toujours les plus fortement électrisés, mais l'aiguille tournera vers la *gauche*. Il est clair que, si les inversions se succèdent rapidement, l'aiguille ne recevra que des impulsions alternant rapidement dans les deux directions, et qu'aucune perturbation dans l'équilibre ne produira de déviation.

Pour échapper à cette difficulté, le professeur Clerk Maxwell a imaginé de réunir l'aiguille au plateau  $c$ , au lieu de lui donner une charge permanente.

Le signe de la charge de l'aiguille est ainsi renversé en même temps que la charge de la balance.

Supposons que les électrisations aient le signe supérieur, et que les quadrants ombrés soient les plus énergiques. Les quadrants seront (—), et l'aiguille (+); et la force

étant attractive, l'aiguille tourne à droite. Supposons maintenant l'électrisation inversée, les quadrants seront (+), l'aiguille (—); la force sera toujours attractive, et la déviation dans le même sens qu'auparavant.

Dans la pratique, lorsque les électrisations des cinq plateaux, du diélectrique, de l'aiguille et des quatre quadrants étaient inversées 12 000 fois par seconde, la déviation de l'aiguille était parfaitement stable, et obéissait exactement à la vis du plateau *a*.

Un déplacement de *a* de  $\frac{1}{1000}$  de pouce (0<sup>mm</sup>,025) déplaçait généralement l'image lumineuse sur l'échelle de l'électromètre de 1 millimètre.

Les inversions rapides (12 000 par seconde) étaient obtenues au moyen d'une bobine d'induction (1), et d'un interrupteur rapide (2), qui sont décrits à la troisième partie (voir chap. xxxiii).

L'inverseur secondaire (3), décrit au chapitre xix, servait à inverser encore les électrisations sur leur trajet vers la balance, 30 fois par seconde environ, dans le cas où il y aurait eu quelque prépondérance de l'électricité (+) ou de l'électricité (—) après la première inversion.

#### DÉTAIL DES COMMUNICATIONS (pl. IX)

La planche IX est un plan du laboratoire, montrant la disposition de tous les instruments et de leurs fils de communication.

Le lecteur qui ne connaît pas la théorie de la bobine d'induction est invité à différer l'étude de cette planche jusqu'à ce qu'il ait lu le chapitre xxxiii.

(1) Planche xxxii.

(2) Planche xxxiii

(3) Planche xxi.

DÉTAILS SUR LA BALANCE D'INDUCTION (pl. X et fig. 36 et 37).

La planche X montre en perspective la balance d'induction et l'électromètre.

L'électromètre est renfermé dans une boîte de bois sur la droite du dessin, et l'on voit en arrière sa lampe, son échelle et sa lentille. La bougie, placée à gauche, éclaire la graduation de l'échelle du plateau *a*.

#### DIMENSIONS

La hauteur totale de la balance d'induction est de 0<sup>m</sup>,66, et la grandeur de la table représentée sur la planche X est de 1<sup>m</sup>,38 sur 0<sup>m</sup>,92.

#### LA TABLE D'ARDOISE

L'ensemble de l'appareil est porté sur une table massive en brique et en ardoise, reposant elle-même sur un massif de brique isolé du plancher du laboratoire. De cette manière, les mouvements des personnes autour de l'appareil ne lui communiquent aucune vibration.

#### LA BALANCE

Les plateaux *bcd*e sont supportés d'en haut par des tiges d'acier. Chaque tige est vissée par le bas dans le bord supérieur d'un plateau, par le haut dans une cheville d'ébène, qui est elle-même fixée à une petite pièce triangulaire de laiton horizontale et munie à ses angles de vis calantes. Ces vis reposent sur un bâti de laiton plan, percé d'une rainure pour le passage de la tige. Comme il n'y aurait pas de place pour tous les triangles côte à côte, il y a deux bâtis l'un au-dessus de l'autre.

Les plateaux *c* et *e* sont suspendus au bâti inférieur ;

*b* et *d*, qui sont munis de tiges plus longues, au bâti supérieur. Lorsque les triangles sont réglés, on les assujettit au moyen de vis portées par le bâti supérieur pour *c* et *e*, et par un troisième bâti fait spécialement dans ce but, pour *b* et *d*. Quatre forts piliers de laiton supportent les trois bâtis superposés : leurs pieds sont vissés dans une forte plaque de

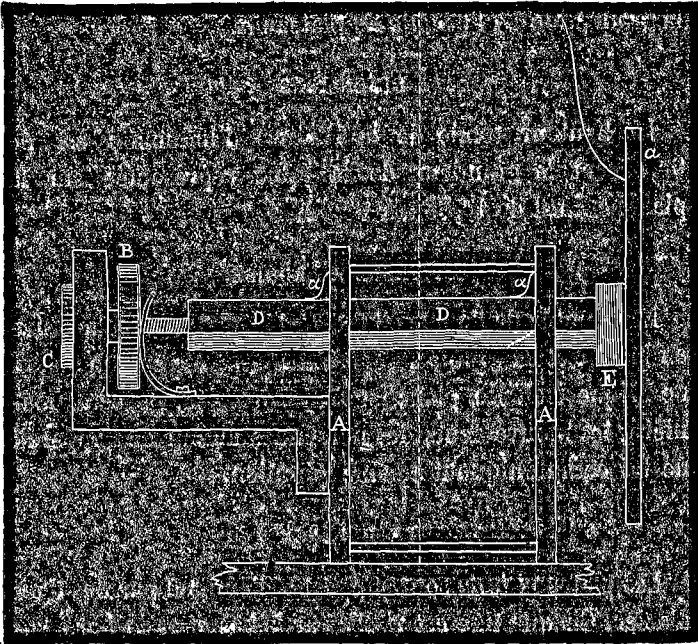


FIG. 36.

laiton encastrée dans la base en bois de l'instrument. Sur cette plaque reposent aussi les piliers qui portent le plateau *a*.

Le plateau *a* est fixé au bout d'une tige de laiton D et dont il est isolé par un bloc d'ébonite (E, fig. 36). Cette tige glisse sur deux



piliers (AA, fig. 36 et 37), qu'elle ne touche que par ses faces inclinées (fig. 37), et contre lesquels elle est appliquée par de forts ressorts ( $\alpha\alpha$ , fig. 36 et 37), agissant de haut en bas. Elle peut être déplacée en avant ou en arrière, au moyen d'une vis B qu'un ressort applique en C (fig. 36) sur une platine d'acier trempé. A l'intérieur de D, la vis tourne dans deux colliers, l'un fixé à D, l'autre seulement empêché de tourner et tenu écarté du premier par un fort ressort à boudin. Cette disposition prévient ce qu'on appelle le « temps perdu » ; en d'autres termes, elle assure que le renversement du sens du mouvement longitudinal se fera en même temps que le renversement du mouvement de la vis.

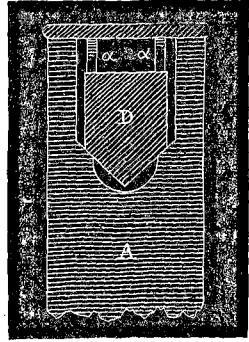


FIG. 37.

Une échelle divisée en  $\frac{1}{50}$  de pouce (demi-millimètres) est gravée sur D, et un vernier fixé à l'un des supports permet de lire la position du plateau  $\alpha$  à  $\frac{1}{1000}$  de pouce ( $\frac{1}{50}$  de millimètre). Cette lecture se fait au moyen d'un microscope fixé, à environ 7<sup>o</sup>,5 de distance, sur la cage de l'instrument : il est figuré sur la planche X, juste au-dessus de la bougie.

Les cinq plateaux sont renfermés dans une cage de verre semblable à celle d'une balance, d'environ 37<sup>o</sup>,5 de long. Elle passe en dessous des bâtis, et des trous dans la glace supérieure laissent pénétrer les quatre tiges d'acier. Un trou sur le côté sert de passage à la tige D, en sorte que  $\alpha$  est à l'intérieur de la cage et la tête de vis au dehors.

La ligne pointillée de la figure 36 montre la position de la paroi de verre de la cage.

Les cinq plateaux sont à un des bouts de la cage. Sur le fond et à l'intérieur sont des coulisses, dans lesquelles glissent les chariots portant les diélectriques. Ces chariots sont déplacés au moyen de tiges sortant hors de la cage. Ainsi, un diélectrique que l'on examine peut être mis entre deux plateaux, et en être retiré sans ouvrir la cage de verre.

Sur les bâtis fixes du haut sont des colonnes d'ébonite portant des vis à contre-écrous. A l'écrou inférieur est attaché un boudin de fil flexible communiquant à un des plateaux par l'intermédiaire de la tige d'acier. Au moyen des contre-écrous, on relie les plateaux aux autres instruments.

#### LE MÉCANISME DU CHARIOT

L'un des chariots, celui qui sert à introduire le diélectrique entre  $a$  et  $b$  (1), a des « mouvements mécaniques ». Outre la tige qui le fait avancer ou reculer, il y a trois autres tiges parallèles à têtes filetées. En tournant l'une, on donne un mouvement latéral, c'est-à-dire qu'on rapproche de  $a$  ou de  $b$  un diélectrique placé sur le chariot. En tournant la seconde, on peut mettre la lame de diélectrique exactement dans la verticale, ou l'incliner un peu dans un sens ou dans l'autre. En tournant la troisième, on donne au diélectrique un petit mouvement angulaire autour d'un axe vertical.

#### LE COUVERCLE DE LAITON

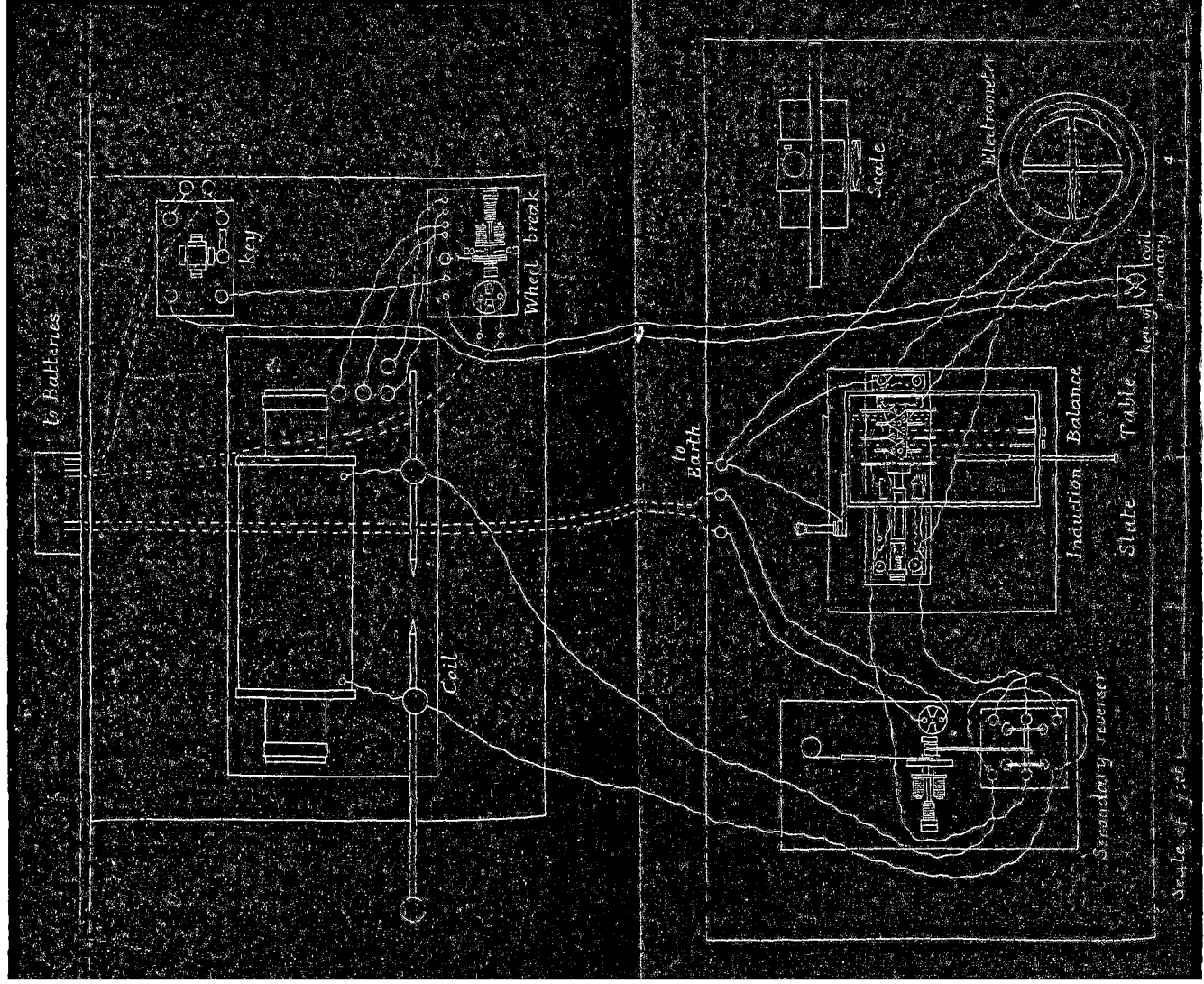
Le bâti supérieur, qui porte les communications des petits plateaux  $b$  et  $d$ , est renfermé dans une boîte de laiton.

(1) C'est le seul chariot qui ait été employé dans le travail dont il s'agit.



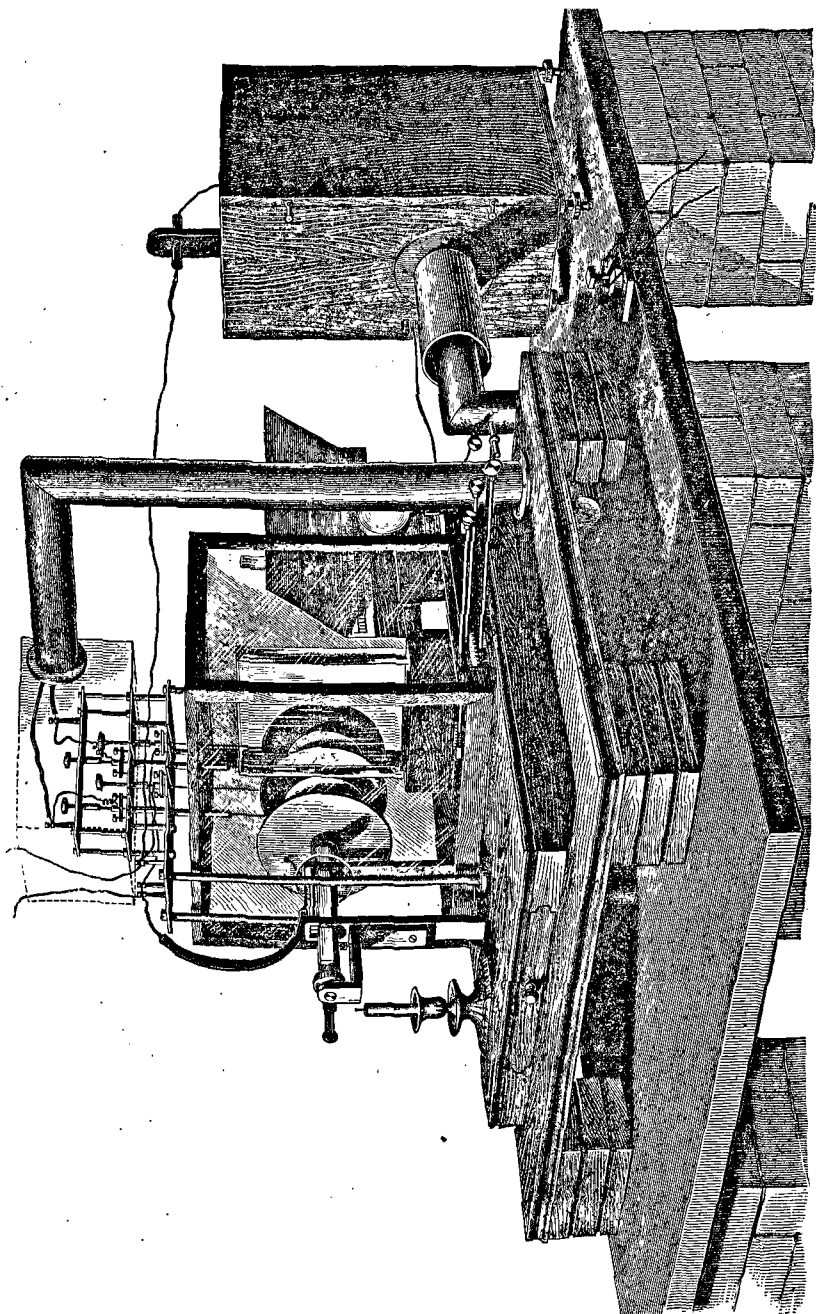






Pl. IX. — Plan des communications de la balance d'induction.  
 To Batteries = Aux piles. Key = Clef. Coil = Bobine. Wheel break = Interrupteur à roue. To earth = A la terre.  
 Secondary reverser = Inverseur secondaire. Induction Balance = Balance d'induction. Scale = Echelle.  
 Electrometer = Electromètre. Key of coil = Clef de la bobine. Slate Table = Table d'artoise.





Pl. X. — La balance d'induction statique, sur sa table d'ardoise et son massif de briques.



ton, figurée en pointillé sur la planche X. Les tiges d'acier appartenant aux plateaux *c* et *d* sont enfermées dans des tubes de métal.

Les fils conducteurs qui relient à l'électromètre les bornes des petits plateaux fixées au bâti supérieur sont aussi renfermés dans un large tube de laiton. L'électromètre lui-même est enfermé dans une boîte de bois revêtue de feuilles d'étain. Une petite fenêtre, qu'on ne voit pas, laisse entrer et sortir la lumière de la lampe. Boîte, tube et feuilles d'étain sont soigneusement reliés à la terre. Le tube traverse la base de la balance, afin que l'on puisse mettre et enlever, sans toucher aux communications, l'abri en verre (non figuré) qui couvre l'instrument lorsqu'on ne s'en sert pas.

#### AUTRES DÉTAILS

Le fil qui passe au-dessus de l'électromètre relie le plateau *c* à l'aiguille.

La petite cheville que l'on voit en avant du dessin ferme et ouvre le circuit primaire (voir chap. xxxiii), c'est-à-dire fait commencer ou cesser l'électrisation.

L'observateur, placé de façon à voir l'échelle de l'électromètre, peut, de la main droite, faire commencer ou cesser l'électrisation, et, de la main gauche, manœuvrer la vis de *a*.

On voit sur le chariot une lame de verre prête à être introduite entre *a* et *b*.

#### L'ÉLECTROMÈTRE THOMSON

C'est un électromètre à quadrants du modèle d'Elliott un électromètre de White, que j'avais, fut reconnu impropre à être employé avec le mécanisme inverseur. Si comme dans le cas présent, l'instrument sert seulement

d'électroscope, le modèle d'Elliott, plus sensible. présente de grands avantages.

#### LE COMPAS D'ÉPAISSEUR

C'est une paire de mâchoires de longueurs spéciales, dont on se sert pour ajuster les plateaux de la balance. Placées sur une console extérieure à la cage de l'instrument, les mâchoires pénètrent droit entre les plateaux. On peut incliner la console vers le haut ou le bas, pour mesurer l'écartement dans la partie supérieure ou la partie inférieure des plateaux. La graduation « extérieure » était employée à la manière ordinaire pour mesurer l'épaisseur des plaques diélectriques.

#### LES DIÉLECTRIQUES

Les plaques diélectriques avaient 7. pouces de côté ( $17^{\circ},5$ ), et de  $\frac{1}{4}$  à 1 pouce (6 à 25 millimètres) d'épaisseur; leurs faces étaient dressées bien parallèles, et travaillées, quand cela était possible, à la machine à planer.

#### LA FORCE ÉLECTRO-MOTRICE

La force électro-motrice employée était celle d'environ 2050 éléments de la pile de M. de la Rue (chap. xviii).

#### SPÉCIMEN D'OBSERVATIONS

Voici les détails de la détermination de la capacité d'un flint léger :

$$\begin{array}{rcccccc}
 & & & b = 0,699. & & & \\
 a_2 & (1) & 1,503 & (3) & 1,498 & (5) & 1,495 & (7) & 1,500 \\
 a_1 & (2) & 1,035 & (4) & 1,034 & (6) & 1,032 & (8) & 1,032 \\
 \hline
 a_2 - a_1 & & 0,468 & & 0,464 & & 0,467 & & 0,468 \\
 & & & & \text{Moyenne : } 0,46675. & & & & \\
 & & & & 0,699 & & & & \\
 K = & & & & \frac{0,699}{0,699 - 0,46675} = 3,013. & & & & 
 \end{array}$$

## RÉSULTATS

Voici un tableau général des résultats obtenus pour différentes substances :

Nom du diélectrique.	Capacité inductive spécifique.
Verre :	
Flint double très lourd .....	3,164
Flint très lourd .....	3,054
Flint lourd .....	»
Flint léger .....	3,013
Crown dur .....	3,108
Verre commun (2 échantillons) :	
N° 1 .....	3,258
N° 2 .....	3,228
	} moyenne 3,243
Ébonite (4 plaques) :	
N° 1 .....	2,2697
N° 2 .....	2,2482
N° 3 .....	2,3097
N° 4 .....	2,3077
	} moyenne 2,284
Gutta-percha, qualité supérieure .....	2,462
Composition <i>Chatterton</i> .....	2,547
Caoutchouc :	
Noir .....	2,220
Vulcanisé gris .....	2,497
Paraffine solide, densité à 11 degrés centigrades = 0,9109, fusion à 68 degrés centigrades. Six plaques coupées à la machine à planer; résultats corrigés pour les cavités :	
N° 1 .....	1,9940
N° 2 .....	1,9784
N° 3 .....	1,9969
N° 4 .....	2,0126
N° 5 .....	1,9654
N° 6 .....	2,0143
	} 1,9936
Gomme laque .....	2,74
Soufre .....	2,58
Sulfure de carbone .....	1,81

## ÉBONITE

L'accord des expériences sur l'ébonite est une excellente preuve de l'exactitude de la méthode et de la formule : car les quatre plaques étaient d'épaisseurs très différentes, ainsi que le montre le tableau suivant :

## RÉSUMÉ DES EXPÉRIENCES SUR L'ÉBONITE

Plaque.	Épaisseur.	Capacité inductive spécifique.
	pouces.	
N <sup>o</sup> 1.....	0,754	2,2697
N <sup>o</sup> 2.....	0,509	2,2482
N <sup>o</sup> 3.....	0,516	2,3097
N <sup>o</sup> 4.....	0,264	2,3077
Moyenne.....		2,284

Écart maximum de la moyenne = — 1,5 pour cent.

## CAVITÉS DE LA PARAFFINE

Il est impossible d'obtenir des plaques épaisses de paraffine qui ne présentent de nombreuses cavités, en sorte qu'il faut introduire une correction de ce chef. La meilleure que j'aie pu imaginer, était de remplacer dans le calcul  $b$ , l'épaisseur vraie de la plaque, par une épaisseur théorique  $b'$ , qui serait l'épaisseur de la plaque si pour la même largeur, la même longueur et la même quantité de paraffine elle ne présentait pas de cavités.

Pour déterminer  $b'$  on a :

$$b' = b \frac{\text{Densité de la plaque}}{\text{Densité de la paraffine}}$$



Appelons  $\varphi$  le rapport des densités, et posons

$$b' = b\varphi$$

On a déterminé à la façon ordinaire la densité d'un petit morceau de paraffine exempt de trous, et on l'a trouvée égale à : 0,9109 à 11° C.

La densité de chaque plateau était déterminée en le pesant dans l'eau.

La table suivante donne le résultat des expériences et les corrections faites pour chaque plaque. K est la capacité calculée d'après l'épaisseur vraie  $b$ , K' est la capacité d'après l'épaisseur corrigée  $b'$ .

## RÉSUMÉ DES EXPÉRIENCES SUR LA PARAFFINE

Plaque.	Densité à 11° C.	$\varphi$ .	$b$ .	$b'$ .	K.	K'.
N° 1 .....	0,8783	0,9642	0,730	0,7038	1,9261	1,9940
N° 2 .....	0,8771	0,9628	0,750	0,7221	1,9084	1,9784
N° 3 .....	0,8951	0,9826	0,748	0,7249	1,9358	1,9969
N° 4 .....	0,8909	0,9780	0,782	0,7648	1,9697	2,0126
N° 5 .....	0,8933	0,9868	0,755	0,7450	1,9408	1,9654
N° 6 .....	0,9021	0,9903	0,754	0,7467	1,9947	2,0143

$$\text{Valeur moyenne de } \begin{cases} K = 1,9459 \\ K' = 1,9936 \end{cases}$$

Dans les valeurs corrigées, l'écart maximum de la moyenne est de  $-1,4$  pour cent.

Dans les mêmes valeurs non corrigées l'écart maximum est de  $+2,5$  pour cent, ce qui prouve que, grossière comme elle est, la correction donne des nombres beaucoup plus concordants que ceux qui n'ont pas été corrigés.

Le point de fusion de la paraffine était 68° C.

## SULFURE DE CARBONE

Le liquide était contenu dans un vase de verre. Dans ce cas,  $a$  était la lecture, le vase vide étant placé entre  $a$  et  $b$ ;  $a_2$  la lecture, le vase étant plein. Le vase avait 7 pouces (17,5 centimètres) de large, 9 pouces (22,5 centimètres) de haut;  $b$  est son épaisseur à l'intérieur.

CHANGEMENTS LENTS DANS LA CAPACITÉ INDUCTIVE  
SPÉCIFIQUE DU VERRE (1)

Les expériences sur les verres d'optique décrites précédemment avaient été faites vers Noël de 1877, quelques semaines après la fonte du verre.

Vers la fin de juillet 1879, je repris ces expériences sur les mêmes lames de verre, et fus surpris de trouver *dans chaque cas une augmentation considérable de la capacité inductive spécifique*. Dans quelques cas, cette augmentation allait jusqu'à vingt pour cent.

Voici le tableau des résultats :

## CAPACITÉ INDUCTIVE SPÉCIFIQUE DU VERRE OPTIQUE

	Noël 1877.	Juillet et août 1879.
Flint double très lourd...	3,164	3,838
Flint très lourd .....	3,053	3,621
Flint léger.....	3,013	3,443
Crown dur.....	3,108	3,310

La disposition de l'appareil, y compris la bobine et l'inverseur rapide, était exactement la même que dans mes

(1) *Report of the British Association, Sheffield, 1879, page 250.*

premières expériences. La force électro-motrice était, autant qu'on l'avait pu réaliser, la même; des expériences avaient d'ailleurs montré que des variations modérées de la force électro-motrice n'influent pas sur les résultats.

Les différences observées peuvent être dues à l'une de ces trois causes :

1° Erreurs dans les expériences de 1879;

2° Erreurs dans les expériences de 1877;

3° Changement survenu dans la capacité inductive spécifique du verre entre Noël 1877 et juillet 1879. Je me suis convaincu, en les répétant avec le plus grand soin, que les expériences de 1879 étaient exemptes d'erreur.

Si la différence était due à une erreur de 1877, j'aurais obtenu à cette époque un résultat trop faible. Avec ma balance d'induction, le résultat est trop faible si le diélectrique est couvert d'une couche imparfaitement conductrice (1); l'effet d'une couche bonne conductrice couvrant le diélectrique serait d'empêcher toute observation.

Avant donc de rejeter la seconde explication de la différence, à savoir qu'il y a eu erreur sur les résultats de 1877, il est nécessaire d'établir qu'en 1877 il n'y avait pas sur la surface du verre une couche de pouvoir conducteur suffisant pour causer une forte erreur dans les résultats.

En 1877, les verres n'étaient pas lavés par immersion dans l'eau, mais nettoyés soigneusement avec du drap et une peau. Autant que je puis me souvenir, on les frottait d'abord avec du drap mouillé, puis avec du drap sec, et on les polissait à la peau, en envoyant souvent l'haleine dessus pendant l'opération, et ensuite en les chauffant au feu. Ce procédé est si efficace pour faire disparaître toute

(1) Car la couche doit être considérée comme communiquant à la terre.

humidité du verre, qu'à la fin on trouvait d'habitude les plateaux électrisés par le frottement du cuir. Dans ce cas, on les passait rapidement sur la flamme d'une lampe à alcool, en recommençant à plusieurs reprises, de façon à les décharger. Ils étaient toujours si chauds que toute trace d'humidité que pourrait avoir déposé la lampe, disparaissait immédiatement.

Dans les expériences de 1879, citées au tableau précédent, les verres étaient lavés à l'eau chaude, essuyés, polis et passés sur la lampe pendant qu'ils étaient encore chauds. Ayant observé une différence avec les deux premiers échantillons examinés, je fis sur les deux autres des expériences préliminaires avant de les nettoyer. Voici les résultats :

	Capacité inductive spécifique.
Noël 1877 .....	3,01
4 août 1879. — Epousseté légèrement avec un torchon, sans frotter.....	2,90
4 août 1879. — Lavé à l'eau chaude et mis en expérience encore chaud.....	3,44
4 août 1879. — Refroidi dans un espace clos et essuyé au drap.....	3,44
5 août 1879. — Laissé 24 heures à découvert sur une table, et non essuyé.....	3,39
5 août 1879. — Couvert d'huile sur toute sa surface.....	3,48
5 août 1879. — Enfumé, sur toute la surface huilée, à la flamme d'une lampe à pétrole, de façon à le rendre demi-opaque.....	3,46
5 août 1879. — Verre mouillé d'une solution de sel ammoniac.....	} Expérience impossible.
5 août 1879. — Séché grossièrement avec un torchon : la surface paraît opaque comme du verre dépoli.....	1,64
5 août 1879. — Essuyé avec le drap sans frotter.....	2,36
5 août 1879. — Rincé sous un robinet à froid, essuyé au drap, mais non poli.....	3,46

	Capacité inductive spécifique.
5 août 1879. — Pendant qu'il était encore froid, passé sur la lampe à alcool jusqu'à ce qu'il fût bien plus trouble que dans les expériences effectives; mis alors dans la balance, et la mesure faite aussi vite que possible. ....	3,48

## CROWN GLASS DUR

Noël 1877 .....	3,108
7 août 1879. — Non nettoyé depuis plus d'un an, et mis dans la balance couvert de poussière, tel qu'on l'a sorti de la boîte qui ne ferme pas hermétiquement. ....	3,236
8 août 1879. — Nettoyé à l'eau chaude, comme on l'a dit plus haut. ....	3,310

Voici maintenant la conclusion que je tire des nombres précédents : sans doute il est possible, en mouillant convenablement la surface des plaques, de produire en apparence une certaine réduction dans la capacité inductive spécifique; mais aussi, lors même qu'on aurait mis à nettoyer les plateaux bien moins de soin qu'on ne le fit en 1877, toute l'humidité qui aurait pu y être laissée par accident aurait été absolument incapable de produire rien de semblable à la différence que nous examinons.

Je suis donc amené à cette conclusion que, dans le cours d'une année et demie, les verres ont subi une modification réelle, se traduisant certainement par un accroissement considérable de leur capacité inductive spécifique. Pour compléter nos connaissances sur ce sujet, il faut une série d'observations mensuelles, s'étendant sur une période de plusieurs années peut-être.

J'espère continuer sous peu l'étude de cette question.

Tout ce que l'on peut dire pour l'instant est que la théorie de la capacité inductive spécifique est extrêmement obscure, et que l'induction, loin d'être « une action directe

à distance», se transmet certainement par les particules des diélectriques, et se trouve modifiée par presque tous les changements moléculaires qu'ils éprouvent.

J'espère aussi étudier l'effet de la durée de la charge, de la température et de la force électro-motrice.

### CAPACITÉ INDUCTIVE SPÉCIFIQUE DES GAZ

#### EXPÉRIENCES DE BOLTZMANN (1)

Le 23 avril 1874, le professeur Boltzmann lut devant l'Académie de Vienne un mémoire dans lequel il annonçait avoir réussi à découvrir et à mesurer des différences dans la capacité inductive spécifique des gaz.

#### LE CONDENSATEUR

Le condensateur (fig. 38) consistait essentiellement en deux plateaux métalliques,  $d$  et  $e$ , isolés l'un de l'autre, et contenus dans un récipient en verre, que l'on pouvait relier à une machine pneumatique et à un gazomètre. Les plateaux  $d$  et  $e$  peuvent être chargés, ou reliés à la terre ou à l'électromètre, au moyen de deux fils,  $p$  et  $q$ , passés à travers des tampons de gomme laque fixés au dôme du récipient. Les plateaux  $a, b, f, g$  n'ont pas d'usage électrique, mais sont toujours reliés à la terre : leur but est d'enlever par conduction toute chaleur développée par le frottement à l'entrée des gaz.

Le plateau  $d$  repose sur trois blocs de gomme laque encastrés dans des socles de laiton fixés eux-mêmes au plateau  $b$ .

Le plateau  $e$  était attaché par des morceaux de gomme

(1) *Wiener Sitzungsber.*, vol. LXIX, part. II, page 795.

laque au plateau *f*, et ce dernier est placé de niveau au moyen des trois vis *iii*.

Une boîte *hh* en laiton mince protège le condensateur de

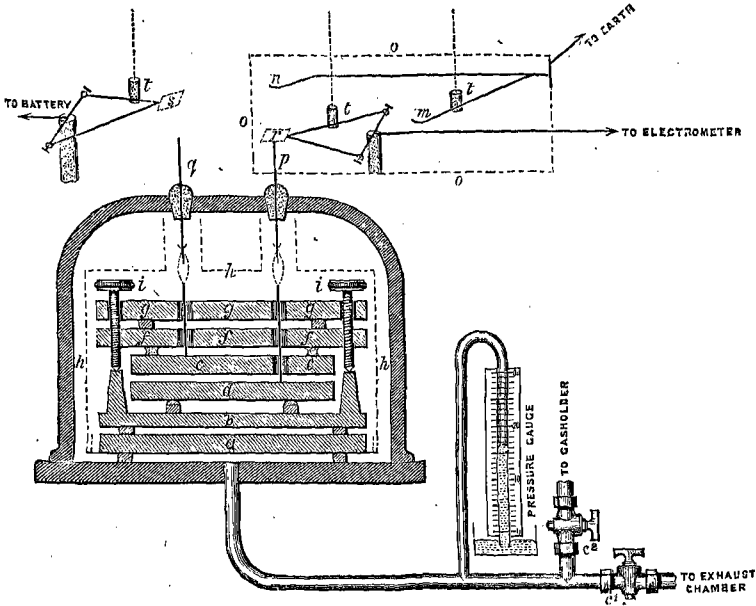


FIG. 38. — *To battery* = A la pile. *To earth* = A la terre. *To electrometer* = A l'électromètre. *Pressure gauge* = Manomètre. *To gazholder* = Au gazomètre. *To exhaust chamber* = A la machine pneumatique.

l'induction par les objets extérieurs. Les fils *p* et *q* ont chacun une attache flexible, pour que les vibrations du récipient ne puissent ébranler les plateaux du condensateur.

#### THÉORIE DES EXPÉRIENCES

Avant de commencer les expériences, le plateau *e* est mis à la terre, et le plateau *d* à l'électromètre; on envoie de

l'air dans le récipient, et ensuite on l'épuise. Aucune déviation ne se produit, ce qui prouve que les plateaux ne sont pas électrisés par le frottement de l'air.

Au commencement d'une expérience,  $d$  est mis à la terre et à l'électromètre;  $e$  reçoit une charge (+) au moyen de 300 éléments Daniell. L'électricité (+) de  $d$  s'échappe à la terre, l'électricité (—) est maintenue sur  $d$  par l'attraction de l'électricité (+) qui est sur  $e$ .

On isole alors  $e$  en soulevant le fil  $m$  : l'état électrique du système n'étant pas changé, il n'y a toujours pas de déviation à l'électromètre.

Si maintenant on ajoute à la pile un élément de plus, l'action électrique de  $e$  sur  $d$  croît, et l'électromètre prend une déviation  $\beta$ . On a trouvé que, pour un élément ajouté,  $\beta$  était d'environ 60 divisions de l'échelle.

Mais si, sans changer la pile, on modifie l'action de  $e$  sur  $d$  en modifiant le diélectrique qui les sépare, il y aura aussi une déviation dont la grandeur dépendra du changement de capacité inductive spécifique, et dont le sens indiquera si ce changement est un accroissement ou une diminution.

On a reconnu qu'en épuisant l'air jusqu'à réduire sa pression de une atmosphère (760 millimètres) à environ 10 millimètres de mercure, la capacité inductive spécifique subit une diminution, marquée par une déviation négative ( $-a$ ), de 8 divisions de l'échelle.

#### FORMULE POUR LE CALCUL

Soit  $p$  le potentiel dû à un seul élément Daniell; s'il y a 300 éléments, le potentiel dû à toute la pile sera  $300p$ , et, généralement, le potentiel dû à  $n$  éléments sera  $np$ :  $\beta$  étant la déviation correspondante à l'addition d'un



élément de potentiel  $p$ , il en résulte que  $\beta$  est proportionnel à  $p$ .

Soient  $K_1$  la capacité inductive spécifique de l'air dans le condensateur, au commencement de l'expérience;  $K_2$  celle du gaz ou de l'air raréfié à la fin de l'expérience.

Alors, d'après la théorie connue des condensateurs, le potentiel en chaque point du condensateur, à la fin de l'expérience, sera  $\frac{K_1}{K_2}$  fois ce qu'il était en commençant. Comme  $d$  et la boîte de métal sont reliés à la terre, leur potentiel initial est zéro, et par suite, leur potentiel final  $\frac{K_1}{K_2}$  fois zéro, ce qui est encore zéro:

Le potentiel du plateau  $e$ , qui était  $np$ , devient  $\frac{K_1}{K_2} np$ , c'est-à-dire qu'il *varie* d'une quantité

$$\frac{K_1}{K_2} np - np, \quad \text{ou} \quad np \left( \frac{K_1}{K_2} - 1 \right).$$

Cette variation du potentiel de  $e$  cause une déviation de  $a$  divisions de l'échelle.

Mais, quand on ajoute un élément, le potentiel de  $e$  éprouve un accroissement  $p$ , déterminant une déviation de  $\beta$  divisions de l'échelle.

D'où, par une simple proportion,

$$\begin{array}{l} np \left( \frac{K_1}{K_2} - 1 \right) \text{ est à } a \\ \text{comme } p \qquad \qquad \text{est à } \beta, \end{array}$$

ou

$$\frac{np \left( \frac{K_1}{K_2} - 1 \right)}{p} = \frac{a}{\beta},$$

c'est-à-dire :

$$n \left( \frac{K_1}{K_2} - 1 \right) = \frac{a}{\beta},$$

ou

$$\frac{K_1}{K_2} = 1 + \frac{a}{n\beta}. \quad (1)$$

#### EFFET DE LA DENSITÉ DU GAZ

Le professeur Boltzmann a trouvé que, pour un gaz donné, toute variation de densité cause une variation à peu près proportionnelle dans la quantité dont la capacité inductive spécifique diffère de l'unité. Par exemple, si, à une pression donnée, la capacité du gaz est de 1,002, à une pression moitié moindre elle sera : 1,001.

Prenons pour unité la capacité inductive spécifique dans le vide; et soit  $1 + \lambda$  celle d'un gaz à la pression ordinaire. La capacité de tous les gaz différant fort peu de l'unité, nous savons que  $\lambda$  sera une très petite quantité, et aura le signe (+) ou le signe (—), suivant que la capacité du gaz est plus grande ou plus petite que celle du vide.

Soient  $K_1$  la capacité du gaz sous la pression de  $b_1$  millimètres;  $K_2$  sa capacité sous la pression  $b_2$ . Alors

$$K_1 \text{ est proportionnel à } 1 + \frac{\lambda b_1}{760}$$

et

$$K_2 \text{ est proportionnel à } 1 + \frac{\lambda b_2}{760}$$

ou

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{760 + \lambda b_1}{760 + \lambda b_2}$$

et, comme  $\lambda$  est une quantité très petite, on peut écrire :

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{760 + \lambda b_1 - \lambda b_2}{760} = 1 + \frac{\lambda (b_1 - b_2)}{760} \quad (1).$$

(1) Supposons, en effet,  $\lambda b_1 = 2$  et  $\lambda b_2 = 1$ , alors

En combinant cette formule avec la formule (1) de la page 202, nous avons

$$1 + \frac{a}{\beta n} = 1 + \frac{\lambda (b_1 - b_2)}{760},$$

ce qui donne

$$\lambda = \frac{a \cdot 760}{\beta n (b_1 - b_2)}. \quad (2)$$

C'est cette formule qui a été employée dans les expériences (1).

Et nous avons pour un gaz quelconque

$$K_{760} = 1 + \lambda,$$

où  $K_{760}$  est la capacité inductive spécifique de ce gaz à 760 millimètres de pression, la capacité inductive spécifique d'un « vide » de 5 à 10 millimètres étant prise pour unité.

#### DÉTAILS. D'EXPÉRIENCE

Les communications avec les fils  $p$  et  $q$  sont établies au moyen de plaques métalliques  $r, s$  fixées aux sommets de triangles de fil métallique suspendus, comme l'indique la figure 38.

On peut les soulever ou les abaisser au moyen de cordes.

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{762}{761} = 1 + \frac{1}{761}$$

et

$$1 + \frac{\lambda b_1 - \lambda b_2}{760} = 1 + \frac{1}{760},$$

ce qui donne une approximation suffisante pour des expériences.

(1) La partie  $\frac{a}{b_1 - b_2}$  de l'expression (2) était la moyenne de plusieurs expériences faites avec différentes valeurs de  $b_1$  et  $b_2$ .

Pour obtenir un meilleur isolement, les cordes ne sont pas attachées directement aux fils, mais à de petits cylindres de gomme laque *ttt*. En soulevant *r* jusqu'à lui faire toucher le fil *n*, on met l'électromètre à la terre ; ou, en abaissant *m*, tandis que *r* repose sur *p*, on met à la terre à la fois l'électromètre et le plateau *d*. Une boîte de métal *oo*, reliée à la terre, protège toutes les communications de l'électromètre contre les inductions accidentelles.

Pour pouvoir épuiser l'air rapidement, une grande chambre est placée entre la pompe à air et le robinet *c*<sub>1</sub>. On fait le vide dans cette chambre au moyen de la pompe, puis on ouvre brusquement le robinet *c*<sub>1</sub>. Le condensateur peut être rempli d'un gaz quelconque, en y faisant d'abord le vide, et en ouvrant ensuite le robinet *c*<sub>2</sub> conduisant au gazomètre.

L'épaisseur de chaque plateau est de 4 à 5 millimètres, leur diamètre d'environ 160 millimètres ; l'écartement des plateaux *d* et *e*, de 1 millimètre.

#### POUVOIR ISOLANT DE L'AIR

Quelques expériences préliminaires ont été faites pour voir si l'on pouvait considérer l'air compris entre les plateaux comme les isolant parfaitement, en particulier aux basses pressions. Le plateau *e* fut chargé, et *d* mis à la terre ; puis *e* et *d* furent tous deux isolés un certain temps *t*, et *d* relié à l'électromètre. Toute déviation qui se serait produite dans ces conditions aurait été due à une déperdition d'électricité de *e* sur *d*.

Pour un temps *t* de 5 minutes, temps bien plus long que la durée d'une expérience, il n'y avait pas de déviation.

Pour un temps *t* de 14 heures, il y avait une déviation indiquant une perte d'environ  $\frac{1}{1200}$  de l'électricité. Lorsque

la pression était réduite à 3 millimètres, l'électricité passait par décharge disruptive (1) de l'un des plateaux à l'autre; mais pour des pressions comprises entre 760 et 3 millimètres, l'isolement peut être considéré comme parfait.

## CONDUITE DES EXPÉRIENCES

Les opérations s'effectuaient dans l'ordre suivant :

1° Les plaques *r* et *s* et le fil *m* sont abaissés.

2° *r* et *m* sont relevés.

3° On épuise le gaz.

4° *r* est abaissé, mais non *m*, et la déviation de l'électromètre est inscrite comme valeur de  $(-a)$ .

L'ordre des opérations 3 et 4 peut être interverti sans qu'il en résulte théoriquement de différence.

## RÉSULTATS

Voici les résultats obtenus :

Température : 15°-17° C.

Vide (représenté par) 1,000,000.	
Gaz à 760 millimètres et 15°-17° C.	$K_{760} = 1 + \lambda$ .
Air .....	1,000558
Acide carbonique.....	1,000892
Hydrogène.....	1,000250
Oxyde de carbone.....	1,000650
Protoxyde d'azote (NO).....	1,000938
Gaz oléfiant .....	1,001208
Gaz des marais.....	1,001266
	1,000890

(1) Voy. chapitre xxxiv.

De ces résultats, le professeur Boltzmann a déduit ce qu'aurait été la valeur de  $K_{760}$  à  $0^{\circ}$  C. Il a obtenu :

Vide (représenté par) 4,000,000.	
Gaz à 760-millimètres et à $0^{\circ}$ C.	$K_{760} : 0^{\circ}$ .
Air .....	1,000590
Acide carbonique .....	1,000946
Hydrogène.....	1,000264
Oxyde de carbone.....	1,000690
Protoxyde d'azote (NO).....	1,000984
Gaz oléfiant.....	1,001312
Gaz des marais.....	1,000944

Pour rendre plus aisée la comparaison de ces résultats avec ceux des autres expérimentateurs, j'ai calculé d'après les tables précédentes la capacité inductive spécifique des différents gaz, en prenant pour étalon et représentant par l'unité celle de l'air à  $0^{\circ}$  C. et à la pression de 760 millimètres.

Voici la formule dont je me suis servi :

Nous avons

$$\lambda \text{ pour l'air à } 0^{\circ} \text{ C. et 760 millimètres} = 0,000590,$$

soit  $1 + \lambda'$  la capacité inductive spécifique d'un gaz, celle de l'air à  $0^{\circ}$  C. et sous 760 millimètres étant prise pour unité.

Alors si nous posons

$$\lambda' = \lambda - 0,000590,$$

nous aurons des résultats exacts dans les limites d'erreur de ces expériences (1).

(1) La vraie valeur de  $\lambda'$  résulterait de la proportion  $\frac{1 + \lambda(\text{air})}{1 + \lambda(\text{gaz})} = \frac{1}{1 + \lambda'}$ .

Ainsi la vraie valeur de  $1 + \lambda'$  pour l'acide carbonique serait :

Nous avons :

Gaz.	Capacité inductive spécifique.	
	à 0° C. et 760 millimèt.	à 45°-47° C. et 760 millimètres.
L'air à 0° C. et 760 millimètres étant pris pour unité.		
Vide 0,999440		
Acide carbonique.....	1,000356	1,000302
Hydrogène.....	0,999674	0,999660
Oxyde de carbone.....	1,000100	1,000060
Protoxyde d'azote.....	1,000394	1,000348
Gaz oléfiant.....	1,000722	1,000618
Gaz des marais.....	1,000354	1,000300

#### EXPÉRIENCES D'AYRTON ET PERRY (1)

En 1877, les professeurs Ayrton et Perry annoncèrent qu'ils avaient pu découvrir et mesurer des différences dans la capacité inductive spécifique de certains gaz; ils ignoraient encore à ce moment les recherches antérieures du professeur Boltzmann sur le même sujet.

On employait deux condensateurs : le « condensateur ouvert » et le « condensateur fermé ».

Le condensateur ouvert (fig. 39) consistait en un plateau métallique  $z$ , d'une surface de 1815 centimètres carrés, placé sur un pilier de pierre  $y$ ; et en un autre plateau  $w$ ,

$$1 + \lambda' = \frac{1,000946}{1,000590} = 1,0003558.$$

La valeur obtenue en posant  $\lambda' = (\lambda - 0,000590)$  est 1,0003560 : cette formule introduit donc une erreur de 2 sur 3500 dans la valeur de  $\lambda$ , ou de 2 sur dix millions dans la valeur de  $K$ .

(1) *De la capacité inductive spécifique des gaz.* Mémoire lu devant la Société Asiatique du Japon, 18 avril 1877.

supporté au-dessus du premier par trois vis calantes en

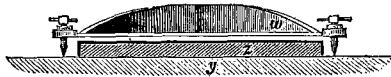


FIG. 39.

ébonite. Pour empêcher le plateau supérieur de se courber, on l'avait pourvu de petites nervures.

Le condensateur fermé (fig. 40 et 41) consiste en une

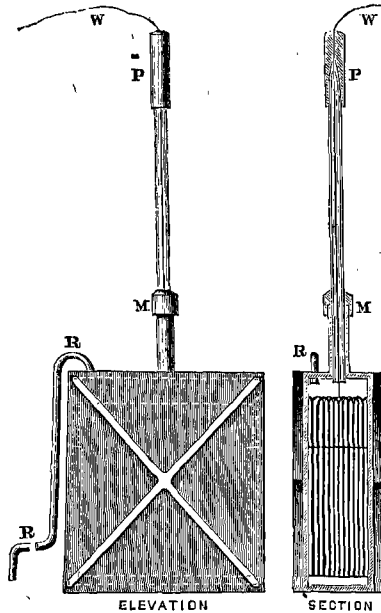


FIG. 40.

FIG. 41.

boîte dans laquelle sont 11 plaques, chacune de 324 centimètres carrés de surface, fixées parallèlement les unes aux autres. Les n<sup>os</sup> 1, 3, 5, 7, 9, 11 sont reliés à la boîte, les



n<sup>os</sup> 2, 4, 6, 8, 10 à un fil qui sort à travers un long tube de verre MP.

Le tube RR aboutit à une pompe à mercure.

Le rapport des capacités du condensateur ouvert et du condensateur fermé se détermine :

1° Quand ce dernier est plein d'air à la température et à la pression ordinaires ;

2° Quand il est rempli de quelque autre gaz.

Le rapport de ces deux déterminations donnait la capacité inductive spécifique du gaz.

La méthode de comparaison était la suivante :

#### MÉTHODE DE COMPARAISON

Un des conducteurs de chaque condensateur est mis à la terre, et les autres plaques sont chargées à des potentiels égaux et contraires au moyen d'une pile de 87 éléments Daniell et d'une clef à inversion de courant.

La clef était disposée de telle sorte que, quand le pôle (+) était relié à l'un des condensateurs, le pôle (—) était mis à la terre, et vice versa. La première position de la clef établit les communications, comme le montre la figure 42; dans la deuxième, le levier *b* serait abaissé, et *a* soulevé.

Cette disposition donne une différence de potentiel double de celle que l'on aurait obtenue en reliant les deux pôles aux deux condensateurs. Car si nous prenons pour unité la différence de potentiel des pôles d'un élément, cette dernière disposition aurait établi entre les condensateurs une différence de potentiel de 87.

Dans la disposition adoptée, un des condensateurs est chargé à un potentiel inférieur de 87 à celui de la terre, c'est-à-dire (—87); l'autre à un potentiel supérieur de 87 à celui de la terre, et la différence de potentiel est 174.

Les deux condensateurs sont alors détachés de la pile et reliés à l'électromètre (fig. 43). Si les capacités sont exactement égales, il n'y a pas de déviation; si les capacités ne sont pas égales, il y a une déviation dont le sens indique quel est le condensateur qui a la plus considérable capacité, dont la grandeur dépend de la grandeur de la différence.

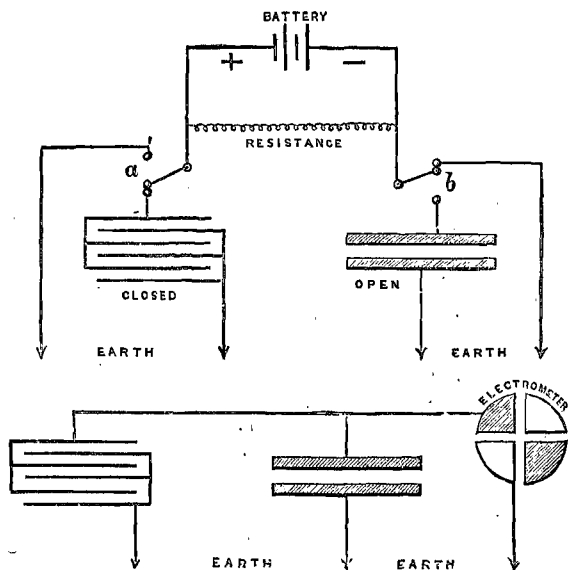


Fig. 42 et 43. — Battery = Pile. Closed = Condensateur fermé. Open = Ouvert.  
Earth = Terre.

Cette déviation indique le potentiel de la charge restante en unités arbitraires de l'électromètre : appelons-la  $p$ .

Pour calculer la capacité, il est aussi nécessaire de connaître le potentiel de toute la charge, exprimé en fonction des mêmes unités arbitraires de l'électromètre.

Ce potentiel pourrait être déterminé par une petite pile, en attachant ses pôles à l'électromètre, et observant la

déviations. Mais on ne peut pas employer cette méthode avec 87 éléments ; la déviation serait trop grande pour être mesurée par l'instrument.

On a employé la méthode suivante : les pôles de la pile sont réunis par un long fil fin, appelé : « une bobine de 10 000 unités de résistance » (1).

On sait, par la loi de Ohm (2), que le potentiel tombe uniformément d'un bout à l'autre d'un fil de résistance qui relie les pôles d'une pile ; et par suite on peut obtenir une fraction quelconque de ce potentiel de la façon suivante :

Supposons que le fil ait 100 unités de longueur : la différence de potentiel entre un des bouts et un point situé à une unité de longueur de ce bout sera exactement  $\frac{1}{100}$  de la différence de potentiel des extrémités. En reliant les pôles de l'électromètre à un des pôles de la pile et à un point tel que la résistance comprise entre les pôles de l'électromètre soit  $\frac{1}{100}$  de la résistance totale comprise entre les pôles de la pile, on aura une déviation correspondant au  $\frac{1}{100}$  de la différence de potentiel de la pile.

Soit  $d$  cette déviation ; la différence de potentiel des pôles de la pile est égale à  $(100 d)$  unités arbitraires de l'électromètre.

Nous savons que la charge du condensateur est égale au produit de son potentiel par sa capacité. Appelons  $C$  et  $O$  les capacités respectives du condensateur fermé et du condensateur ouvert. Leurs charges seront

$$(100 d. C) \text{ et } (-100 d. O).$$

Lorsqu'on les ajoute ensemble, elles chargent les deux condensateurs à un certain potentiel  $p$ . Mais la capacité est

(1) Voy. chapitres XXI et XXVI.

(2) Voy. chapitre XX.

( $C + O$ ), la charge est donc  $p(C + O)$ . Or ceci est la somme algébrique des deux premières charges : l'expérience fournit donc l'équation

$$100 d. C - 100 d. O = p(C + O)$$

ou

$$(100 d - p) C = (100 d + p) O$$

ou

$$\frac{C}{O} = \frac{100 d + p}{100 d - p}$$

La détermination de la valeur de  $\frac{C}{O}$  ayant été faite avec le condensateur fermé plein d'air, on en fait une autre après l'avoir rempli de quelque autre gaz, et on inscrit le résultat :  $\frac{C'}{O}$ . On a alors

$$\frac{\frac{C'}{O}}{\frac{C}{O}} = \frac{C'}{C} = \text{Capacité inductive spécifique du gaz que l'on examine.}$$

Voici les résultats obtenus :

Diélectriques.	Capacité inductive spécifique.
Air.....	1,0000
Vide.....	0,9985
Acide carbonique.....	1,0008
Hydrogène.....	0,9998
Oxyde de carbone.....	1,0004
Acide sulfureux.....	1,0037

On voit que si Faraday n'a pas réussi à découvrir de différence dans les capacités inductives spécifiques des gaz, c'est uniquement à cause de l'extrême petitesse de ces différences, et du défaut de sensibilité de son appareil.

« L'erreur probable » dans toutes les déterminations précédentes n'est pas supérieure à 0.00015, c'est-à-dire que le dernier chiffre décimal est exact à  $1\frac{1}{2}$  près.

## RÉSUMÉ

La table suivante donne un résumé général des expériences décrites dans ce chapitre. On verra dans la quatrième partie leur importance spéciale en ce qui concerne la théorie de l'électricité.





## APPENDICE AU CHAPITRE XI

### THÉORIE MATHÉMATIQUE DE LA MÉTHODE D'ATTRACTION DE BOLTZMANN

Le professeur Boltzmann a eu l'obligeance de m'envoyer l'explication suivante de sa formule donnée à la page 147; pour calculer la capacité inductive spécifique d'une balle diélectrique, d'après le rapport des attractions exercées par une balle chargée sur cette balle et sur une balle conductrice.

Pour tout diélectrique on peut poser

$$\mu = kR \quad (1)$$

où  $\mu$  est le « moment diélectrique » de l'unité de volume,  $R$  la force résultante en un point du diélectrique due à toute l'électricité qui agit, induite ou autre;  $k$  une constante dépendant de la nature du corps. Il faut d'abord prouver que

$$K = 1 + 4\pi k,$$

$K$  étant la capacité inductive spécifique.

Considérons un des condensateurs sphériques de Faraday (fig. 25, p. 127), et soient

$$a \text{ et } a + \delta$$

les rayons des sphères concentriques, séparées seulement par de l'air.

Soit  $p$  le potentiel de la charge sur la sphère intérieure, la sphère extérieure, étant mise à la terre. Soient  $+E$  la charge de la sphère intérieure —  $E'$  celle de la sphère extérieure.

Le potentiel, en un point de la surface extérieure de la sphère



extérieure, sera le même que si les deux charges étaient condensées au centre, et sera

$$\frac{E}{a + \delta} - \frac{E'}{a - \delta}. \quad (2)$$

Mais puisque la sphère extérieure est à la terre, son potentiel est nul, ce qui donne

$$E = E'. \quad (3)$$

Le potentiel, en un point quelconque de la surface de la sphère intérieure, dû à la charge  $E'$ , est

$$-\frac{E'}{a + \delta} = -\frac{E}{a + \delta}.$$

Le potentiel au même point dû à la charge  $E$  est  $\frac{E}{a}$ .

Le potentiel total  $p$  sur la surface de la sphère intérieure est donc

$$p = \frac{E}{a} - \frac{E}{a + \delta} = \frac{E\delta}{a^2} \quad (4)$$

si  $\delta$  est très petit.

Or la *capacité*  $c$  du condensateur est égale à  $\frac{E}{p}$  (page 107).

Nous avons donc

$$c = \frac{E}{p} = \frac{E}{\frac{E\delta}{a^2}} = \frac{a^2}{\delta}. \quad (5)$$

Supposons maintenant le condensateur rempli de quelque autre diélectrique au lieu d'air : on peut considérer le diélectrique comme divisé en un grand nombre de couches concentriques infiniment minces, chacune d'épaisseur  $d$ .

Chacune d'elles sera polarisée, en sorte qu'il y aura une charge  $-e$  sur sa surface intérieure, une charge  $+e$  sur sa surface extérieure. Chaque charge  $+e$ , sauf celle qui est sur l'enveloppe extérieure, aura près d'elle une charge  $-e$ , et chaque charge  $-e$ , sauf celle qui est sur la surface intérieure du diélectrique, aura près d'elle une charge  $+e$ . Ainsi, toutes les charges se neutraliseront mutuellement, sauf une charge  $-e$  qui reste sur la surface intérieure du diélectrique, et une charge  $+e$  à la surface extérieure. Il y a alors quatre charges seulement qui agissent,  $+E$ ,  $-e$ ,  $+e$  et  $-E'$ .

Le potentiel dû à ces quatre charges, en un point de la sphère métallique extérieure, sera

$$\frac{E}{a + \delta} - \frac{e}{a + \delta} + \frac{e}{a + \delta} - \frac{E'}{a + \delta} \quad (6)$$

et comme cette sphère est toujours mise à la terre, ce potentiel doit encore être zéro, ce qui montre que  $E$  reste égal à  $E'$  après l'introduction du diélectrique.

Le *potentiel* dû aux quatre charges, pour un point de la sphère intérieure, sera

$$\begin{aligned} p' &= \frac{E}{a} - \frac{e}{a} + \frac{e}{a + \delta} - \frac{E}{a + \delta} \\ &= (E - e) \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{a + \delta} \right) = \frac{(E - e) \delta}{a^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

La *capacité* de  $c$  est devenue  $c'$ , ou

$$c' = \frac{E}{p'} = \frac{E a^2}{(E - e) \delta}. \quad (8)$$

Considérons maintenant les *forces* qui agissent :

En un point quelconque du diélectrique, les charges  $-E'$  et  $+e$  n'ont pas d'effet, tandis que les charges  $+E$  et  $-e$  peuvent être considérées comme réunies au centre. Par suite, la charge électrique agit avec une force  $\frac{E - e}{a^2}$  sur l'unité d'électricité placée en un point quelconque du diélectrique; car la charge  $E$  agit avec une force  $\frac{E}{a^2}$ , et la charge  $-e$  avec une force  $-\frac{e}{a^2}$ , en négligeant les quantités de l'ordre  $\frac{\delta}{a^3}$ .

$$\frac{E - e}{a^2} \text{ est la quantité que l'on a désignée par } R \quad (9)$$

dans l'équation (4).

Le moment diélectrique de tout le diélectrique est  $e\delta$ , puisque  $\delta$  est l'épaisseur et  $e\delta$  la charge sur un côté du diélectrique. Le volume du diélectrique est  $4\pi a^2 \delta$  (\*).

(\*) En effet, le volume d'une sphère de rayon  $a$  est  $\frac{4}{3} \pi a^3$ ; celui d'une

Le moment diélectrique pour l'unité de volume est donc

$$\frac{e \delta}{4 \pi a^2 \delta} \quad (10)$$

Cette quantité a été désignée par  $\mu$  dans l'équation (4).  
L'équation (1)

$$\mu = k R$$

peut donc s'écrire, en substituant à  $R$  et  $\mu$  leurs valeurs (10) et (9),

$$\frac{e}{4 \pi a^2} = k \frac{E - e}{a^2}$$

ou encore

$$e = 4 \pi k (E - e), \quad (11)$$

d'où nous tirons

$$e = \frac{4 \pi k}{1 + 4 \pi k} E, \quad (12)$$

et

$$E - e = \frac{1}{1 + 4 \pi k} E. \quad (13)$$

Substituant dans (8) cette valeur (13), nous trouvons pour  $c'$

$$c' = (1 + 4 \pi k) \frac{a^2}{\delta} \quad (14)$$

et portant dans (14) la valeur de  $\frac{a^2}{\delta}$  tirée de (5), nous avons

$$c' = (1 + 4 \pi k) c; \quad (15)$$

mais le rapport des capacités est égal à la capacité inductive spécifique  $K$  du diélectrique. Nous avons donc

$$K = \frac{c'}{c} = (1 + 4 \pi k), \quad (16)$$

ce qu'il fallait démontrer. Remarquons qu'une petite partie d'un

sphère de rayon  $a + \delta$  est  $\frac{4}{3} \pi (a + \delta)^3$ . La différence, qui est le volume d'une couche sphérique d'épaisseur  $\delta$  est  $\frac{4}{3} \pi (3 a^2 \delta + 3 a \delta^2 + \delta^3)$ , et si  $\delta$  est très petit, on peut en négliger la seconde et la troisième puissance.

condensateur à plateaux peut être regardée comme appartenant à un condensateur sphérique de très grand rayon.

Considérons maintenant l'attraction sur une balle diélectrique :

Plaçons en un point quelconque, sur la balle « active », par exemple, une charge d'électricité  $+E$ , et supposons qu'elle attire une balle diélectrique de rayon  $b$ . Chaque élément de volume de cette balle éprouve la polarisation diélectrique; le côté le plus voisin de  $+E$  est chargé négativement et le côté le plus éloigné, positivement.

Dans le raisonnement suivant, nous supposerons la distance de la charge (c'est-à-dire de la « balle active ») et de la balle diélectrique assez grande relativement au rayon de cette dernière, pour que les lignes de forces puissent être regardées comme parallèles; nous admettrons aussi que tous les points du diélectrique soient sensiblement à la même distance de la charge, en sorte que les forces agissant sur l'électricité du diélectrique puissent être considérées comme égales et parallèles.

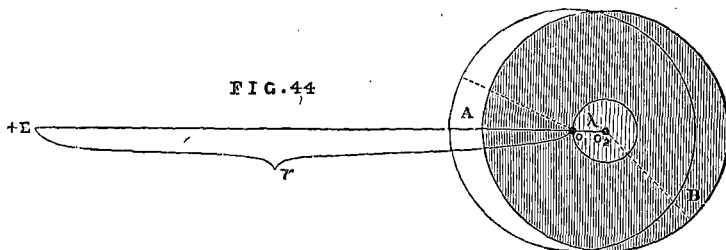
Quand l'électricité de la balle diélectrique n'est pas soumise à une influence perturbatrice, on peut, si l'on veut, considérer chaque élément comme chargé d'électricités égales et contraires. Et si l'on appelle  $e$  la quantité totale de chaque espèce d'électricité répandue sur la balle, on peut considérer cette balle comme formée de deux sphères coïncidant ensemble, et chargées uniformément l'une A d'électricité  $-$ , et l'autre B d'électricité  $+$ ; la charge totale étant  $-e$  dans un cas, et  $+e$  dans l'autre. Puisque d'ailleurs les deux sphères sont supposées en coïncidence, le résultat est une sphère, en chaque point de laquelle sont des quantités égales et contraires d'électricité; en d'autres termes, une sphère parfaitement neutre.

Considérons maintenant l'effet de polarisation induit par la présence de la charge  $E$  sur la « balle active ». Puisque les forces exercées sur les deux électricités en chaque point du diélectrique sont égales et parallèles, en chaque point du diélectrique des quantités égales d'électricités contraires s'écarteront de longueurs égales, dans une direction parallèle à la ligne qui joint la charge  $E$  au centre du diélectrique. Considérant séparément la perturbation résultante pour toutes les charges positives et toutes les charges négatives, on voit que l'effet total peut être représenté en supposant que les deux sphères d'électricité positive et négative, qui primitivement coïncidaient entre elles et avec la balle diélectrique, se soient déplacées comme sur la figure 44; la sphère négative A s'étant légèrement avancée vers la charge  $+E$ , et la sphère positive s'en étant légèrement écartée. La force totale, exercée par le diélectrique ainsi polarisé, peut être re-

gardée comme la résultante des forces exercées par ces deux sphères A et B.

Nous pouvons déterminer l'action sur la balle diélectrique entière par l'action sur ces deux sphères idéales.

Nous avons l'une d'elles, A, qui contient une quantité  $-e$  d'électricité



négative; soit  $O_1$  son centre (fig. 44). La seconde, B, contient une quantité  $+e$  d'électricité, et son centre est en  $O_2$ .

Posons  $\lambda = O_1O_2$  la distance des centres,  $\lambda$  étant une quantité très petite.

Les deux balles A et B auront sur les points extérieurs le même effet que si leurs charges  $-e$  et  $+e$  étaient concentrées à leurs centres respectifs  $O_1$  et  $O_2$ .

Le moment diélectrique des deux balles est alors

$$e \cdot O_1O_2 \text{ ou } e\lambda \text{ (*)}. \quad (17)$$

Le rayon de chaque balle étant  $b$ , leur volume est

$$\frac{4}{3} \pi b^3, \quad (18)$$

et, par suite, le moment diélectrique  $\mu$  pour chaque unité de volume sera obtenu en divisant (17) par (18), et sera

$$\mu = \frac{3e\lambda}{4\pi b^3}. \quad (19)$$

(\*) Cette expression est absolument la même que celle du moment magnétique d'un aimant de longueur  $\lambda$ , dont les pôles N et S ont respectivement  $-e$  et  $+e$  pour intensité magnétique. Voir chapitre XII.

L'attraction électrique exercée sur la charge E par la balle A ayant son centre en  $O_1$ , est

$$\frac{Ee}{r^2} \quad (20)$$

où  $r$  est égal à la distance  $EO_1$ .

La répulsion due à l'autre balle B est

$$\frac{Ee}{(r + \lambda)^2}, \quad (21)$$

ce qui donne pour l'attraction totale  $h$  exercée par la charge E sur la balle diélectrique

$$\begin{aligned} h &= \frac{Ee}{r^2} - \frac{Ee}{(r + \lambda)^2} \\ &= \frac{Ee(r^2 + 2\lambda r + \lambda^2 - r^2)}{r^2(r + \lambda)^2} = \frac{Ee2\lambda r}{r^4} = Ee \frac{2\lambda}{r^3} \end{aligned} \quad (22)$$

en négligeant les quantités de l'ordre de  $\lambda^2$ .

Faisons usage maintenant de l'équation (1) :  $\mu = kR$ .

Nous savons, d'après (19), que

$$\mu = \frac{3e\lambda}{4\pi b^3}$$

et nous voulons trouver R.

Pour cela, supposons une unité d'électricité positive rassemblée au point  $O_1$ , et voyons quelle est la force totale exercée sur elle.

La charge  $+E$  exerce une répulsion

$$R_1 = \frac{E}{r^2}. \quad (23)$$

La balle A ne peut agir sur  $O_1$ , puisque  $O_1$  est exactement à son centre.

Supposons la balle B divisée en deux parties : l'une formée d'une *petite* balle de rayon  $\lambda$  ayant son centre en  $O_2$  (le petit cercle de la figure 44), et soit  $e$  la charge électrique sur cette balle; l'autre formant une sphère creuse entourant la précédente.

Cette balle creuse n'agit pas sur  $O_1$ , mais la petite balle exerce une répulsion sur  $O_1$  :

$$R_2 = \frac{e}{\lambda^2}. \quad (24)$$

Comme on suppose la balle B chargée entièrement et uniformément d'électricité, on a le rapport

$$\frac{\varepsilon}{e} = \frac{\text{volume de la petite balle}}{\text{volume de la balle B}}$$

ou

$$\frac{\varepsilon}{e} = \frac{\frac{4}{3} \pi \lambda^3}{\frac{4}{3} \pi b^3},$$

c'est-à-dire

$$\varepsilon = \frac{e \lambda^3}{b^3}, \quad (25)$$

d'où l'on tire, par l'équation (24),

$$R_2 = \frac{e \lambda}{b^3}. \quad (26)$$

Puisque  $R_1$  et  $R_2$  agissent simultanément en sens contraire, on a, par (23) et (26),

$$R = R_1 - R_2 = \frac{E}{r^2} - \frac{e \lambda}{b^3}. \quad (27)$$

C'est la force totale agissant de E sur l'électricité concentrée au point  $O_1$ .

L'équation (1)  $\mu = kR$  devient alors, par (19) et (27),

$$\frac{3e\lambda}{4\pi b^3} = \frac{kE}{r^2} - \frac{ke\lambda}{b^3}, \quad (28)$$

d'où nous tirons

$$e\lambda = \frac{4\pi k b^3 E}{(4\pi k + 3)r^2}. \quad (29)$$

Substituons maintenant dans (29) la valeur de  $(1 + 4\pi k)$  tirée de (16), nous aurons

$$e\lambda = \frac{(K - 1) b^3 E}{(K + 2) r^2}. \quad (30)$$

Substituons cette valeur de  $e\lambda$  dans l'expression (22) que nous avons trouvée pour  $h$ , l'attraction de la balle diélectrique, et nous aurons :

$$h = \frac{K - 1}{K + 2} \cdot \frac{2E^2 b^3}{r^5} \quad (31)$$

Pour avoir l'attraction  $h'$  d'une balle métallique, faisons  $K = \infty$  (voir page 160) dans l'expression (31), ce qui donne

$$h' = \frac{2E^2 b^3}{r^5} . \quad (32)$$

Le rapport  $E^*$  (page 147) des attractions de la balle métallique et de la balle diélectrique est alors, par (31) et (32),

$$E^* = \frac{h'}{h} = \frac{K + 2}{K - 1} \quad (33)$$

et on voit que (33) nous donne l'équation employée à la page 147

$$K = \frac{E^* + 2}{E^* - 1} . \quad (34)$$

Dans la pratique des expériences, la correction (\*\*) à introduire parce que les balles ne sont pas infiniment petites, est très minime. Le rapport des valeurs, corrigée et brute, de  $E^*$  est seulement celui de 1 à 1,003 ou 1,004, ce qui donne dans la valeur de  $K$  une différence absolument inappréciable.

(\*) Ce n'est évidemment pas le même  $E$  que nous avons employé dans cet appendice.

(\*\*) On trouvera cette correction dans *Wiener Sitz.*, vol. LXX, part. II, page 307.



## APPENDICE II

### EXPÉRIENCES DE M. GAUGAIN SUR LA CAPACITÉ SPÉCIFIQUE INDUCTIVE ET LA CHARGE RÉSIDUELLE (1).

*Appareils.* — Pour avoir une source d'électricité à potentiel constant, M. Gaugain prend un condensateur à plateaux de grande surface, qu'il met en communication avec un électroscope à feuilles d'or. Cet électroscope est entouré d'une cage en verre à parois planes, dont l'une des faces verticales porte des divisions. En visant par un trou percé dans un écran à une certaine distance, on voit sur quelles divisions se projettent les feuilles d'or, et l'on charge ce condensateur dans les différentes expériences, de façon que la divergence des feuilles soit toujours la même. On opère à des potentiels très faibles et, de cette façon, les causes d'erreur dues à la déperdition sont presque annulées. Les corps électrisés par cette source ont une capacité très faible pour que le potentiel de la source varie peu.

L'appareil de mesure, qui doit être alors très sensible, est l'*électroscope jauge* ou *électroscope à décharges*. C'est un électroscope ordinaire à feuilles d'or, dans la cloche duquel on introduit une boule de laiton en communication avec le sol. Quand la charge électrique est suffisante, les feuilles d'or divergent et l'une d'elles, venant toucher la boule, décharge l'appareil. Si un corps électrisé communique avec l'électroscope par un fil de coton, en sorte que l'électricité afflue lentement, chaque contact de la feuille d'or laissera échapper la même quantité d'électricité, et la charge que possède le corps sera proportionnelle au nombre total des contacts obtenus jusqu'à ce qu'il soit revenu à l'état neutre.

(1) *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, vol. LXIV, p. 174; et 4<sup>e</sup> série, vol. II, p. 264.

Voir aussi l'*Électricité* de Mascart, vol. I, p. 483, etc.

Pour que les décharges soient identiques, il faut que la feuille d'or se détache de la boule aussitôt après le contact : on empêche l'adhérence en ayant soin que la boule soit polie et non vernie, ou en la portant au rouge avant de l'introduire dans la cloche, ce qui la recouvre d'une légère couche d'oxyde métallique. On secoue d'ailleurs légèrement la table quand la feuille d'or ne tombe pas aussitôt après le contact. Dans les expériences qui suivent, les condensateurs que l'on compare ont une petite surface relativement à celle du condensateur employé comme source.

*Expériences : I. Condensateurs à air.* — Lorsqu'on charge un condensateur dont l'air est le diélectrique, en mettant l'une des armatures en communication métallique avec une source à potentiel constant, et l'autre avec le sol, il suffit de laisser les communications établies pendant un instant seulement pour obtenir la charge maxima. En d'autres termes, *un condensateur à air se charge instantanément.*

*II. Condensateurs à diélectrique solide.* — Quand, au contraire, le diélectrique est un corps solide, il faut laisser le condensateur en communication avec la source pendant un temps assez long pour obtenir la charge maxima, et, toutes choses égales d'ailleurs, cette charge est beaucoup plus grande que dans le cas où le diélectrique est de l'air. En d'autres termes, *la charge dépend de la durée de la communication avec la source.*

Lorsqu'un condensateur de ce genre a été chargé à saturation et qu'on fait communiquer entre elles ses armatures par un arc métallique, il faut aussi un certain temps pour obtenir une décharge complète.

Les condensateurs employés dans ces expériences sont des condensateurs à plateaux à armatures mobiles. On jauge l'armature que l'on étudie avec l'électroscope à décharges : pour éviter un flux trop rapide dans les premiers instants, on laisse d'abord en place l'armature, puis on l'écarte graduellement de la couche isolante, à mesure que le dégagement d'électricité se ralentit, de manière que la vitesse des décharges soit à peu près uniforme et qu'aucune partie de l'électricité n'échappe au jaugeage. On vérifie d'ailleurs que l'armature n'a laissé aucune trace d'électricité sur la lame isolante et que celle-ci est parfaitement neutre.

Voici le résultat des expériences sur un condensateur formé de deux plateaux de laiton de 75 millimètres de diamètre, séparés par un disque de soufre de 6 millimètres d'épaisseur : la quantité d'électricité du plateau collecteur est évaluée par le nombre des décharges qu'il fournit à l'électroscope.

Durée de la charge.	Charge du collecteur.	Durée de la charge.	Charge du collecteur.
Fraction de seconde.	22	8 minutes.....	35
30 secondes.....	28	16 » .....	37
2 minutes.....	30	32 » .....	39
4 » .....	33	64 » .....	42

La charge instantanée n'est pas la moitié de celle que l'on obtient au bout d'une heure, et alors le maximum n'est pas encore atteint.

*Étude de la charge maxima.* — La charge maxima est la charge que l'on obtient quand la communication avec la source est indéfiniment prolongée.

Les expériences sont faites à l'aide de petits condensateurs à plateaux (petits carreaux fulminants), composés de gâteaux isolants à surfaces bien planes et d'armatures métalliques également bien planes.

1<sup>er</sup> Cas. *Les armatures sont séparées du diélectrique par des lames d'air.* — On donne à ces lames d'air une épaisseur constante, en collant sur la face interne de chaque armature trois pastilles de gomme laque plus ou moins épaisses.

Si la couche interposée entre les deux lames d'air est formée d'un corps bon conducteur, la charge limite est atteinte dans un temps extrêmement court, et sa grandeur ne dépend que de la somme des épaisseurs d'air situées de part et d'autre du conducteur. Si le corps interposé est un mauvais conducteur, la charge limite n'est atteinte qu'au bout d'un temps plus ou moins long, mais elle est, en général, indépendante de la nature et de l'épaisseur du corps isolant sur lequel on opère, autant que cette épaisseur ne dépasse pas une certaine valeur. Cette charge limite est la même que celle qui est atteinte instantanément par un disque métallique remplaçant le disque isolant.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus avec des plateaux et des lames interposées de 74 millimètres de diamètre.

Lame interposée.		Durée de la charge.	Charge du collecteur.
Nature.	Épaisseur.		
Zinc. ....	5 <sup>mm</sup>	instantanée	21
	39	»	21
Acide stéarique....	6 <sup>mm</sup>	quelques instants	13
		5 minutes	20
		10 »	21
Acide stéarique....	17 <sup>mm</sup>	quelques instants	9
		5 minutes	14
		10 »	14
		20 »	16
		2 h. 15 min.	19
2 h. 40 min.	20		
Gutta-percha.....	6 <sup>mm</sup>	quelques instants	15
		5 minutes.	17
		10 »	21
		20 »	22
Gomme laque.....	6 <sup>mm</sup>	quelques instants	14
		5 minutes	20
		20 »	22
Soufre.....	6 <sup>mm</sup>	quelques instants	15
		/	/
		/	/
		/	/
		7 h. 30 min.	21

M. Gaugain explique ce résultat en disant que les corps *isolants* possèdent tous une certaine conductibilité, laquelle a pour effet d'augmenter graduellement la charge des condensateurs dont ils font partie. Car, du moment où les corps isolants transmettent l'électricité comme les métaux, bien qu'avec une facilité moindre, la distribution électrique doit toujours finir par être la même dans l'état d'équilibre pour les corps isolants et les métaux.

2<sup>e</sup> Cas. *Les armatures sont en contact avec le diélectrique.* — La charge limite est alors de beaucoup plus forte que celle qui est obtenue en interposant de minces lames d'air entre le diélectrique et ses armatures, et cette charge n'est atteinte qu'au bout d'un temps

beaucoup plus long. Les expériences sont plus difficiles ; elles paraissent indiquer cependant que la charge limite varie avec la nature du milieu isolant.

La comparaison de deux carreaux fulminants de mêmes dimensions, qui avaient pour diélectrique, l'un la gutta-percha, et l'autre l'acide stéarique a donné les résultats suivants :

	Acide stéarique.	Gutta-percha.
Après une charge de 20 minutes.....	103	111
— 40 — .....	121	132
— 1 h. 20.....	126	144

*Étude de la charge minima.* — M. Gaugain appelle ainsi la limite inférieure vers laquelle converge la valeur de la charge, lorsque sa durée diminue de plus en plus. « Suivant les vues de M. Faraday, dit M. Gaugain, la *capacité inductive* consiste dans la facilité plus ou moins grande avec laquelle l'électricité neutre se décompose et se recompose dans l'intérieur d'une même molécule, tandis que la *conductibilité* consiste dans la facilité plus ou moins grande avec laquelle l'électricité d'une molécule se transmet aux molécules voisines. Pour distinguer les effets de la capacité inductive de ceux de la conductibilité ordinaire, et pour isoler les premiers, M. Faraday charge et décharge *rapidement* les condensateurs dont il se sert. C'est admettre que la capacité inductive peut se manifester complètement dans un temps inappréciable, tandis que la conductibilité exige toujours, pour développer ses effets, un temps plus ou moins long. Si l'on prend ce caractère pour une définition, la *capacité inductive* n'est autre que la *charge minima*. »

Pour réduire la durée de la charge à un très court intervalle de temps, M. Gaugain emploie un appareil composé d'une petite auge fixe en laiton et d'une pointe d'acier attachée à un fort ressort. L'auge communique avec la source, la pointe d'acier avec le condensateur. On remplit l'auge d'eau de façon que le liquide s'élève au-dessus des parois et le ressort qui porte la pointe est bandé ; en retirant un verrou, il se détend, et la pointe d'acier, dans son mouvement rapide, vient couper en travers la crête du ménisque formé par la surface liquide.

Il s'établit ainsi entre la source d'électricité et le condensateur une communication dont la durée n'excéderait pas  $\frac{1}{100}$  de seconde.

En procédant de cette façon, on a trouvé que, dans certains cas au moins, la charge du condensateur *diminue* avec la durée de la communication avec la source, alors même que l'on se borne à considérer

de petits intervalles de temps. Ainsi, avec un carreau fulminant, construit avec l'acide stéarique du commerce, on obtient, en prenant pour unité la charge du condensateur à *air* de mêmes dimensions que le condensateur à *acide stéarique* :

Durée du contact.	Charge.
Petite fraction de seconde.....	1,30
2 secondes.....	1,85
1 minute.....	2,71
Plusieurs heures.....	7 »

Il résulte de là que, si la conductibilité et la capacité inductive sont deux propriétés distinctes, il faut, pour éliminer la première, opérer très rapidement. Après avoir étudié l'influence de la durée du contact, M. Gaugain a déterminé la capacité inductive spécifique de différents isolants, d'abord pour un contact très court, puis pour un contact de deux secondes.

Une fraction de seconde.		2 secondes.	
Air.....	1,00	Air.....	1,00
Acide stéarique.....	1,30	Soufre.....	1,71
Spermaceti.....	1,47	Caoutchouc vulcanisé.	1,78
Cire.....	1,50	Spermaceti.....	1,85
Caoutchouc vulcanisé.	1,50	Acide stéarique.....	1,92
Gomme laque.....	1,53	Gutta-percha.....	2,07
Soufre.....	1,57	Gomme laque.....	2,07
Gutta-percha.....	1,60	Cire.....	2,21

Non seulement les capacités spécifiques varient avec la durée de la charge, mais leur ordre de grandeur varie également : la capacité de l'acide stéarique est plus grande que celle du soufre au bout de deux secondes, et c'est l'inverse quand la durée n'est que d'une fraction de seconde. « Ce fait semble apporter un argument décisif en faveur des vues de M. Faraday ; car il semble impossible de rendre compte de cette interversion au moyen de la seule conductibilité. Cependant on peut se dispenser de recourir à aucune propriété nouvelle, si l'on admet que l'un au moins des diélectriques présente une certaine hétérogénéité de composition ou de structure. Concevons, en effet, d'une part, un diélectrique homogène doué d'une faible conductibilité ; d'autre part, un diélectrique composé d'une masse absolument isolante, au milieu de laquelle se trouvent disséminées de petites masses d'une autre substance parfaitement conductrice ; le second diélectrique pourra l'emporter sur le premier, lorsque la durée des charges sera

suffisamment petite; et au contraire, le diélectrique homogène prendra le dessus lorsque les charges seront suffisamment prolongées. »

M. Gaugain est parvenu à vérifier directement cette influence de l'hétérogénéité au moyen de deux gâteaux de soufre qui contenaient, l'un une petite quantité d'eau, l'autre une proportion un peu plus grande d'huile d'olive.

Durée de la charge.	Gâteau contenant	Décharges.
Une portion de seconde.....	De l'eau.....	48
	De l'huile.....	32
5 minutes.....	De l'eau.....	62
	De l'huile.....	80

Comme conclusion, « il ne me paraît pas démontré, dit l'auteur, que la *capacité inductive* soit une propriété distincte de la conductibilité. Sans admettre cette propriété nouvelle, on peut expliquer tous les faits observés en considérant les diélectriques comme formés : 1° de parties qui ne conduisent pas du tout ; 2° de parties qui conduisent très peu ; 3° de parties très conductrices. Coulomb se représentait à peu près de cette manière la constitution des corps isolants (1). »

M. Gaugain pense que l'hypothèse de l'hétérogénéité des diélectriques (2) est préférable à celle de la polarisation moléculaire de

(1) On a vu, page 144, que M. Boltzmann divise les diélectriques qu'il a étudiés en deux groupes : les uns, tels que la gomme laque, la paraffine, le soufre et la résine (colophane), se comportent comme des isolants parfaits, en ce sens que, tout en ayant une capacité spécifique supérieure à celle de l'air, ils atteignent la charge maxima au bout d'un temps très court; les autres, tels que la gutta-percha, la stéarine et le verre, seraient des matières imparfaitement isolantes, pour lesquelles la charge augmenterait sensiblement avec le temps.

(2) Cette hypothèse de l'hétérogénéité expliquerait les résultats différents fournis par les diverses variétés de soufre.

1° Avec un gâteau de soufre octaédrique pulvérisé, la charge instantanée est plus grande que celle du condensateur à air de mêmes dimensions, la charge croît avec la durée du contact, mais sans atteindre jamais celle que l'on obtient en remplaçant le diélectrique par un condensateur homogène de

Faraday. Celle-ci paraît difficile à concilier avec le résultat que Faraday a obtenu pour les gaz, à savoir que tous les gaz ont le même pouvoir spécifique (1), et que ce pouvoir est tout à fait indépendant de la température et de la densité du gaz. Pour expliquer ce résultat, il faut ou bien que les molécules gazeuses ne se polarisent point, ou que leur polarisation, si elle a lieu, ne contribue pas à la transmission de l'induction. M. Gaugain a vérifié, en effet, en chargeant instantanément des disques formés de copeaux de stéarine plus ou moins pressés, que la capacité inductive d'un même diélectrique varie avec la densité.

M. Gaugain reconnaît que le principe d'une action *s'exerçant à distance* est incompatible avec les faits d'expérience, tels que l'induction en ligne courbe, constatée par Faraday; ce principe est aussi difficile à concilier avec le résultat de ses propres recherches antérieures dont la conclusion est que toutes les questions relatives à la distribution de l'électricité dans l'état statique sont résolues par les mêmes formules qui expriment le flux dans l'état dynamique. « Comme il est incontestable que la *conduction* s'effectue par l'intermédiaire du milieu conducteur placé entre les électrodes, il semble nécessaire

mêmes dimensions. De ces trois faits, on conclut que le gâteau de soufre octaédrique contient les trois sortes d'éléments énumérés.

2° Un disque de soufre tourné au tour a présenté les mêmes phénomènes, avec cette différence que la charge maxima était la même que celle obtenue avec un conducteur homogène de mêmes dimensions. Ce disque renfermerait des éléments très conducteurs et des éléments peu conducteurs, mais pas d'éléments absolument isolants.

3° Un gâteau de fleur de soufre atteint instantanément sa charge maxima; mais la valeur de cette charge est plus grande que celle du condensateur à air correspondant, et plus petite que celle obtenue avec un condensateur homogène. Ce gâteau renfermerait des éléments isolants et des éléments très conducteurs, mais pas d'éléments médiocrement conducteurs.

4° Enfin un gâteau de soufre amorphe fraîchement préparé atteint instantanément sa limite, et sa charge est égale à celle du condensateur à air de mêmes dimensions. Le soufre amorphe serait donc homogène et absolument isolant : malheureusement ce résultat n'a pu être établi d'une manière très rigoureuse, en raison de l'extrême ténuité du soufre amorphe qui, à volume égal, pèse cinq fois moins que le soufre octaédrique pulvérisé, en sorte que, à volume égal, la charge fournie par le soufre amorphe doit être plus petite que celle fournie par l'autre, alors même que la conductibilité serait la même à poids égal.

(1) On a vu, page 202 et suivantes, que ce résultat de Faraday n'a pas été confirmé par les expériences subséquentes de M. Boltzmann et celles de MM. Ayrton et Perry.



d'admettre que, dans un condensateur, l'induction se transmet d'une armature à l'autre par l'intermédiaire d'un milieu interposé. Quelle est la nature de ce milieu? Est-il formé, comme le pense M. Faraday, des corps matériels solides, liquides ou gazeux qui se trouvent interposés entre les armatures, ou bien est-ce un milieu d'une nature particulière telle que l'éther? » M. Gaugain incline pour cette dernière opinion, en se fondant surtout sur ce que, d'après les expériences de Faraday, la présence du gaz dans les condensateurs à gaz est absolument indifférente (1). « J'admets donc que l'électricité comme la chaleur se transmet par deux voies différentes, que la *conduction* s'effectue par l'intermédiaire de la matière pesante, et que l'*induction* se transmet par l'intermédiaire de l'éther ou d'un fluide analogue. Si la présence d'un conducteur solide ou liquide modifie en général l'induction à travers sa substance, c'est uniquement parce que la conductibilité de cette substance est mise en jeu. »

Dans les expériences de Faraday, la pression du gaz employé comme diélectrique n'a jamais été au-dessous de 48 millimètres de mercure. M. Gaugain a pris un gros cylindre de gomme laque, dont il a électrisé par le frottement une des bases. Il a suspendu ce cylindre au sommet du récipient d'une machine pneumatique, et sous la base électrique il a placé un électroscope à feuilles d'or surmonté d'un disque métallique de même diamètre que le cylindre. Il a noté l'écartement des feuilles d'or; le vide a été réduit à 4 millimètres, puis on a laissé rentrer l'air, et la divergence des feuilles est restée sensiblement la même; ce qui semble confirmer les résultats de Faraday sur les gaz (2).

#### DE LA CHARGE RÉSIDUELLE (3)

La *charge résiduelle* est la charge que conserve un condensateur, après qu'une communication métallique de très courte durée a été établie entre les armatures.

On constate que, quelle qu'ait été la durée de la charge, la différence entre la charge *totale* et la charge *résiduelle* est constante et égale à la charge *instantanée*. Ce fait s'explique aisément en supposant qu'il existe des éléments médiocrement conducteurs dans le mi-

(1) Voir la note (1) de la page 232.

(2) Les expériences, citées page 202 et suivantes, infirment le résultat de cette expérience de M. Gaugain et de celles de Faraday, auxquelles elle se réfère.

(3) Voir chapitre x.

lieu interposé. La quantité d'électricité qui s'échappe dans un contact de très courte durée, ou la *décharge instantanée*, ne dépend que des éléments du milieu interposé qui sont conducteurs ou qui se polarisent instantanément, et elle est évidemment égale à la *charge instantanée*, qui ne dépend que des mêmes éléments. Le reste de la charge totale, qui s'est produit lentement, est retenu par l'électrisation des éléments peu conducteurs.

Pour établir l'origine de la charge résiduelle, le condensateur a toujours été chargé pendant le même temps, et toujours déchargé pendant la même fraction de seconde : on a seulement séparé la charge de la décharge par des intervalles de temps plus ou moins longs.

Les expériences suivantes ont été faites avec un disque de gomme laque de 6 millimètres d'épaisseur :

1° Le condensateur a été chargé instantanément et jaugé aussitôt après : la charge *totale* a été de 45.

2° Le condensateur chargé a été abandonné à lui-même pendant 15 minutes, et jaugé au bout de ce temps : la charge *totale* a été encore de 45.

3° Le condensateur a été déchargé immédiatement après avoir été chargé : la charge *résiduelle* a été zéro.

4° Enfin le condensateur a été déchargé 15 minutes après avoir été chargé : la charge résiduelle a été de 27.

« Les expériences 1 et 2 prouvent que, dans l'intervalle de 15 minutes, le condensateur n'a rien perdu de sa charge et que, par conséquent, il n'y a pas d'*absorption* sensible par la gomme laque; et cependant il résulte des expériences 3 et 4 que dans cet intervalle la *charge résiduelle* s'est élevée de 0 à 27. Cet accroissement de la charge résiduelle ne peut tenir qu'à une répartition différente de l'électricité dans l'intérieur du diélectrique. Quand la charge n'a été maintenue que pendant un instant, les parties très conductrices du diélectrique participent seules à la transmission de l'induction, et comme un instant suffit pour les polariser, un instant suffit pour les ramener à l'état neutre; quand, au contraire, le condensateur est resté chargé pendant un temps suffisamment long, les éléments peu conducteurs entrent en jeu, et comme ils ne peuvent être ramenés à l'état neutre dans un instant très court, ils conservent, après la décharge, toute ou presque toute l'électricité qu'ils possédaient auparavant : celle-ci retient une portion de l'électricité de nom contraire sur l'armature.

« La charge résiduelle ne dépend donc pas d'une faculté d'absorption qui appartiendrait spécialement aux corps isolants : elle dépend

simplement des mouvements électriques qui s'opèrent dans l'intérieur de ces corps en vertu de leur conductibilité » (1).

J. R.

(1) M. Maxwell (*Electricity*, vol. I, art. 53) fait remarquer qu'on peut prouver facilement que le diélectrique n'absorbe pas de l'électricité ; ou du moins, si elle pénètre à l'intérieur, qu'elle n'y reste pas à l'état latent, et qu'elle produit sur les conducteurs environnants le même effet que celle qui est à la surface. On charge la substance pendant qu'elle est enfermée dans un vase métallique clos isolé, puis on décharge le vase instantanément, et on le laisse isolé ; on ne constate aucune charge ultérieure à la surface du vase, malgré la dissipation graduelle de l'électrisation de la substance chargée placée dans son intérieur. Comme l'a constaté Faraday, il est impossible de donner à un corps une charge absolue et indépendante d'une certaine espèce d'électricité : il se développe toujours quelque part une charge égale et contraire.

Si une certaine quantité d'électricité pouvait être absorbée par un corps, ou rendue latente, sans être reliée par des lignes d'induction à une quantité égale d'électricité contraire, ou si, après avoir été absorbée, elle pouvait graduellement émerger et revenir à son mode ordinaire d'action, on observerait quelque changement dans l'électrisation du vase enveloppant. Il n'y a donc pas d'analogie entre ce phénomène et l'absorption de la chaleur par un corps dont les deux faces opposées sont maintenues à des températures différentes. Dans l'article 328 du même volume, M. Maxwell démontre mathématiquement qu'un condensateur formé d'un diélectrique homogène ne donne pas lieu à une charge résiduelle, mais que si le diélectrique est composé de couches de substances différentes, ce phénomène doit se manifester.

## APPENDICES A LA PREMIÈRE PARTIE

---

### I

#### SUR L'ÉTHER

(Voy. p. 32)

Dans son mémoire « sur la nature de l'électricité », présenté à l'Académie des sciences de Stockholm le 10 mai 1871 (1), M. E. Edlung fait, au sujet de l'importance de l'éther, les deux citations suivantes.

La première est empruntée au discours par lequel M. le baron F. de Wrede quitta, en 1847, la présidence de l'Académie Royale des sciences :

..... « On ne peut pas plus admettre qu'une matière remplissant l'espace infini, et présentant des propriétés aussi particulières et aussi remarquables que celles que nous devons forcément attribuer à l'éther, ait été uniquement destinée par la Providence à la propagation de la lumière, qu'on ne peut supposer que l'air l'ait été exclusivement à celle du son. La densité si faible de l'éther est prouvée par sa résistance totalement inappréciable aux planètes, lesquelles paraissent s'y mouvoir sans obstacle. Les comètes, par contre, qui possèdent elles-mêmes une densité singulièrement minime, et qui, dans certaines parties de leurs orbites, se meuvent avec une vitesse des plus grandes, semblent ressentir une résistance sensible de l'éther. Si ce fait se constate, l'existence de l'éther, comme matière douée d'inertie, se trouve établie par une seconde voie. La rapidité prodigieuse avec laquelle la lumière se propage, nous montre, d'autre part, que la matière éthérée doit posséder une élasticité extraordinaire en comparaison de sa densité. De toutes les matières qui se trouvent dans les limites de notre expérience, le fer est la plus élastique, et l'hydrogène,

(1) *Annales de chimie et de physique*, 4<sup>e</sup> série, vol. XXVIII, p. 201, 1873.

qui est environ quatorze fois plus léger que l'air atmosphérique, la plus légère. Or, si l'on se figure une matière d'une densité égale à celle de l'hydrogène, raréfiée autant que cela peut se faire dans une machine pneumatique ordinaire, soit à la pression d'environ un millimètre, et dont l'élasticité égalât celle du fer, une matière hypothétique de cette nature propagerait le son ou tout autre mouvement vibratoire avec la vitesse de 6000 myriamètres par seconde. Quelque immense qu'elle soit, cette vitesse ne constitue pourtant qu'un cinquième environ de celle de la lumière, et le module d'élasticité, exprimé en mesure de longueur, doit, par conséquent, être environ vingt-cinq fois plus grand chez l'éther que chez la matière hypothétique adoptée ici à titre de comparaison. Si l'on regarde l'éther comme un gaz, et si l'on se figure la possibilité d'un vide dans ce gaz, la vitesse avec laquelle l'éther s'y précipiterait s'élèverait à 60 000 myriamètres par seconde, et, jusqu'à quelque infime degré que l'on évalue sa densité, ses effets mécaniques, avec cette vitesse, peuvent devenir singulièrement violents. C'est donc un fait, très probable en lui-même, que l'éther joue un rôle des plus importants dans presque tous les phénomènes naturels. »

La seconde citation est relative aux paroles par lesquelles Lamé termine son célèbre ouvrage : « Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides » (Paris, 1852) :

« L'existence du fluide éthéré est incontestablement démontrée par la propagation de la lumière dans les espaces planétaires, par l'explication si simple, si complète, des phénomènes de la diffraction dans la théorie des ondes, et, comme nous l'avons vu, les lois de la double réfraction prouvent avec non moins de certitude que l'éther existe dans tous les milieux diaphanes. Ainsi, la matière pondérable n'est pas seule dans l'univers, ses particules nagent en quelque sorte au milieu d'un fluide. Si ce fluide n'est pas la cause unique de tous les faits observables, il doit au moins les modifier, les propager, compliquer leurs lois. Il n'est donc plus possible d'arriver à une explication rationnelle et complète des phénomènes de la nature physique, sans faire intervenir cet agent dont la présence est inévitable. On n'en saurait douter, cette intervention, sagement conduite, trouvera le secret ou la véritable cause des effets que l'on attribue au calorique, à l'électricité, au magnétisme, à l'attraction universelle, à la cohésion, aux attractions chimiques; car tous ces êtres mystérieux et incompréhensibles ne sont, au fond, que des hypothèses de coordination, utiles sans doute à notre ignorance actuelle, mais que les progrès de la véritable science finiront par détrôner. »

J. R.

## II

REMARQUE SUR L'APPLICATION DE L'ÉLECTROMÈTRE A QUADRANTS A LA MESURE DIRECTE DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL.

(Voy. page 53)

Le professeur Maxwell a démontré (1) que si l'on désigne par M le moment du couple qui fait tourner l'aiguille, A et B les potentiels respectifs des deux paires de quadrants, C le potentiel de l'aiguille et K une constante caractéristique de la sensibilité de l'instrument, on a la relation

$$M = K(A - B) \left[ C - \frac{1}{2}(A + B) \right]. \quad (1)$$

Si l'on opère dans des conditions telles que les potentiels A et B soient égaux et de signes contraires, en réunissant, par exemple, les paires de quadrants aux pôles d'une pile, la relation se réduit à

$$M = K(A - B)C.$$

Pour que cette proportionnalité théorique se vérifie, il faut que l'électromètre soit construit dans de bonnes conditions et muni de tous les organes accessoires, tels que le rechargeur et la jauge, qui ont pour but de maintenir la constance de la charge de l'aiguille. L'organe principal est la boîte cylindrique divisée en quatre quadrants et dans l'intérieur de laquelle se meut l'aiguille : si l'on modifie profondément la forme de cet organe, comme dans l'électromètre de la figure 11, où l'aiguille se meut au-dessus de secteurs plats, il n'est pas étonnant que la proportionnalité théorique n'aille pas au delà d'une certaine déviation très petite (2° à 3°), et qu'on soit obligé de construire empiriquement une table de graduation.

M. Benoît (2) a constaté qu'avec un électromètre construit dans de bonnes conditions, on peut obtenir des déviations proportionnelles dans des limites assez étendues. Avec un électromètre dont la boîte avait 4 centimètres de diamètre sur 6 millimètres d'épaisseur, et une aiguille suspendue par un fil de cocon et dirigée dans un azimuth fixe par un

*Electricity*, vol. I, p. 273.

(2) *Journal de physique*, vol. VI, p. 118, 1877.

petit barreau aimanté collé sur son axe (1), il a vérifié que la proportionnalité s'étendait jusqu'à une déviation de 10 degrés environ.

La forme de l'aiguille ne doit pas être indifférente : au lieu de la forme d'un 8, comme dans la figure 11, il est préférable de prendre celle de la figure 19. Voici, d'ailleurs, la disposition indiquée par M. Clerk Maxwell et que reproduit M. Benoît : « L'aiguille est constituée par deux secteurs plats, découpés dans un même anneau, et réunis l'un à l'autre et à la tige qui les porte par leurs rayons extrêmes. L'angle au centre de ces secteurs est droit, et, dans la position d'équilibre, c'est-à-dire quand le milieu de l'aiguille correspond à l'intervalle de deux secteurs, les bords de l'aiguille correspondent aux milieux des secteurs, en sorte que les limites des secteurs d'une part et de l'aiguille de l'autre soient aussi éloignées que possible. De cette façon, lorsque l'aiguille se déplace dans un plan parallèle aux bases de la boîte, la portion qui vient se placer entre les secteurs et sur laquelle agissent presque exclusivement les forces horizontales qui la font tourner, conserve toujours rigoureusement la même figure. La déformation du système total, dans les petites déviations, est ainsi réduite, en quelque sorte, à son minimum. »

La formule 1 montre aussi que, si le potentiel C de l'aiguille est très grand par rapport à  $\frac{1}{2}(A + B)$ , on aura encore sensiblement

$$M = K(A - B)C.$$

Il faut remarquer toutefois que l'appareil n'est parfaitement symétrique, c'est-à-dire qu'il ne donne des déviations égales et contraires pour des différences de potentiel égales et contraires que si l'on a  $A = -B$ .

Si, comme on le fait d'habitude, on met à la terre une des paires de quadrants B, l'appareil devient dissymétrique quand on change l'espèce d'électricité de A.

En faisant  $B = 0$ , on a, en effet,

$$M = KA \left( C - \frac{A}{2} \right) = KAC \left( 1 - \frac{A}{2C} \right).$$

Il est clair que, si A est négatif, M sera plus grand que lorsque A est positif (2).

(1) Si la suspension est un fil de torsion, le moment M est mesuré par l'angle  $\alpha$ ; et si c'est un fil de cocon sans torsion, et que la force directrice soit fournie par un petit aimant, ou si c'est une suspension bifilaire, le moment est mesuré par le sinus de la déviation  $\alpha$ .

(2) Cette observation a son intérêt dans les appareils enregistreurs pour

Dans la mesure des potentiels de leurs tubes à décharge, MM. de la Rue et Müller ont modifié la méthode sur les conseils de M. Mascart l'aiguille est reliée au corps dont on veut mesurer le potentiel, et chaque paire de quadrants est reliée respectivement à l'un des pôles d'une pile au chlorure d'argent de 20 éléments, dont le milieu est mis à la terre, de façon à avoir pour A et B des potentiels constants, égaux et de signes contraires. On revient ainsi à la disposition de l'électroscope de Bohnenberger (une lame d'or suspendue à égale distance de deux pôles égaux et de signes contraires) (1), et l'on a un appareil *symétrique*.

Une disposition de ce genre est adaptée aux électromètres pour l'électricité atmosphérique, à Montsouris.

Comme dernière conséquence de la formule 1, le moment M est nul si

$$C = \frac{1}{2}(A + B).$$

J. R.

### III

#### ÉLECTROMÈTRE CAPILLAIRE

Le 9 mai 1873 (2), M. G. Lippmann a présenté à l'Académie des sciences une note sur « les Relations entre les phénomènes électriques et capillaires », dans laquelle se trouve énoncé le principe de l'*électromètre capillaire*.

Ses recherches sont exposées en détail dans un mémoire inséré dans les *Annales de chimie et de physique* de 1875 (3).

L'électromètre capillaire ne peut mesurer directement que de très faibles différences de potentiel; mais, en raison de sa grande sensibilité, il peut être très utile dans les méthodes de réduction à zéro.

l'électricité atmosphérique : les déviations correspondant aux potentiels négatifs sont plus grandes que celles qui correspondent à des potentiels positifs de même valeur. Dans les enregistreurs photographiques de Kew, on effectue une compensation en augmentant l'écartement de l'image, quand les déviations croissent du côté positif, par l'emploi d'une lentille cylindrique divergente, et le diminuant du côté négatif par une lentille convergente qui corrige en sens contraire. A Montsouris, on rend l'électromètre *symétrique*.

(1) Voir vol. II, appendice aux chap. XXXIV et XXXV.

(2) *Comptes rendus*, tome LXXVI, p. 1407.

(3) *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série; tome V, p. 494.



Il est fondé sur la variation qu'éprouve la dépression capillaire du mercure sous l'influence d'une force électro-motrice.

Considérons un tube de verre capillaire GG' (fig. 45), mis en communication par un tube de caoutchouc avec un vase plus large A contenant du mercure. La colonne de mercure se termine en M par un ménisque convexe; le niveau en M est moins élevé qu'en A (dépres-

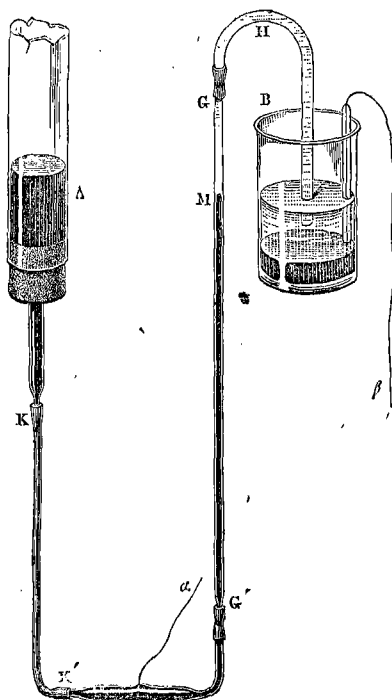


FIG. 45.

sion capillaire). La partie supérieure du tube GG' contient de l'acide sulfurique étendu, qui se continue à travers le tube H, jusque dans le verre B; au fond de ce verre se trouve une couche de mercure. Deux fils de platine  $\alpha$  et  $\beta$ , isolés l'un de l'autre, sont en contact avec les deux masses de mercure en A et B, et permettent de les mettre en communication avec l'extérieur.

GORDON. Électricité.

I. — 16

En face du tube GG', on installe un cathétomètre. Les fils  $\alpha$  et  $\beta$  étant mis en communication métallique l'un avec l'autre, on hausse la lunette du cathétomètre jusqu'à ce que le fil du réticule paraisse tangent à la position d'équilibre  $M_0$ , qu'a prise le ménisque M. L'appareil est alors installé.

Quand on supprime la communication établie entre  $\alpha$  et  $\beta$ , de façon que  $\alpha$  reste isolé, et qu'on déplace la colonne de mercure, le ménisque ne revient pas à sa position d'équilibre primitive  $M_0$ ; mais au moment où l'on rétablit la communication primitive entre  $\alpha$  et  $\beta$ , le ménisque M revient *exactement* à la position  $M_0$ .

Faisons communiquer  $\alpha$  avec le pôle zinc,  $\beta$  avec le pôle cuivre d'un élément Daniell. Au moment où le circuit est fermé, le ménisque hémisphérique M s'abaisse brusquement et prend une nouvelle position d'équilibre.

La dépression capillaire (corrigée de la pression de l'acide) a augmenté de 0,35 de sa valeur. L'appareil constitue un voltamètre à électrodes de mercure, le courant commençant à développer sur ces électrodes une force électro-motrice de polarisation (1) qui fait équilibre à la force électro-motrice de l'élément Daniell, et qui fait cesser le courant avant qu'aucune action chimique se soit produite. En d'autres termes, la force électro-motrice de contact entre le mercure et l'eau acidulée en M ayant augmenté de 1 Daniell, la dépression capillaire a augmenté de 0,35 de sa valeur primitive. Si l'on supprime la pile et qu'on réunisse  $\alpha$  et  $\beta$  par un fil métallique, M reprend exactement sa position primitive.

On peut faire varier la force électro-motrice en M d'une manière continue, en réunissant les pôles de la pile par un fil métallique dont on fait varier la résistance d'une manière continue.

A chaque valeur de la résistance correspond une position d'équilibre du ménisque; ces positions d'équilibre se suivent d'une manière continue. Cette méthode a permis de déterminer point par point la valeur de la dépression en fonction de la force électromotrice de polarisation.

Au lieu de mesurer la dépression, on peut mesurer la force qu'il faudrait appliquer sur la surface A, avec une pompe à air, par exemple, pour ramener le ménisque à la position initiale  $M_0$ .

Supprimons la pile et remplaçons-la par un galvanomètre, dont les électrodes communiquent avec  $\alpha$  et  $\beta$ . L'aiguille étant au repos, on fait varier mécaniquement le niveau du mercure en M, en soulevant le réservoir A, ou bien en comprimant l'air qu'il contient. Aussitôt

(1) Voir vol. II, ch. XXVIII.

l'aiguille est déviée, et indique un courant allant dans l'appareil de M en B. Si l'on renverse le sens du mouvement, le sens du courant est renversé. C'est l'inverse de l'expérience précédente.

est clair que l'appareil de la figure 45 constitue un véritable électromètre qui permet de comparer directement deux forces électromotrices, pourvu qu'elles soient assez faibles pour ne pas décomposer l'eau acidulée, c'est-à-dire peu supérieures à un élément Daniell.

DESCRIPTION DE L'ÉLECTROMÈTRE CAPILLAIRE DE LIPPMANN.

Afin d'obtenir une grande sensibilité, on donne à l'électromètre la forme suivante (fig. 46).

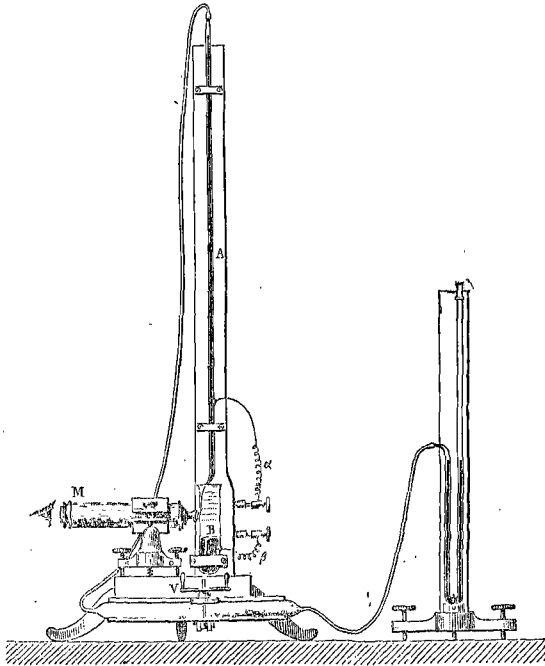


FIG. 46.

Un tube de verre ordinaire A, de 1 mètre de hauteur et de 7 millimètres de diamètre environ, ouvert aux deux bouts, est soutenu par un support, bien solide, dans une position verticale. La partie

inférieure a été effilée à la lampe en deux fois, de façon que le diamètre intérieur de la partie la plus fine soit réduit à quelques millièmes de millimètre. Cette pointe *capillaire* plonge dans de l'acide sulfurique étendu ( $\frac{1}{6}$  d'acide en volume) contenu dans un tube à réaction B fixé au-dessous du premier tube. Au fond de ce tube B se trouve une masse de mercure.

Dans le tube A, on verse une colonne de mercure assez haute pour que le mercure pénètre par sa propre pression dans la pointe capillaire (0<sup>m</sup>,750 par exemple). Cette colonne est soutenue par la pression capillaire de ménisque, qui se forme dans la pointe. Les masses de mercure A et B sont mises en communication avec deux bornes électriques isolées, par l'intermédiaire des fils de platine  $\alpha$  et  $\beta$  soudés à ces bornes. Le fil  $\beta$  ne touche pas l'acide du tube B.

La pointe capillaire vient s'appliquer contre le paroi du tube B, afin d'être à portée du microscope M, qui est fixé horizontalement devant ce tube et qui grossit 250 fois. Afin de faciliter la mise au point, ce microscope est porté par un petit trépied à vis calantes. Les pointes des trois vis calantes reposent sur une plate-forme qui ait partie du support de l'appareil.

La pointe de l'une des vis tourne dans une petite cavité conique ; la pointe de la deuxième vis est mobile dans une rainure rectiligne ; la pointe de la troisième appuie sur un plan horizontal ; un fort ressort à boudin tend à rapprocher le trépied de la plate-forme. Cette disposition (1) permet de mettre au point, et supprime tout ballotement. Le microscope est pourvu d'un réticule, ou mieux encore d'un micromètre oculaire, tracé sur verre. Pour obtenir une image nette, il faut que l'axe du microscope soit bien perpendiculaire à la paroi du tube B.

Pour comprimer l'air au-dessus du mercure A, l'appareil porte une presse à vis qu'on manœuvre au moyen de la manivelle V ; sous cette presse se trouve un sac de caoutchouc allongé, à paroi épaisse, contenant de l'air. Ce sac communique d'une part avec le haut du tube A, de l'autre avec un manomètre à air libre, disposé à côté de l'appareil.

Après avoir rempli l'appareil, on chasse la bulle d'air qui reste dans a pointe capillaire, en comprimant l'air au-dessus de A, de façon à faire sortir même un peu de mercure ; pendant cette opération, on met  $\alpha$  et  $\beta$  en communication métallique. Cela fait, on rétablit la pression atmosphérique au-dessus du mercure A. Le ménisque M, qui

(1) C'est la disposition *trou, rainure et plan*, imaginée par sir W. Thomson. Voir volume II, chap. XLIII

termine le mercure dans la pointe capillaire, s'arrête alors dans une position d'équilibre déterminée, qu'on peut appeler le zéro de l'appareil. On déplace le microscope, de manière à amener le zéro de son micromètre à être tangent à l'image du ménisque ; le microscope ne quittera plus cette position. L'appareil est alors installé.

Il est bon de remarquer que le zéro ne devient absolument fixe que quelque temps après le remplissage de l'appareil ; il descend très lentement pendant deux ou trois jours.

#### MESURE DES FORCES ÉLECTRO-MOTRICES OU DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

Pour mesurer la force électro-motrice d'un élément de pile, par exemple, on fait communiquer son pôle négatif avec  $\alpha$ , son pôle positif avec  $\beta$  ; on tourne la manivelle V jusqu'à ce que le ménisque soit revenu au zéro, et on lit au manomètre la valeur de la pression exercée.

La mesure est alors terminée ; il reste à convertir en force électro-motrice la pression observée. A cet effet, on peut se servir soit d'un tableau dressé d'avance, soit d'une courbe obtenue en portant les forces électro-motrices en abscisses et les pressions compensatrices en ordonnées.

Pour obtenir une échelle de forces électro-motrices, on dispose à côté de l'appareil un circuit métallique, composé d'une résistance fixe R et d'une résistance variable  $r$ , parcouru par le courant d'un élément Daniell, et on relie les fils  $\alpha$  et  $\beta$  aux deux points  $u$  et  $v$  de ce circuit, séparés par la résistance  $r$  (le point  $u$  étant pris entre le pôle zinc et le point  $v$ ). Afin d'obtenir la différence de potentiel  $e$  entre  $u$  et  $v$  avec une grande précision, il faut que les variations de la résistance de la pile soient rendues négligeables. On y parvient en donnant à R une valeur très grande par rapport à la résistance  $\rho$  de la pile. On a alors  $e$  par la relation

$$e = \frac{r}{R + r + \rho}.$$

[Car,  $i$  étant l'intensité du courant, et la force électro-motrice du Daniell étant 1, les lois de Ohm (1) donnent  $e = ir$  et  $i = \frac{1}{R + r + \rho}$ ].

Il suffit de faire varier  $r$  et de noter la pression compensatrice correspondante.

On établira ainsi le tableau (ou la courbe) contenant les valeurs de  $e$

(1) Voir vol. I, ch. xx.

en regard des pressions compensatrices qui correspondent à ces différences de potentiel.

On peut obtenir des valeurs supérieures à un élément Daniell, en intercalant un élément Daniell sur le trajet du fil  $\alpha$ , le zinc étant en communication avec le mercure A et le cuivre avec le point  $u$  du circuit précédent. La force électro-motrice de ce second Daniell s'ajoute alors à la différence de potentiel qui existe entre  $v$  et  $u$  dans le circuit du premier Daniell.

La formation de ce tableau constitue une graduation empirique de l'électromètre.

Tous les électromètres capillaires sont comparables pour une même concentration de l'acide. Il suffira donc de construire ce tableau une fois pour toutes.

Voici les nombres obtenus avec l'acide sulfurique contenant  $\frac{1}{6}$  de volume d'acide, avec une colonne A de 750 millimètres.

$e$	$p$	$e$	$p$
En fraction de Daniell.	En millimètres de mercure.	En fraction de Daniell.	En millimètres de mercure.
0,016	15	0,833	356,5
0,024	21,5	0,900	358,5
0,040	40	0,909	358,5
0,109	89	1,000	353
0,140	111	1,261	301
0,170	131	1,333	279
0,197	148	1,444	239
0,269	188,5	1,713	128
0,364	235	1,833	110
0,450	270,5	1,888	104
0,500	288	2,000	94
0,588	314		

On voit que la dépression, ou la pression qui la mesure, augmente à peu près proportionnellement à la force électro-motrice, jusqu'à un maximum qui a lieu pour  $e = 0,9$  Daniell. Elle diminue ensuite quand  $e$  continue à augmenter jusqu'à 2 Daniell. A chaque valeur de  $e$  correspond une seule valeur de  $p$ ; mais à chaque valeur de  $p$  correspondent deux valeurs de  $e$ .

Supposons qu'on ait un appareil où la hauteur de la colonne A soit de 900 millimètres au lieu de 750; on obtiendra sa graduation en multipliant les pressions compensatrices inscrites au tableau précédent par le rapport  $\frac{900}{750}$ . Si simple que soit ce calcul de réduction, il est aussi court et plus direct de refaire soi-même la graduation, à condition que l'on possède une boîte de résistances bien construite.

Il suffit d'ailleurs, pour la graduation de l'électromètre, de faire varier la force électro-motrice de zéro  $\frac{1}{2}$  Daniell. On peut, en effet, ramener toujours la grandeur à mesurer à être moindre que  $\frac{1}{2}$  Daniell; car la force électro-motrice à mesurer, si grande qu'elle soit, est toujours égale à un nombre entier de Daniell, plus ou moins une fraction moindre que  $\frac{1}{2}$  Daniell. Il y a avantage à opérer ainsi : l'instrument est plus sensible dans cet intervalle et la courbe est facile à construire, parce qu'elle s'éloigne peu d'une ligne droite.

EXEMPLE : MESURE DE LA FORCE ÉLECTRO-MOTRICE D'UN ÉLÉMENT  
LECLANCHÉ

Le pôle charbon du Leclanché, communiquant avec le pôle cuivre du Daniell, on met le zinc du Daniell en communication avec  $\beta$ , le zinc du Leclanché avec  $\alpha$ . Le mercure sort du champ. On tourne la manivelle V jusqu'à ce que le mercure soit ramené au zéro. Le manomètre marque 270 m/m, 5 de mercure. La force électro-motrice inscrite en face de ce nombre (p. 246) est  $e = 0,450$ , donc :

$$1 \text{ Leclanché} = 1,450 \text{ Daniell.}$$

CONSTANCE ET SENSIBILITÉ DE L'APPAREIL

Les indications de l'appareil sont très constantes; quand on décharge l'appareil en reliant  $\alpha$  et  $\beta$  par un fil métallique, le mercure revient immédiatement et exactement au zéro. Cette constance reste parfaite, quelles que soient la pression et la force électro-motrice employées.

La sensibilité de l'appareil varie avec ses dimensions; elle dépend de la hauteur de la colonne A et de la forme plus ou moins cylindrique de la pointe capillaire.

En effet, la pression compensatrice qui correspond à une force électro-motrice donnée est proportionnelle à cette hauteur. Pour 750 millimètres de hauteur, la pression compensatrice de  $\frac{1}{2}$  Daniell est 288 millimètres de mercure; pour 1 mètre de hauteur, elle serait de 300.

Quant à la forme de la pointe la plus favorable, c'est une pointe conique, mais très près d'être cylindrique : l'équilibre du ménisque est alors stable, et la sensibilité très grande. Cette condition se trouve réalisée d'elle-même dans la pratique : car une pointe très fine s'obtient en étirant très vivement. La sensibilité est de l'ordre des dix-millièmes d'un Daniell.

MESURE DES TRÈS PETITES FORCES ÉLECTRO-MOTRICES

Pour de très petites forces, on laisse la pression constante

et on se borne à mesurer, à l'aide du micromètre oculaire, le déplacement du ménisque. *Exemple* : le micromètre oculaire porte 30 divisions; on intercale, entre  $\alpha$  et  $\beta$ ,  $\frac{1}{80}$  de Daniell, le mercure se déplace de 28 divisions. Un déplacement de 1 division correspondrait donc à  $\frac{1}{28 \times 80} = \frac{1}{1680}$  Daniell. Les divisions étant assez espacées pour qu'on puisse estimer une fraction de leur intervalle,  $\frac{1}{6}$  par exemple, l'instrument donne donc  $\frac{1}{1680 \times 6} = \frac{1}{10.080}$  Daniell.

#### MESURE DES PHÉNOMÈNES DE COURTE DURÉE OU VARIABLES AVEC LE TEMPS

Les indications de l'instrument sont très promptes : on peut charger et décharger l'appareil plusieurs fois par seconde et les mouvements du mercure suivent les variations de la charge. Cette propriété est précieuse, quand on veut étudier un phénomène électrique de courte durée ou variable avec le temps, comme la perte graduelle de la charge dans un condensateur ordinaire ou une batterie secondaire.

#### MÉTHODES DE RÉDUCTION A ZÉRO

En raison de sa grande sensibilité, l'instrument est très bien approprié aux méthodes de réduction à zéro. La position du zéro est donnée avec précision par la condition que le ménisque mercuriel soit tangent au fil horizontal du réticule.

#### PHÉNOMÈNES D'INDUCTION STATIQUE

L'instrument, mesurant la différence de potentiel établie entre ses pôles, permet de mesurer le potentiel aux pôles d'une pile ou d'un appareil quelconque. Il obéit aussi à l'influence exercée à distance par un corps électrisé.

Ainsi  $\beta$  communiquant avec la terre,  $\alpha$  étant isolé, on approche de  $\alpha$  un corps électrisé, un bâton de résine frotté par exemple, la colonne de mercure est soulevée; on éloigne le bâton, le mercure revient au zéro, et ainsi de suite. On peut opérer à distance et agiter le bâton de résine aussi vite que l'on voudra, la colonne de mercure suit tous ses mouvements.

#### ÉLECTROMÈTRE CAPILLAIRE DE M. DEBRUN

En répétant la première expérience de M. Lippmann avec un tube de 0<sup>m</sup>,001 de diamètre, on trouve que le changement de niveau du mercure est de 0<sup>m</sup>,003 pour une variation de force électro-motrice de 1 volt (de 0 à 1 volt). Pour rendre l'instrument sensible, il faut am-



plifier les déviations de la colonne : pour cela, M. Lippmann emploie un microscope ; M. Debrun y parvient en donnant au tube une inclinaison suffisante. Dans ses premiers essais, il employait des tubes cylindriques et le zéro était un peu incertain : cet inconvénient a disparu par l'emploi de tubes coniques.

Le *Journal de Physique*, de mai 1880 (1), donne la description de cet appareil présenté à l'Académie le 22 décembre 1879 (2).

Un tube de verre de  $0^m,007$  de diamètre a été étiré de manière à présenter un tube capillaire d'un diamètre d'un fort millimètre environ, légèrement conique, et de  $0^m,2$  de long. Le tube capillaire a été retourné en zigzag, comme dans la figure 47. Le branche capillaire AB a environ

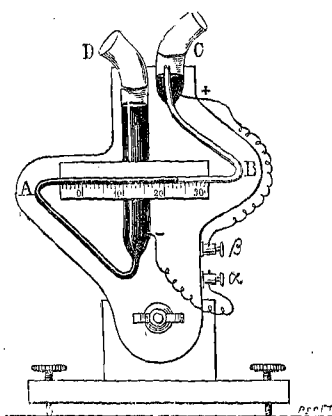


FIG. 47.

$0^m,1$  de long et fait un angle de  $8^\circ$  à  $10^\circ$  avec le tube vertical. A la quatrième courbure, le tube capillaire a été redressé de manière à être vertical, et il traverse le fond d'une cuvette en verre de  $0^m,007$  de diamètre. Dans le fond est mastiqué le fil de platine  $\beta$  qui amènera l'électricité positive. Un fil  $\alpha$ , destiné à amener l'électricité négative, est soudé dans le tube D. Derrière le tube AB est placée une planchette divisée en millimètres.

Ce système de tubes est placé sur un support articulé qui permet de donner à AB l'inclinaison que l'on désire, car c'est uniquement de cette inclinaison que dépend la sensibilité de l'électromètre.

(1) *Journal de physique*, vol. IX, p. 160.

(2) *Comptes rendus*, vol. LXXXIX, p. 1070.

Pour remplir l'électromètre, on réunit  $\alpha$  et  $\beta$  par un fil métallique, on ajoute de l'eau acidulée au sixième dans C jusqu'au-dessus de l'extrémité du tube capillaire, puis on verse dans C quelques gouttes du mercure pur. Ensuite on verse un peu de mercure dans le tube D; en soufflant en D, on chasse la bulle d'air comprise dans le tube et, en aspirant modérément, on mouille les parois du tube capillaire; il ne reste plus qu'à ajouter dans le tube D du mercure goutte à goutte jusqu'à ce que les trois quarts du tube AB soient remplis. On ajoute en D quelques gouttes d'eau acidulée pour préserver le mercure du contact de l'air. L'instrument est alors prêt à fonctionner comme électroscope.

En inclinant le tube dans un sens ou dans l'autre, on augmente ou diminue sa sensibilité, qui peut dépasser  $\frac{1}{300}$  de volt.

Pour faire de l'instrument un appareil de mesure, il faut le graduer par parties d'égale force électro-motrice. Le système suivant est très simple. On prend des éléments amalgame de zinc dans du sulfate de zinc et amalgame de cadmium dans du sulfate de cadmium. Les liquides, placés dans des vases séparés, sont réunis par un tube capillaire très fin. La force électro-motrice de ces éléments est de 0,281 volt. On introduit 1, 2, 3, 4 de ces éléments dans le circuit, et l'on note à chaque fois la division à laquelle s'arrête le mercure: il ne reste plus qu'à construire la courbe.

J. R.

## IV

### APPAREILS POUR L'ÉTUDE DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

Tout système d'appareils pour l'étude de l'électricité atmosphérique comprend deux parties: le *collecteur* et l'*électromètre*.

Le collecteur doit prendre le potentiel de l'air au point voulu: il est mis en communication métallique avec l'électromètre.

#### COLLECTEURS

Une pointe métallique très fine se charge d'électricité de même espèce que l'air; mais si l'on veut que le collecteur prenne exactement le potentiel de l'air, on a recours aux deux moyens suivants:

1° Le collecteur à gouttes d'eau de sir W. Thomson consiste en un vase cylindrique en cuivre isolé avec soin, rempli d'eau à un niveau

constant, qui s'écoule par un tuyau latéral. Le vase prend le potentiel de l'air au point où le jet se brise en gouttes. A l'Observatoire météorologique de Montsouris, ce vase a une capacité de 60 litres, et le tuyau latéral a 1<sup>m</sup>,50 de long. Pour que le vase soit bien isolé, il est supporté par trois pieds de verre, reposant à l'intérieur de trois carafes garnies au fond d'acide sulfurique concentré (1).

Ce collecteur est employé pour les observations à poste fixe et continues. Dans les temps de gelée, on ajoute à l'eau un peu de glycérine.

2° Pour les observations accidentelles, on emploie une flamme conductrice ou une mèche lente en ignition, dont l'effet est de mettre tout conducteur en communication avec elle au potentiel de l'air dans le voisinage du point où se fait la combustion. La mèche est formée de papier à filtre roulé en cylindre, de la grosseur d'un porte-plume, et imprégné d'azotate de plomb : les gaz chauds remplissent le même office qu'une flamme et le papier brûle en s'effilant en pointe.

On a trouvé commode de remplacer les mèches de papier roulé par les mèches rondes, que l'on trouve dans le commerce par pièces de 10 à 20 mètres, pour l'usage des lampes à pétrole portatives. Ces pièces sont introduites dans une dissolution d'azotate de plomb à 10 pour 100 que l'on porte à l'ébullition. Quand le paquet est bien imbibé dans toutes ses parties, on le retire du vase, on le laisse refroidir et on le fait sécher en le suspendant à l'air. On en coupe ensuite des bouts suivant les besoins, et on les fixe au sommet d'une pointe isolée, de hauteur variable.

#### ÉLECTROMÈTRES

Dans les observations à poste fixe, on emploie l'électromètre à quadrants. A Montsouris, on fait usage d'un électromètre de ce genre, simplifié par M. Branly. Les secteurs et l'aiguille ont la forme et la disposition de la figure 11. Ils sont enfermés dans une cage carrée à parois de verre, dont le couvercle est en ébonite et porte à sa partie centrale un tube de verre surmonté d'une douille en cuivre : sur cette douille tourne à frottement un tambour dont le fond, aussi en ébonite, porte une pince centrale à laquelle est fixé le fil de platine qui forme la suspension de l'aiguille. Chaque paire de secteurs communique avec un des pôles d'une pile de 50 petits éléments Daniell bien isolés. Le tambour est muni d'un bouton avec vis de serrage auquel on attache le fil métallique aboutissant au collecteur, qui communique

(1) Voir les supports isolants de M. Mascart, *Journal de physique*, vol. VII, p. 217, 1878.

ainsi son potentiel à l'aiguille. On a donc un électromètre symétrique. Pour ramener les indications de l'appareil à une unité fixe, il suffit de connaître la déviation produite par une pile de force électro-motrice connue, dont un pôle est mis à la terre, et l'autre mis en contact avec le bouton de suspension de l'aiguille. A Montsouris, on prend pour unité la différence des potentiels des deux pôles d'un élément Daniell.

Le miroir plan se trouve au-dessous de l'aiguille, et la lecture se fait à l'aide d'une lunette munie d'une règle divisée horizontale.

On rend cet instrument portatif, en substituant à la lunette et à sa règle divisée un microscope porté par l'appareil lui-même. Le bouton supérieur de l'instrument peut, en outre, recevoir une tige de cuivre terminée par une pointe horizontale, destinée à porter la mèche en ignition, faisant office de collecteur.

On emploie aussi l'*électromètre portatif* de Thomson (pl. V). Chargé à l'avance, il peut conserver sa charge durant plusieurs semaines, en sorte qu'il n'est pas nécessaire d'emporter de pile dans les excursions. Ses indications sont d'ailleurs indépendantes de son degré de charge antérieure.

On charge à l'avance l'anneau de garde *hh* et la bouteille de Leyde, en dévissant la vis qui se trouve sur la gauche du couvercle (fig. 1), et introduisant, par l'orifice que l'on débouche ainsi, une tige métallique passant au travers d'un tube de verre qui l'isole du couvercle; elle est terminée en pointe à sa partie supérieure, et son extrémité inférieure touche l'anneau de garde. On passe alors au-dessus de la pointe une plaque en ébonite électrisée, qui électrise négativement l'anneau de garde et la bouteille de Leyde. Le chapeau *t* (fig. 3) est percé en son centre d'une ouverture dans laquelle on introduit la tige de cuivre munie d'une mèche en ignition. En abaissant le chapeau, et tenant l'électromètre à la main, la tige et le plateau *g* communiquent ensemble et avec la main qui tient l'appareil : ils sont donc au potentiel zéro. La lecture du zéro faite, on soulève le chapeau *t*, et le collecteur, ne communiquant plus avec le sol, donne au plateau *g* le potentiel de la couche d'air dans laquelle brûle la mèche.

Il importe, dans toutes les observations, que le collecteur soit bien isolé. On s'en assure en supprimant la mèche, ou arrêtant le filet d'eau; on électrise l'électromètre par influence, au moyen d'un bâton de verre ou de résine et on l'abandonne à lui-même. L'aiguille déviée ne doit revenir au zéro que très lentement.

*Électromètre enregistreur.* — L'électromètre enregistreur de Montsouris, construit par M. Salleron, est double : deux tubes de verre renferment deux fils fins de platine auxquels sont suspendues deux aiguilles d'aluminium. Au-dessous de ces aiguilles sont les sec-

teurs plats, traversés verticalement par une tige portant le miroir, mobile avec l'aiguille, et deux petites ailettes plongeant dans de la glycérine additionnée d'un peu d'eau et destinée à amortir les oscillations. Les deux fils de platine sont reliés tous les deux au même collecteur d'électricité. Les quadrants, d'autre part, sont chargés par la même pile; mais les électromètres sont réglés de telle sorte que l'un d'eux soit environ dix fois plus sensible que l'autre.

Les rayons émanés d'une même lampe à gaz sont réfléchis par deux prismes à réflexion totale, et forment deux faisceaux qui tombent sur deux lentilles convergentes portées par la caisse de l'électromètre. Au sortir des lentilles, ces faisceaux arrivent aux miroirs des électromètres qui les réfléchissent sur un tambour cylindrique horizontal. Une grande lentille cylindrique, placée en avant du tambour, transforme les lignes lumineuses verticales et droites, que les images des fentes formeraient sur le tambour, en deux points lumineux qui se déplacent horizontalement par l'effet des variations de l'électricité atmosphérique. Le tambour, qui fait une révolution en deux jours et demi, est recouvert d'une feuille de papier ciré, trempé d'abord pendant deux heures dans une dissolution d'iodure et de bromure de potassium; puis, après dessiccation, dans une dissolution d'azotate d'argent. Le pouvoir photogénique du gaz étant faible et les aiguilles étant presque sans cesse en mouvement, le développement de l'image, encore invisible au sortir de l'appareil, est opéré par le carbonate d'ammoniaque et l'acide pyrogallique.

Les heures sont marquées sur les deux courbes par l'intervention d'un électro-aimant qui décharge l'appareil pendant quelques minutes. Tout l'appareil, y compris le collecteur à gouttes d'eau, est renfermé dans une grande vitrine, garnie de verres jaunes, laquelle est elle-même placée dans un petit kiosque situé au milieu du parc de l'Observatoire.

Les courbes photographiques sont larges, un peu baveuses et manquent quand l'image se déplace rapidement. M. Rédier a construit, sur les indications de M. Mascart (1), un inscripteur mécanique qui permet d'obtenir des courbes plus fines au moyen de crayons ordinaires et donne des résultats plus exacts, quoique les phénomènes ne soient traduits que par intermittences. Les déviations de l'aiguille sont transmises toutes les deux minutes et demie au crayon inscripteur. L'ensemble des tracés produit une courbe composée d'escaliers très rapprochés.

*Résultats.* — Le tableau suivant (2) donne pour chaque mois, en

(1) *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris* pour 1880, p. 336.

(2) *Journal de physique*, vol. VIII, p. 329, 1879.

éléments Daniell, les moyennes diverses déduites des moyennes mensuelles observées aux heures suivantes : 6 et 9 h. m., midi, 3 et 6 h. s.

1878. Octobre	14,5	1879. Avril	45,6
— Novembre	22,1	— Mai	34,5
— Décembre	84,4	— Juin	17,7
1879. Janvier	86,9	— Juillet	21,0
— Février	64,7	— Août	33,4
— Mars	43,4	— Septembre	18,2

D'après M. Mascart, le potentiel de l'air est, en général, positif; par les temps couverts, les courbes deviennent plus agitées; *la pluie donne presque toujours de grandes déviations négatives*. Le changement de signe se manifeste avant le début de la pluie, et quelquefois aussi la pluie est suivie d'indications positives très élevées. On a eu quelques exemples rares soit de pluies positives, soit de grandes déviations négatives sans pluie apparente dans le voisinage.

Le potentiel est plus uniforme et plus élevé pendant la nuit que pendant le jour. Le maximum paraît avoir lieu vers 9 ou 10 heures du soir; le minimum vers 3 heures du soir, d'après les dernières observations (1).

J. R.

## V

### DES MACHINES TRANSFORMANT EN ÉLECTRICITÉ LE TRAVAIL MÉCANIQUE (2).

Dans les machines ordinaires à frottement (page 12) une partie du travail est dépensée à vaincre le frottement : de là l'importance de dispositions produisant l'électrisation uniquement par transformation du travail mécanique dépensé pour vaincre les forces électriques.

Les appareils de cette catégorie, à laquelle appartiennent la machine de Holtz (page 14) et le rechargeur de Thomson (page 67), permettent de *multiplier* une charge donnée d'électricité statique : de là le nom de *multiplificateurs d'induction* qu'on leur donne quelquefois. Ils reposent sur les deux principes suivants :

1° Un corps conducteur, non électrisé, placé à l'intérieur d'un vase

(1) *Journal de phys.*, vol. VIII, p. 329, 1879.

(2) Maxwell, *Electricity*, vol. I, art. 209.

métallique clos, préalablement électrisé, ne subit aucune action électrique de la part du vase, même s'il est mis en contact avec lui : car il prend le potentiel de ce dernier ; mais, en le mettant en communication avec la terre, pendant qu'il est à l'intérieur du vase, le corps s'électrise et sa charge, contraire à celle du vase, devient libre, si, après avoir rompu sa communication avec le sol, on le retire du vase et on l'éloigne à une distance suffisante.

2° Un corps conducteur électrisé, placé dans un vase clos et mis en contact avec lui, lui cède toute sa charge, quelle que soit l'électrisation antérieure du vase, et est complètement déchargé quand on le retire (page 22).

Cela posé, concevons une série de petits conducteurs isolés, mobiles autour d'un axe de rotation et pénétrant, dans leur mouvement, à l'intérieur de deux conducteurs fixes creux A et C nommés *inducteurs* et de deux autres conducteurs également fixes et creux, B et D, nommés *récepteurs*, tous les quatre disposés symétriquement, et de manière que chacun d'eux enveloppe les mobiles aussi complètement que possible. Supposons l'inducteur A électrisé positivement, et l'un des mobiles dans l'intérieur de cet inducteur : si, pendant qu'il est complètement enveloppé, un ressort le met en communication avec la terre, il restera chargé négativement. Le mobile, en tournant, arrivera ensuite dans l'intérieur du récepteur B, où il touche un ressort qui le met en communication avec ce récepteur : il lui abandonnera sa charge négative et reviendra à l'état neutre. Il pénétrera ensuite dans l'inducteur C, que nous supposerons électrisé négativement, et se trouvera un instant en communication avec la terre ; il acquerra alors une charge positive, qu'il entraînera sur le récepteur D et ainsi de suite. Si l'on met l'inducteur A en communication avec le récepteur D, et l'inducteur C avec le récepteur B, les potentiels des inducteurs croîtront à chaque révolution, et les quantités d'électricité, communiquées aux récepteurs, croîtront continuellement.

*Duplicateur tournant de Nicholson.* — Le premier appareil de ce genre semble être le *duplicateur tournant* de Nicholson, décrit dans le « Philosophical Transactions » de 1788, comme « un instrument au moyen duquel on produit les deux espèces d'électricité sans frottement par la rotation ». C'est à l'aide d'un appareil de ce genre que Volta a réussi à multiplier l'électrisation de la pile jusqu'à la rendre sensible à son électromètre. Des instruments construits sur le même principe ont été inventés séparément par M. C. F. Varley (1) et par Sir W. Thomson.

(1) Brevet du 27 janvier 1850.

Prenons comme exemple le *rechargeur* de Thomson (fig. 16, p. 68) 2 conducteurs, consistant en lames verticales légèrement courbées, disposés symétriquement, sont supportés par une plaque horizontale d'ébonite, susceptible de tourner autour d'un axe vertical passant par son centre. Deux grandes surfaces, à peu près demi-cylindriques, enveloppent ces conducteurs presque complètement : ce sont les *inducteurs*. Chacun d'eux est muni d'un ressort horizontal, dit ressort *récepteur*, fixé par une extrémité à sa surface extérieure, et qui pénètre en partie dans son intérieur par une fente ménagée à cet effet. Deux ressorts verticaux, dits ressorts *connecteurs*, sont disposés symétriquement sur la plaque en ébonite qui forme la base de l'instrument et reliés par une plaque métallique appliquée sur la face postérieure de celle-ci. Chacun de ces ressorts verticaux est aussi enveloppé en grande partie par un des inducteurs. Les conducteurs mobiles, dans une demi-révolution, touchent successivement un ressort connecteur et un ressort récepteur.

Supposons d'abord que les ressorts connecteurs soient reliés à la terre ; avec le petit électrophore (p. 18) donnons une charge positive à l'inducteur de droite, et tournons le bouton de l'axe en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre. Le conducteur mobile actuellement à droite, au moment où il touchera le ressort connecteur de droite, relié à la terre, prendra par induction une charge négative qu'il entraînera avec lui, et déposera sur l'inducteur de gauche en touchant le ressort récepteur de ce dernier. Il sera alors à l'état neutre ; mais avant de sortir de l'inducteur de gauche, qui a maintenant une petite charge négative, il touchera le ressort connecteur de gauche, et prendra par influence une charge positive qu'il transportera sur l'inducteur de droite, quand il touchera le ressort connecteur de ce dernier. L'inducteur de droite, dont la charge est augmentée, induira sur lui une charge négative quand il touchera de nouveau le ressort connecteur de droite : il la déposera sur l'inducteur de gauche et ainsi de suite.

La charge des deux inducteurs va ainsi en croissant continuellement à chaque tour, jusqu'à ce qu'il éclate des étincelles.

On peut se dispenser de mettre les ressorts connecteurs en communication avec la terre : il suffit qu'ils soient réunis métalliquement entre eux.

En tournant l'axe en sens contraire, on diminuerait à chaque tour la charge des inducteurs.

On obtiendrait sur l'inducteur de gauche des charges croissant à chaque tour de quantités égales en supprimant le ressort connecteur de gauche et le ressort récepteur de droite, et mettant à la terre le



ressort connecteur de droite. Mais il faudrait maintenir une charge constante sur l'inducteur de droite : on y parviendrait en mettant cet inducteur en communication avec un autre rechargeur ayant la disposition décrite tout d'abord, lequel lui fournirait une charge dont la constance serait réglée par une jauge électrométrique (page 66).

Quand l'instrument est employé comme accessoire de l'électromètre, l'inducteur de droite est relié à l'aiguille et à l'armature intérieure de la bouteille, comme le montre la figure, et l'inducteur de gauche à la cage métallique extérieure de l'appareil.

*Multiplicateur à gouttes d'eau.* — Sir W. Thomson a construit un multiplicateur dans lequel les mobiles sont les gouttes provenant d'un filet d'eau qui se brise dans l'intérieur d'un inducteur et recueillies dans un récepteur isolé. Ce récepteur reçoit ainsi continuellement une charge opposée à celle de l'inducteur. L'eau s'écoule du récepteur par un entonnoir dont le tuyau est presque entièrement enveloppé par le métal du récepteur. Les gouttes d'eau sortent de cet entonnoir presque à l'état neutre. Un autre inducteur et un autre récepteur identiques sont disposés de façon que l'inducteur d'un système soit en communication avec le récepteur de l'autre. Les charges des récepteurs croissent alors en progression géométrique avec le temps; elles sont de signes contraires. Cet accroissement dure jusqu'au moment où les gouttes d'eau sont déviées de leur course par la répulsion électrique et viennent tomber hors de l'ouverture des récepteurs. C'est la chute de l'eau qui fournit ici l'énergie nécessaire à la production de l'électrisation.

*Machine de Holtz* (fig. 3, p. 14). — Elle est fondée sur les mêmes principes que les appareils précédents; mais comme le mobile est un plateau isolant et que les inducteurs (armures de papier) sont des conducteurs imparfaits, l'explication complète de l'action est plus difficile que pour les instruments dans lesquels les mobiles sont de bons conducteurs de forme connue, qui se chargent et se déchargent en des points déterminés.

J. R.

## VI

DÉFINITIONS ET FORMULES ÉLECTROSTATIQUES  
 APPLICATIONS NUMÉRIQUES

## CHAMP ÉLECTRIQUE (1)

Le *champ électrique* est la portion de l'espace qui environne un corps électrisé, quand on l'envisage au point de vue des phénomènes électriques.

Lorsqu'un corps électrisé est placé dans un champ électrique, il subit l'action d'une force qui dépend en général de la forme du corps et de sa charge, si celle-ci est assez considérable pour produire une perturbation sensible dans l'électrisation antérieure des autres corps.

Mais si le corps est très petit, et sa charge également très petite, l'électrisation des autres corps ne sera pas sensiblement modifiée par sa présence, et on pourra considérer ce corps comme représentant par son centre de gravité un certain point du champ. La force qui agit sur lui sera alors proportionnelle à sa charge, et changera de sens quand la charge changera de signe.

## FORCE ÉLECTRIQUE RÉSUŁTANTE

La *force électrique résultante* en un point d'un champ est la force que l'unité de l'électricité concentrée en ce point éprouverait, si cette unité d'électricité n'exerçait pas d'influence sur les distributions électriques du voisinage.

$e$  étant la charge d'un corps,  $F$  la force qui agit sur lui dans une certaine direction,  $F$  est proportionnel à  $e$  quand  $e$  est petit, et l'on a  $F = Re$ ,  $R$  dépendant des autres corps du champ. Si on peut faire  $e = 1$  sans modifier l'électrisation des autres corps, on a  $F = R$ .

## POTENTIEL ÉLECTRIQUE (voir p. 38).

Si un petit corps, chargé d'une petite quantité d'électricité  $e$ , est transporté d'un point donné à une distance infinie des corps électrisés qui forment le champ, il subit en chaque point de sa course l'action

(1) *Electricity*, de Maxwell, vol. I, p. 45, et appendice C au *Brit. Assoc. Report de 1868, On standards of electrical resistance.*

d'une force  $Re$ ,  $R$  variant d'un point à l'autre du parcours. Soit  $V_e$  le travail total développé par l'action de ces forces sur le corps,  $V$  est le potentiel au point du champ d'où le corps est parti. Si on peut faire  $e=1$ , sans troubler l'électrisation des autres corps, le potentiel en un point sera le travail développé par un corps chargé de l'unité d'électricité, en se transportant de ce point à une distance infinie.

Un corps électrisé positivement tend à se mouvoir des positions où le potentiel positif a une plus grande valeur vers celles où il a une valeur plus petite ou vers celles où le potentiel est négatif, et un corps électrisé négativement tend à se mouvoir dans une direction opposée.

Dans un conducteur, l'électricité se distribue exactement comme si elle était libre de se mouvoir dans le conducteur en suivant la loi précédente. Si donc deux parties d'un même conducteur ont des potentiels différents, l'électricité positive se transporte des parties où le potentiel est le plus élevé à celles qui ont un potentiel moindre, et le mouvement continue tant que la différence de potentiel subsiste. Un conducteur ne peut donc être en équilibre électrique que si, en tous les points de la surface ou de l'intérieur, le potentiel a la même valeur. Ce potentiel est appelé le *potentiel du conducteur*.

#### SURFACES ÉQUIPOTENTIELLES (voir p. 42).

Tous les points du champ qui ont le même potentiel font partie d'une même surface que l'on appelle surface équipotentielle.

Un point électrisé astreint à rester sur une pareille surface n'a aucune tendance à se déplacer sur cette surface, puisque le potentiel a la même valeur en tous les points de celle-ci. Une surface équipotentielle est donc une surface d'équilibre ou surface de niveau.

La force résultante en un point de la surface est dirigée suivant la normale à cette surface, et la grandeur de la force est telle que le travail développé par une unité d'électricité, pour se transporter de la surface  $V$  à la surface  $V'$ , est  $V-V'$ .

Deux surfaces équipotentielles, à des potentiels différents, ne peuvent se couper, car le même point ne peut avoir plus d'un potentiel mais une surface équipotentielle peut se couper elle-même et donner lieu à des points et lignes d'équilibre.

La surface d'un conducteur en équilibre électrique est nécessairement une surface équipotentielle. Si l'électrisation du conducteur est positive sur toute la surface, le potentiel diminue à mesure qu'on s'éloigne de la surface dans toutes les directions, et le conducteur est enveloppé par une série de surfaces de potentiels moindres.

Mais si certaines parties du corps sont électrisées positivement et d'autres négativement, la surface équipotentielle complète se composera de la surface du conducteur lui-même et de plus d'un système d'autres surfaces coupant la surface du conducteur suivant les lignes qui séparent les régions positives des régions négatives : ces lignes sont des lignes d'équilibre et un point électrisé placé sur l'une d'elles ne subira de force dans aucune direction ; en d'autres termes, la force résultante est nulle en tous les points de ces lignes.

Lorsque la surface d'un corps est électrisée positivement dans certaines parties et négativement dans d'autres, c'est qu'il y a dans le champ quelque autre corps électrisé dont le potentiel a le même signe que celui du conducteur considéré, mais avec une valeur numérique plus grande.

En traçant une série de surfaces équipotentielles correspondant aux potentiels 1, 2, 3...  $n$ , on peut obtenir la carte d'un champ de manière à mettre ses propriétés en évidence.

#### LIGNES DE FORCE

Il y a un autre moyen d'explorer un champ de forces et d'indiquer la direction et la grandeur de la force en chaque point. On doit à Faraday la conception et l'application de cette méthode.

La ligne décrite par un point qui se meut toujours dans la direction de la force résultante s'appelle une ligne de force. En traçant un nombre suffisant de ces lignes, on peut indiquer la direction de la force dans toutes les parties du champ ; mais en les traçant suivant une certaine règle, on peut indiquer l'intensité de la force en chaque point en même temps que sa direction.

On démontre, en effet, que si, dans une partie de leur course, le nombre des lignes traversant l'unité d'aire est proportionnel à l'intensité de la force sur l'élément considéré, la même proportion entre le nombre de lignes dans l'unité d'aire et l'intensité subsiste tout le long de ces lignes.

Il suffit que, dans une certaine partie de leur course, on espace ces lignes, de telle sorte que le nombre des lignes émanant de l'unité d'aire soit *égal* au nombre qui représente l'intensité du champ dans cette partie : l'intensité de la force dans une autre partie du champ sera mesurée par le nombre des lignes qui sont coupées par l'unité d'aire dans cette partie ; chaque ligne représente une force égale et constante.

RELATION ENTRE LES LIGNES DE FORCE ET LES SURFACES  
ÉQUIPOTENTIELLES

Les lignes de force sont toujours normales aux surfaces équipotentiellles, et le nombre des lignes coupées par l'unité d'aire d'une surface équipotentielle est l'inverse de la distance qui sépare cette surface de celle qui la suit dans l'ordre numérique.

Dans un champ uniforme, les lignes de force sont droites, parallèles et équidistantes; les surfaces équipotentiellles sont alors des plans perpendiculaires aux lignes de force et équidistants entre eux.

Si un centre d'attraction d'intensité  $m$  est seul dans le champ, ses lignes de force sont des lignes droites, rayonnant du centre également dans toutes les directions, et leur nombre est  $4\pi m$ . Les surfaces équipotentiellles forment une série de sphères concentriques dont les rayons sont

$$m, \frac{1}{2}m, \frac{1}{3}m, \frac{1}{4}m, \text{ etc.}$$

L'intensité du champ en un point est, dans ce cas, égale à la masse  $m$  du centre d'attraction divisée par le carré de la distance de ce point au centre.

DENSITÉ ÉLECTRIQUE

La densité électrique est la quantité d'électricité contenue dans l'unité d'aire, ou la charge par centimètre carré, aux divers points de la surface d'un conducteur électrisé. Pour étudier la distribution électrique sur un conducteur, Coulomb compare les densités aux divers points de la surface à l'aide du *plan d'épreuve* et de la balance de torsion. Le plan d'épreuve est un petit disque de clinquant porté par une tige isolante; ce disque se confond avec la surface aux points où il la touche, et la quantité d'électricité qu'il prend est assez petite pour ne pas altérer sensiblement la charge du conducteur. On mesure la quantité d'électricité sur chaque centimètre carré par la répulsion que le plan d'épreuve imprime à la balance.

Sur une sphère, la distribution électrique est uniforme, c'est-à-dire que la densité est la même en tous les points.

RELATION ENTRE LA DENSITÉ ET LA FORCE RÉSUULTANTE  
A LA SURFACE D'UN CONDUCTEUR

La force résultante en un point de l'air très voisin de la surface d'un conducteur électrisé est perpendiculaire à cette surface, puisque

c'est une surface équipotentielle, et égale à  $4 \pi \epsilon$ ,  $\epsilon$  étant la densité électrique dans la portion de la surface voisine du point. On a donc  $R = 4 \pi \epsilon$ .

#### PRESSION OU TENSION ÉLECTRIQUE

La force résultante s'exerçant sur chaque point de la surface du conducteur normalement à cette surface, il en résulte que chaque point est soumis à une force venant du conducteur (tension) et s'exerçant contre l'air qui l'entoure. Si on découpe un élément  $\omega$  de la surface, la résultante des actions du reste de la surface sur cet élément est  $2 \pi \epsilon \times \epsilon \omega$ .

La *pression électrique* est cette force rapportée à l'unité de surface. On a donc

$$p = 2 \pi \epsilon^2 = \frac{1}{8 \pi} R^2.$$

#### FORCE ÉLECTROMOTRICE

Lorsque deux corps à des potentiels différents sont réunis par un fil conducteur, la tendance de l'électricité à s'écouler le long du fil est mesurée par la différence de potentiel des deux corps. La différence de potentiel entre deux conducteurs ou entre deux points s'appelle la *force électromotrice*. La force électromotrice peut provenir d'autres causes qu'une différence de potentiel.

#### CAPACITÉ D'UN CONDUCTEUR

Si un conducteur isolé est chargé d'une quantité  $Q$  d'électricité au potentiel  $V$ , pendant que les conducteurs environnants sont maintenus au potentiel zéro en les mettant en communication avec la terre, le rapport  $\frac{Q}{V}$  est la capacité du conducteur:  $C = \frac{Q}{V}$ .

Si le conducteur est complètement entouré par une enveloppe conductrice, sans qu'il y ait contact, la charge du conducteur intérieur est égale et opposée à la charge qui se trouve sur la surface intérieure du conducteur extérieur, et a pour valeur le produit de la capacité du conducteur intérieur par la différence de potentiel des deux conducteurs.

#### ACCUMULATEURS ET CONDENSATEURS

Un système de deux conducteurs dont les surfaces opposées sont séparées l'une de l'autre par une matière isolante est un accumula-

teur ou condensateur électrique. Sa capacité est proportionnelle aux aires des surfaces opposées, et inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche isolante.

Les accumulateurs proprement dits ont une capacité invariable, comme la bouteille de Leyde. Plusieurs auteurs réservent le nom de condensateurs aux systèmes à capacité variable, comme le condensateur à plateaux, dont on fait varier le potentiel de la charge en rapprochant ou éloignant les surfaces en présence.

On appelle *condensateurs absolus* ceux dans lesquels la densité est sensiblement uniforme, par suite de la forme régulière des surfaces. La capacité peut alors être obtenue par le calcul.

FORMULES POUR LA CAPACITÉ DES CONDENSATEURS ABSOLUS A AIR

Q étant la charge, V la différence de potentiel des deux surfaces, C la capacité, S l'aire de la surface,  $\epsilon$  la densité électrique, on a les relations

$$Q = CV \quad \text{et} \quad \epsilon = \frac{Q}{S}$$

Sphère isolée dans l'espace, de rayon  $r$  :

$$C = r, \quad \epsilon = \frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{V}{4\pi r}$$

Sphères concentriques (R et  $r$ ) :

$$C = \frac{Rr}{R-r}$$

Cylindres concentriques très longs (longueur  $l$ , diamètres D et  $d$ ) :

$$C = \frac{l}{2 \log \text{Nep.} \frac{D}{d}} = \frac{l \log e}{2 \log \frac{D}{d}} = \frac{l \times 0,4343}{2 \log \frac{D}{d}}$$

Cylindre horizontal très long à la distance  $h$  d'un plan horizontal indéfini (fil télégraphique suspendu) :

$$C = \frac{l \times 0,4343}{2 \log \frac{4h}{d}}$$

Plans parallèles à la distance  $d$ , et cylindres concentriques dont la distance  $d$  est très petite par rapport aux rayons (bouteille de Leyde) :

$$C = \frac{S}{4\pi d} \quad \epsilon = \frac{V}{4\pi d}$$

Plan conducteur entre deux plans parallèles équidistants *mis à la terre* :

$$C = \frac{S}{2\pi d}.$$

#### CONDENSATEURS A DIÉLECTRIQUE QUELCONQUE

On obtient leur capacité en multipliant par la capacité inductive spécifique  $K$  du diélectrique la capacité du condensateur à air de même forme géométrique et mêmes dimensions.

Par exemple, la capacité d'un condensateur composé de feuilles superposées d'étain et de papier paraffiné sera

$$C = \frac{KS}{2\pi d},$$

$S$  étant la surface totale des feuilles d'étain reliées à la source, et  $d$  l'épaisseur du diélectrique.

#### ÉQUATION DE L'ÉQUILIBRE ÉLECTRIQUE

L'équilibre d'un système de conducteurs électrisés mis en communication s'obtient par l'égalisation du potentiel.

Si deux conducteurs de capacité  $C$  et  $C'$ , chargés de quantités d'électricité  $Q$  et  $Q'$  aux potentiels  $V$  et  $V'$ , assez éloignés l'un de l'autre pour que leur influence mutuelle soit négligeable, sont mis en communication par un fil long et mince, ils prennent un potentiel commun  $x$  donné par la relation

$$x(C + C') = Q + Q' = CV + C'V'.$$

#### CONDENSATEURS CHARGÉS PAR LA PILE

Un condensateur dont les deux armatures sont mises dans le circuit d'une pile de force électromotrice  $E$ , prend une charge  $Q = CE$ .

Deux condensateurs de capacités  $c$  et  $c'$ , reliés par une de leurs armatures, l'un au pôle (+), l'autre au pôle (—) d'une pile isolée, les autres armatures étant à la terre, prennent des charges  $q$  et  $-q$ , égales et de signes contraires, car tout générateur électrique développe toujours des quantités égales des deux espèces d'électricité. Si les capacités sont inégales, les potentiels  $v$  et  $v'$  de ces charges seront inégaux.

On a

$$q = cv \quad \text{et} \quad -q = c'v', \quad \text{d'ailleurs} \quad v - v' = E,$$



d'où

$$v = \frac{Ec'}{c + c'}, \quad q = \frac{E}{\frac{1}{c} + \frac{1}{c'}}, \quad v' = \frac{Ec}{c + c'}$$

Mais si on met le milieu de la pile à la terre, chaque fois qu'une certaine quantité d'électricité passera sur un condensateur, une quantité égale et de signe contraire s'écoulera à la terre par le milieu : chaque moitié de la pile agira alors indépendamment de l'autre et, si les condensateurs ont des capacités inégales, ils prendront des charges  $q = cv$ ,  $q' = -c'v$ , qui seront inégales et ils auront chacun le potentiel  $\pm v$  du pôle auquel ils sont reliés.

#### CONDENSATEURS RELIÉS EN SURFACE

Si un certain nombre de condensateurs, de capacités respectives  $a, b, c$ , etc., ont tous une armature reliée à une source électrique commune et l'autre à la terre, la capacité totale du système est :

$$C = a + b + c, \text{ etc.}$$

Si les condensateurs sont chargés séparément de quantités

$$q = av, \quad q' = bv', \quad q'' = cv'', \text{ etc.}$$

et qu'on les mette en communication, la charge totale sera

$$Q = q + q' + q'' + , \text{ etc.}$$

et le potentiel commun

$$\frac{Q}{C} = \frac{av + bv' + cv'' + , \text{ etc.}}{a + b + c + , \text{ etc.}}$$

Si un seul des condensateurs est électrisé et possède une charge  $q = av$ , le potentiel commun, après la réunion, sera

$$\frac{q}{C} = \frac{av}{a + b + c + , \text{ etc.}}$$

#### CONDENSATEURS CHARGÉS EN CASCADE

L'armature interne du premier est reliée à la source, son armature externe à l'armature interne du deuxième, l'armature externe de celui-ci à l'armature interne du troisième, et ainsi de suite, l'armature externe du dernier étant à la terre.

La capacité  $C$  du système est donnée par la relation

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}, \text{ etc.}$$

S'il y a  $n$  condensateurs de même capacité  $a$

$$V = \frac{nQ}{a}, \quad Q = \frac{aV}{n} \quad \text{et} \quad C = \frac{a}{n}.$$

Si on décharge le système, la quantité d'électricité qui passe dans le circuit extérieur est seulement

$$\frac{aV}{n};$$

mais si on coupe la communication entre les condensateurs, chacun d'eux a séparément une charge égale aussi à

$$\frac{aV}{n}.$$

#### ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Quand on électrise un conducteur isolé ou un condensateur par le mouvement d'une machine, il faut dépenser une certaine quantité de travail moteur qui, s'il n'y a pas eu d'autres résistances à vaincre que les forces électriques, doit se retrouver tout entière dans le travail qu'effectueront les masses électriques répandues sur le conducteur, quand celui-ci sera déchargé.

La force vive, capable de produire ce travail et emmagasinée dans le conducteur, est ce que l'on appelle *l'énergie électrique*.

L'énergie s'exprime par

$$W = \frac{1}{2} VQ = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} V^2 C,$$

$Q$  étant la charge,  $V$  le potentiel,  $C$  la capacité du conducteur ou condensateur.

Quand on décharge un condensateur, en reliant métalliquement ses deux armatures, par exemple, le travail  $W$  produit se traduit par une étincelle et par un échauffement du fil de communication. Si ce fil est long et fin, l'étincelle est petite et le travail correspondant négligeable. Toute l'énergie correspond alors à la chaleur développée dans le fil, et on pourra mesurer la quantité de chaleur équivalente.

## UNITÉ D'ÉNERGIE

L'unité d'énergie est la même que l'unité de travail, car l'énergie est mesurée par la somme de travail qu'elle représente.

Dans le système C. G. S, l'unité d'énergie est donc le *erg* :  $g$  étant l'accélération de la pesanteur en centimètres, on aura entre les unités ordinaires (ou unités de gravitation) de travail et le *erg* les relations suivantes :

$$\begin{aligned} 1 \text{ gramme-centimètre} &= g \text{ ergs} \\ 1 \text{ kilogramme-mètre} &= 100000 g \text{ ergs.} \end{aligned}$$

L'unité de source d'énergie est 1 *erg* par seconde.

$$\begin{aligned} 1 \text{ cheval-vapeur} &= 75 \text{ kilogrammètres par seconde} = 7,36 \times 10^9 \text{ ergs,} \\ &\text{ en prenant } g = 981. \end{aligned}$$

## UNITÉ DE CHALEUR

L'unité de chaleur ou *calorie* est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° centigrade la température de l'unité de masse de l'eau (un gramme d'eau).

## ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

L'équivalent mécanique de la chaleur est le nombre de *ergs* correspondant à la disparition d'une quantité de chaleur égale à une *calorie*.

D'après la dernière détermination de Joule (1867), l'équivalent mécanique de la chaleur est 430 kilogrammètres

$$J = 4,2 \times 10^7 \text{ ergs.}$$

c'est-à-dire qu'une calorie (gramme) équivaut à 42 millions de *ergs*.

Quand toute l'énergie électrique est employée à chauffer le fil dans lequel passe la décharge, on connaîtra le nombre de calories développées par la relation

$$JH = \frac{1}{2} QV.$$

## APPLICATIONS NUMÉRIQUES

*Potential d'un élément Daniell.* — Sir W. Thomson a mesuré le

potentiel d'un élément Daniell à l'aide de l'électromètre absolu (p. 90).  
En se reportant aux notations de la page 90, la densité est

$$\varepsilon = \frac{V}{4\pi D},$$

et l'attraction des disques en présence est

$$2\pi\varepsilon^2 \times A = \frac{A}{8\pi D^2} V^2.$$

Cette attraction est équilibrée par un poids  $W$ , c'est-à-dire par  $Wg$  dynes.

On a donc

$$\frac{A}{8\pi D^2} V^2 = Wg,$$

où

$$V = D \sqrt{\frac{8\pi Wg}{A}}. \quad (1)$$

L'expérience montra qu'il fallait un poids de 0,057 grammes par centimètre carré, les disques étant à une distance de 1 millimètre, pour équilibrer l'attraction de 1000 éléments Daniell. Substituant dans la relation (1), on a, en unités C.G.S.

$$V = 0,1 \sqrt{8\pi \times 0,057 \times 981} = 3,74.$$

Le potentiel de 1 élément Daniell en unités C.G.S est donc 0,00374 (\*).

Une balle conductrice de 1 centimètre de diamètre, électrisée par 1000 éléments Daniell, prendra une charge de  $0,5 \times 3,74$  ou 1,87 unité d'électricité.

Elle repousserait une balle égale et également chargée à la distance d'un mètre avec une force de

$$\frac{1,87 \times 1,87}{10000} = 0,00035 \text{ dyne,}$$

ou

$$\frac{1}{g} \times 0,00035 \text{ gramme,}$$

soit, approximativement, en prenant  $g = 1000$  (au lieu de 981): 0,00000035 gramme.

Un condensateur à air de 1 mètre carré, composé de deux plateaux

(\*) F. Jenkin, *Electricity and Magnetism*, p. 100. London, Spon, 1873.

à 1 millimètre de distance, électrisé par 1000 éléments Daniell, prendrait une charge de

$$10000 \frac{3,74}{4\pi \times 0,1} = 2976 \text{ unités.}$$

Si le diélectrique était, au lieu de l'air, de la gutta-percha dont la capacité inductive spécifique est 4,2, la charge de condensation serait

$$2976 \times 4,2 = 12499.$$

La capacité d'un condensateur formé de deux cylindres concentriques est

$$C = \frac{l \times 0,4343}{2 \log \frac{D}{d}} \times K.$$

La capacité d'un mille marin (1852 mètres) d'un câble atlantique dont le rapport des diamètres de la gutta-percha et du conducteur en cuivre est 2,8 (ce qui suppose des poids égaux de cuivre et de gutta-percha), s'obtiendra en faisant dans la formule précédente

$$l = 185200, \quad K = 4,2, \quad \text{et} \quad \frac{D}{d} = 2,8.$$

On a

$$C = \frac{185200 \times 0,4343 \times 4,2}{2 \log 2,8} = 377000.$$

Pour avoir la même capacité avec un condensateur composé de lames d'étain séparées par du papier paraffiné, en admettant un tiers de millimètre pour l'épaisseur du diélectrique et  $K = 2$ , il faudrait une étendue totale de feuilles telle que

$$\frac{S}{4\pi \times 0,033} \times 2 = 377000,$$

d'où

$$S = 77600 \text{ c. carrés} = 7^{\text{m}^2},76.$$

Un kilomètre de fil télégraphique de 4 millimètres de diamètre suspendu à une hauteur de 4 mètres, aura une capacité

$$C = \frac{l \times 0,4343}{2 \log \frac{4h}{d}} = \frac{100000 \times 0,4343}{2 \log \frac{1600}{0,4}} = 6000.$$

*Potentiel des machines électriques* (\*). — D'après M. Thomson, les machines à frottement, donnant des étincelles de 30 centimètres de long, ont un potentiel correspondant à celui d'une pile de 80 à 100 000 éléments Daniell. En prenant 80 000, le potentiel développé serait de  $0,00374 \times 80000$ , soit environ 300.

Deux disques plans distants de 1 millimètre, dont l'un serait électrisé à ce potentiel et l'autre à la terre, s'attireraient avec une force qui, par centimètre carré, serait égale à

$$\frac{1 \times (300)^2}{8\pi \times (0,1)^2} = 360000 \text{ dynes,}$$

ou

$$\frac{360000}{g} \text{ grammes,}$$

soit 367 grammes.

La charge d'une sphère isolée de 1 centimètre de diamètre, électrisée au potentiel 300, serait  $0,5 \times 300 = 150$ ; la densité  $\epsilon$  à la surface serait

$$\frac{150}{4\pi \times (0,5)^2} = 47,7$$

La pression contre l'air atmosphérique ( $2\pi\epsilon^2$  par centimètre carré) serait de 14289 dynes ou 14,57 grammes. Aussi une bulle de savon se gonfle quand on l'électrise et diminue de volume quand on la décharge.

La pression augmente quand le rayon diminue : cherchons quelle valeur doit avoir le rayon pour que la pression soit égale à la pression atmosphérique, soit 10 mètres d'eau, ou 1000 grammes par centimètre carré, ou environ (en prenant  $g = 1000$  pour simplifier),  $10^6$  dynes. La pression

$$2\pi\epsilon^2 = \frac{V^2}{8\pi r^2} \text{ (voir page 263).}$$

Posant

$$\frac{V^2}{8\pi r^2} = 10^6,$$

on tire

$$\frac{V}{r} = 5000, \text{ et si } V = 300, \text{ on a } r = 0^{\text{cm}},06,$$

c'est-à-dire 6 dixièmes de millimètre. Ainsi une sphère d'un rayon de

(\*) Blavier, *Des grandeurs électriques et de leur mesure en unités absolues* (Annales télégraphiques, 3<sup>e</sup> série, vol. II, p. 264, etc., 1875).

6 dixièmes de millimètre ne pourrait conserver de l'électricité au potentiel 300. On s'explique ainsi le *pouvoir des pointes*.

*Énergie d'un condensateur* (\*). — On a vu (page 267) que

$$\begin{aligned} 1 \text{ kilogrammètre} &= 100000 \text{ g ergs} = 98,1 \times 10^6 \text{ ergs.} \\ 1 \text{ calorie (gramme)} &= 42 \times 10^6 \text{ ergs.} \end{aligned}$$

Donc

$$1 \text{ erg} = \frac{1 \text{ kilogrammètre}}{98,1 \times 10^6} = \frac{1 \text{ calorie}}{42 \times 10^6}.$$

L'énergie d'un condensateur est exprimée en *ergs* par

$$\frac{1}{2} V^2 C,$$

elle sera exprimée en kilogrammètres par

$$\frac{1}{2} V^2 C \times \frac{1}{98,1 \times 10^6}$$

et en calories par

$$\frac{1}{2} V^2 C \times \frac{1}{42 \times 10^6}.$$

La capacité d'une bouteille de Leyde ou jarre est

$$C = \frac{SK}{4\pi d}.$$

Si on a  $n$  jarres de hauteur  $a$  et de diamètre  $b$ , reliées en surface, on aura

$$S = n\pi ab \quad \text{et} \quad C = \frac{nabK}{4d}.$$

En les chargeant au potentiel  $V$ , leur énergie sera en kilogrammètres

$$X = V^2 \frac{nabK}{8d} \times \frac{1}{98,1 \times 10^6};$$

en calories

$$Y = V^2 \frac{nabK}{8d} \times \frac{1}{42 \times 10^6}.$$

Pour des jarres, en verre de capacité  $K = 1,8$  et d'une épaisseur

Voy. le travail de M. Blavier, déjà cité.

de 2 millimètres, chargées au potentiel 300 à l'aide d'une machine électrique, ces formules deviennent

$$\begin{aligned} X &= nab \times 1,0322 \times 10^{-3} \text{ kilogrammètres,} \\ Y &= nab \times 2,42 \times 10^{-3} \text{ calories.} \end{aligned}$$

Prenons 10 jarres de 50 centimètres de hauteur et de 15 centimètres de diamètre, on trouve

$$\begin{aligned} X &= 7,74 \text{ kilogrammètres,} \\ Y &= 18,2 \text{ calories (grammes).} \end{aligned}$$

La décharge de cette batterie produirait sur le système nerveux le choc d'une masse de 1 kilogramme qui tomberait de plus de 7 mètres de hauteur.

Supposons que la décharge ait lieu à travers un fil fin dans des conditions telles que l'énergie se transforme complètement en chaleur, le fil s'échauffe.

Supposons que ce soit un fil de fer de  $\frac{2}{10}$  de millimètre de diamètre et de 1 mètre de long, dont le poids =  $0^{\text{sr}},2512$ . La chaleur spécifique du fer, c'est-à-dire le nombre de calories qui élève de 1° centigrade la température de 1 gramme de fer est  $0^{\text{cal}},114$  : le fil de fer sera donc porté à une température de

$$\frac{18,2}{0,2512 \times 0,114} = 635^{\circ} \text{ C.}$$

Le fer fond à  $1500^{\circ}$  centigrades : la longueur  $l$  de fil, qui sera fondue par la batterie considérée, est donnée par la relation  $l \times 1500 = 635$ , d'où  $l = 42$  centimètres.

La décharge d'une batterie de dix jarres, chargée par une bonne machine électrique, peut donc fondre un fil de fer de 2 millimètres de diamètre et de 42 centimètres de longueur.

J. R.



## DEUXIÈME PARTIE

### MAGNÉTISME

---

#### CHAPITRE XII

##### MAGNÉTISME. — EXPÉRIENCES PRÉLIMINAIRES

Pour ces expériences, il faut avoir deux barreaux aimantés d'acier de 15 centimètres de long, une petite boussole, quelques aiguilles à tricoter et à coudre, un morceau de ressort de montre, quelques barreaux de fer doux et de la limaille de fer, environ 1000 ou 1500 grammes. Comme on peut se procurer tout ce matériel à peu de frais, nous recommandons aux lecteurs de le faire et de répéter les expériences que nous allons décrire.

*Expériences.* — On observera que l'aimant attire les objets de fer ou d'acier, et que le fer, et généralement aussi l'acier, est également attiré par chacun des bouts de l'aimant. On remarquera aussi que si l'on approche un aimant de la boussole, un de ses bouts attire l'extrémité de l'aiguille tournée vers le nord, et repousse l'extrémité

opposée; tandis que l'autre bout attire l'extrémité de l'aiguille qui vise le sud et repousse celle qui vise le nord.

*Il existe donc une différence entre les bouts des aimants.* Pour les distinguer, les constructeurs européens ont l'habitude de faire une entaille à la lime sur le bout de l'aimant qui attire l'extrémité de l'aiguille de boussole visant le sud. Pour abrégér, j'appellerai désormais ce bout de l'aimant le bout marqué, et l'autre le bout sans marque ou le bout uni.

*Expérience.* — Faites flotter un des aimants sur un morceau de liège, dans une cuvette d'eau, de façon qu'il soit libre de ses mouvements, et tenant l'autre aimant dans la main, approchez son bout marqué d'abord, puis son bout sans marque des bouts avec ou sans marque de l'aimant flottant.

On observera que

Le bout marqué de l'un repousse le bout marqué de l'autre et attire le bout uni, tandis que le bout uni repousse le bout uni et attire le bout marqué. Pour abrégér, disons d'abord que *les extrémités d'un aimant s'appellent ses pôles* (1), et alors : *Les pôles magnétiques similaires se repoussent, les pôles non similaires s'attirent.*

(1) Dans les traités français, on emploie les expressions de pôle nord ou pôle austral pour désigner le pôle marqué et de pôle sud ou pôle boréal pour désigner le pôle non marqué. Dans une aiguille de boussole, le pôle nord est celui qui se dirige vers le nord, le pôle sud celui qui se dirige vers le sud. Le pôle nord d'un aimant est donc celui qui attire le pôle sud d'une aiguille de boussole.

D'un autre côté, la terre agissant comme un aimant dont les pôles seraient voisins des pôles géographiques, on a appelé pôle boréal de l'aimant terrestre celui qui est placé au nord de la terre, et pôle austral celui qui est placé au sud. Ces noms donnés, on a été forcé d'appeler pôle austral d'une aiguille, celui qui est attiré par le pôle boréal de la terre et qui se dirige vers le nord, et pôle boréal, celui qui se dirige vers le sud. De là une contradiction apparente entre les termes et les idées, que l'on évite en employant les expressions anglaises.

J. R.

Pour les expériences qui vont suivre, il est nécessaire de fabriquer quelques aimants.

#### AIMANTATION

On peut obtenir un aimant en frottant un barreau d'acier dur avec un aimant permanent, par une méthode particulière ou mieux par deux ou trois méthodes différentes. La plus simple s'appelle « l'aimantation par simple touche ». Cette méthode consiste à poser le barreau qu'il s'agit d'aimanter sur une table munie, près d'une de ses extrémités, d'un arrêt dont la hauteur est inférieure à l'épaisseur du barreau.

Tenant l'aimant dans une position inclinée, on le promène plusieurs fois sur le barreau, toujours dans la même direction, soit de  $a$  en  $b$ , et en conservant toujours en bas

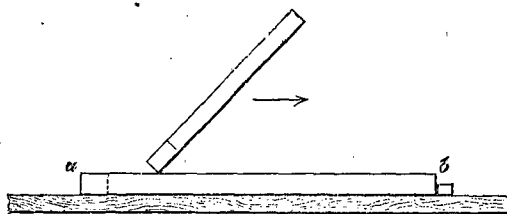


FIG. 48.

le même pôle, soit le pôle marqué. Le barreau devient alors un aimant dont le pôle marqué est en  $a$ . En changeant ou bien la direction du mouvement, ou bien le pôle en contact avec le barreau, on renverserait l'aimantation du barreau. Si l'on faisait les deux changements à la fois, l'aimantation ne serait pas renversée, ou mieux elle serait renversée deux fois.

Une autre méthode plus commode est celle dite « aimantation

tation par double touche » (fig. 49). Dans cette méthode l'aiguille à tricoter ou le barreau qu'il s'agit d'aimanter est posé sur une table, et l'on prend deux aimants, un dans chaque main, que l'on tient par leurs pôles contraires; les autres pôles, c'est-à-dire le bout marqué d'un des aimants et le bout uni de l'autre, sont maintenus ensemble au centre du barreau d'acier. On écarte ensuite les deux aimants et on les fait glisser à la fois, en sens inverse l'un de l'autre,

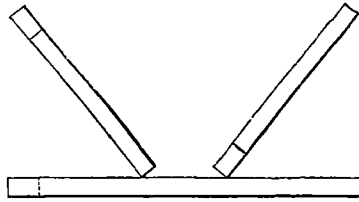


FIG. 49.

depuis le milieu jusqu'à l'extrémité correspondante; on les soulève, on les replace au centre, et on recommence. Quand cette opération a été répétée un certain nombre de fois, le barreau d'acier est devenu un aimant plus ou moins puissant, dont le pôle marqué se trouve à l'extrémité du barreau sur laquelle a passé le pôle uni de l'aimant dont on s'est servi, et *vice versa*. On prend alors l'aimant que l'on vient d'obtenir, et on marque d'un trait de lime l'extrémité convenable, pour reconnaître le pôle marqué (1).

(1) MÉTHODES DE LA TOUCHE SÉPARÉE ET DE LA DOUBLE TOUCHE. — Ce procédé porte dans les traités français le nom de procédé de la « touche séparée » ou de Duhamel. On fait reposer habituellement les deux extrémités du barreau à aimanter sur les pôles opposés de deux forts aimants fixes, de façon qu'elles soient en contact avec ceux-ci sur une longueur de 2 à 3 centimètres. On donne aux barreaux mobiles une inclinaison de 25 à 30 degrés, et on a soin que le pôle de chacun d'eux qui touche le barreau à aimanter, soit le même que celui de l'aimant fixe vers lequel on le fait glisser, afin que les deux effets s'ajoutent.

Dans la « double touche », ou procédé d'Épinus, les deux barreaux mo-

Posez cet aimant dans une boîte en carton remplie de limaille de fer. En retirant l'aimant, on trouve, si la méthode d'aimantation a été bien appliquée, que la limaille de fer est suspendue en grosses grappes à chaque extrémité, et qu'il n'y en a pas ou fort peu sur les autres parties.

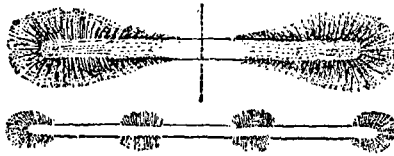


FIG. 50.

La totalité de la force magnétique de l'aimant réside donc dans ses pôles.

#### INSÉPARABILITÉ DES PÔLES

Examinons si l'on peut séparer les pôles, de façon à

biles sont posés au milieu de la lame, soit verticalement, soit avec une inclinaison de 30 degrés, avec leurs extrémités séparées par un prisme en bois contre lequel elles appuient. Les deux aimants mobiles et le prisme forment alors un système de forme invariable que l'on promène à la surface du barreau à aimanter, d'abord du milieu vers l'une des extrémités, puis en revenant tout le long du barreau vers l'autre extrémité; on opère plus ou moins longtemps les frictions par ce mouvement de va-et-vient avec la condition de commencer et de finir toujours au milieu, et d'avoir soin de s'arrêter après avoir passé le même nombre de fois sur chaque partie du barreau à aimanter.

Par cette méthode, l'aimantation est plus énergique que par les précédentes; mais elle est moins régulière et les « points conséquents » ou pôles intermédiaires se produisent plus fréquemment.

La figure 50 montre la façon dont se groupe la limaille de fer dans le cas où l'aimant qu'on y plonge est aimanté régulièrement et dans celui où l'aimant a des points conséquents.

Pour la théorie de l'aimantation par la simple et la double touche, voir le *Mémoire sur le magnétisme*, de Gaugain (*Annales de chimie et de physique* 5<sup>e</sup> série, vol. VII, p. 289, 1876).

J. R.

obtenir un aimant ayant seulement un pôle marqué et un autre aimant ayant seulement un pôle uni.

Avec une lime ou une paire de pinces, coupons le barreau aimanté en deux moitiés : on reconnaît que les anciennes extrémités conservent encore toutes leurs propriétés magnétiques sans changement ; mais à la nouvelle extrémité de la moitié qui a été marquée à la lime se trouve un pôle sans marque, et à la nouvelle extrémité de l'autre moitié, un pôle marqué ; chacun des nouveaux pôles supporte une grappe de limaille de fer aussi grosse que chacun des pôles primitifs,

#### ÉGALITÉ D'INTENSITÉ DES PÔLES

Tout aimant a donc deux pôles opposés. Pour montrer que ces pôles ont la même intensité, on aimante un fragment de ressort de montre, et on le contourne en rond, de manière à amener les deux pôles au contact (fig. 51). En les approchant

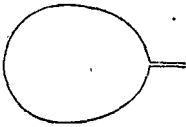


FIG. 51.

alors d'une boussole (1), on n'observe plus aucun effet, ce qui montre que l'attraction d'un pôle neutralise exactement la répulsion de l'autre.

L'expérience suivante vaut cependant mieux. Nous savons que l'extrémité marquée de l'aiguille d'une boussole vise le nord, et l'extrémité unie le sud ; on peut alors regarder la terre comme un vaste aimant, dont l'extrémité marquée serait au pôle géographique sud et dont l'extrémité unie serait au pôle nord.

Considérons donc un aimant flottant dans l'eau et libre

(1) Les pôles ne doivent pas être approchés trop près de la boussole, car le pôle le plus voisin de celle-ci agirait sur l'aiguille aimantée plus fortement que le pôle plus éloigné.

de se mouvoir dans toutes les directions. Si ses pôles n'étaient pas d'égale intensité et que le pôle marqué fût le plus fort, l'aimant serait plus attiré vers le nord que vers le sud, et se déplacerait vers le nord. Rien de pareil n'arrive : l'aiguille tourne sur elle-même jusqu'à ce qu'elle ait pris la direction nord et sud, et reste ensuite au repos. Les pôles opposés ont donc la même intensité.

En fait, si on coupe un aimant en deux, chaque partie devient un aimant distinct, dont les pôles ont la même intensité que les pôles primitifs, et généralement :

*Si l'on brise un aimant en un nombre quelconque de petits fragments, chaque fragment possédera deux pôles opposés, dont l'intensité est égale à celle des pôles de l'aimant primitif.*

#### CHAMP MAGNÉTIQUE

Toute région de l'espace dans laquelle des forces exercent leur action s'appelle un champ de force. S'il s'agit de forces magnétiques, on l'appelle un champ de force magnétique, ou, par abréviation, *un champ magnétique*.

Le champ est dit *uniforme*, lorsqu'en tous les points du champ les forces ont même grandeur et même direction ; s'il s'agit de forces magnétiques, la région s'appelle *un champ magnétique uniforme* (1).

(1) DÉFINITION PRÉCISE DES PÔLES. — Les masses magnétiques occupent un certain espace à chaque bout de l'aimant, et chaque unité de masse subit l'action de la ligne de force qui passe par le point où elle est appliquée. Dans un champ uniforme toutes les forces agissant sur le même bout sont égales et parallèles ; elles ont une résultante égale à leur somme, et le point d'application de cette résultante, c'est-à-dire le centre de ces forces parallèles, est le pôle réel de ce bout de l'aimant. Il en résulte que les pôles sont situés à une petite distance des extrémités. Comme la position du centre des forces parallèles est tout à fait indépendante de la direction absolue de ces forces,

La force magnétique de la terre peut être considérée comme uniforme dans une région dont les dimensions seraient celles d'une table ordinaire.

Supposons, par exemple, que la table occupe une position telle que la direction de ses grands côtés soit parallèle à celle de l'aiguille d'une boussole. Il y aura, en tous les points situés un peu au-dessus de cette table, une force magnétique constante, parallèle à la longueur de la table. La force de la terre n'est pas horizontale; mais, comme elle a une composante horizontale qui est dans un rapport constant avec elle, on peut la considérer comme horizontale pour le sujet qui nous occupe (1).

#### COUPLE

La force exercée sur une aiguille de boussole, ou sur un autre aimant posé sur la table, est ce que l'on appelle un *couple*.

*Définition d'un couple.* — Un couple se compose de deux forces égales et opposées, agissant sur un corps dans des directions parallèles, mais qui ne coïncident pas. Il est évident qu'un couple ne peut pas déplacer un corps, et qu'il

il est clair que la position des pôles dans un aimant est indépendante de la direction donnée au barreau dans le champ.

**INTENSITÉ D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE.** — L'intensité d'un champ en un point est l'intensité de la force qui agirait sur l'unité de pôle magnétique concentrée en ce point.

H étant cette intensité,  $m$  celle du pôle magnétique, la force  $F$  qui agit sur ce pôle est

$$F = mH.$$

**UNITÉ D'INTENSITÉ DE CHAMP.** — C'est l'intensité du champ qui exerce l'unité de force sur l'unité de pôle. J. R.

(1)  $F$  étant la force totale de la terre,  $H$  sa composante horizontale,  $\theta$  l'angle d'inclinaison (voir chap. XIII) au lieu de l'observation, on a

$$H = F \cos \theta.$$

J. R.



peut seulement le faire tourner sur lui-même. La force agissant sur une roue hydraulique est un bon exemple de couple. Négligeant pour l'instant le poids de la roue, on voit que, s'il n'y avait pas d'axe de rotation, la force de l'eau agissant en A (fig. 52) entraînerait simplement la roue dans le sens du courant. Mais, si l'on introduit un axe en O, alors, afin d'empêcher la roue d'être entraînée par le cou-

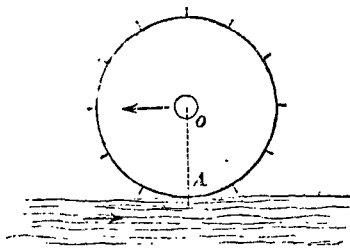


FIG. 52.

rant, les tourillons qui supportent l'axe exercent sur lui une pression égale à celle qui est exercée par l'eau, mais dirigée en sens contraire. On a donc deux forces égales formant un couple, et ayant pour effet de faire tourner la roue.

Dans toutes les positions qu'un aimant peut occuper dans un champ magnétique uniforme, sauf celles parallèles aux lignes de force, il subit l'action d'un couple de ce genre; seulement, si l'aimant est libre de se mouvoir, il prend très vite une position parallèle aux lignes de force, et alors les directions des deux forces coïncidant, le couple disparaît.

#### MOMENT

La force directrice d'un aimant, dans toutes les positions d'un champ, est égale à la force qu'un fil de torsion passant par son centre devrait exercer pour le maintenir dans cette position; elle constitue le *moment* du couple subi

par l'aimant ou ce qu'on appelle généralement le moment de l'aimant (1).

*Définition du moment.* — Le moment d'un couple est le produit de l'intensité de l'une de ses forces égales par la distance (comptée sur la perpendiculaire) des lignes qui représentent les directions des forces et passent par leurs points d'application.

Revenons à notre exemple de la roue hydraulique. Le moment, ou la force de rotation du couple agissant sur la roue, est le produit de la pression que l'eau exerce sur les palettes par le rayon (ou la distance de l'axe à une palette) de la roue. Si l'on double la pression de l'eau, on double la force de rotation ; si l'on double le rayon de la roue, la même pression de l'eau exercera une force de rotation double. Si l'un réduit de moitié l'un des facteurs et qu'on double l'autre, la force de rotation restera constante.

Dans les pays où l'eau est rare, on obtient la puissance nécessaire pour faire marcher les moulins en augmentant le diamètre des roues.

#### DÉTERMINATION DU MOMENT MAGNÉTIQUE D'UN AIMANT DANS UNE POSITION QUELCONQUE

Figurez la longueur et la position de l'aimant ainsi que

(1) Pour prévenir toute confusion, il est préférable de distinguer le moment du couple magnétique subi par l'aimant et le moment de l'aimant. Si l'on désigne par  $H$  l'intensité magnétique du champ uniforme dans lequel l'aimant est placé, par  $m$  l'intensité d'un de ses pôles, la force exercée par le champ sur chaque pôle est  $mH$ . Si l'aimant est placé normalement aux lignes de force du champ, le moment du couple qui tend à l'amener dans la direction de ces lignes est  $mHl$ ,  $l$  étant la longueur de l'aimant ou plus exactement la distance de ses pôles.

Le produit  $lm$  est le moment *absolu* ou le moment total de l'aimant, et on l'appelle souvent le moment de l'aimant ou le moment magnétique. On dit alors que le moment du couple magnétique est le produit du moment de l'aimant par la composante de la force perpendiculaire à l'axe de l'aimant. J. R.

la direction des lignes de force du champ (fig. 53). Tirez les lignes  $AE$ ,  $BD$  par les pôles  $A$ ,  $B$  de l'aimant, parallèlement aux lignes de force. Menez  $AC$  perpendiculaire à ces lignes. La distance  $AC$  des forces est ce qu'on appelle le *bras du couple*.

Le produit de la longueur  $AC$  par l'intensité du pôle est le moment de l'aimant  $AB$  dans sa position actuelle.

Le moment total d'un aimant est le moment qu'il pos-

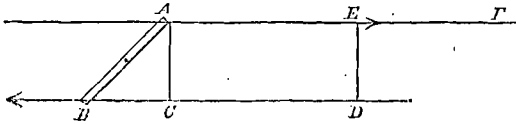


FIG. 53.

sède lorsque sa direction est perpendiculaire aux lignes de force, c'est-à-dire lorsque  $AC$  devient égal à  $AB$ .

On sait que l'aire d'un rectangle est égale au produit de sa longueur par sa largeur.

Prenons sur la ligne  $AF$  une longueur  $AE$ , proportionnelle à la puissance du pôle, et complétons le rectangle  $ACDE$ .

L'aire du rectangle est égale au produit de la longueur  $AC$  par la longueur  $AE$ , ou, en d'autres termes, de l'intensité du pôle par le bras du couple; le rectangle  $ACDE$  est donc proportionnel au moment du couple.

On a ainsi un moyen commode de trouver le moment d'un aimant dans une position quelconque, une fois que l'on a fixé la longueur qui doit représenter sur la ligne  $AF$  l'unité de force magnétique.

LE MOMENT D'UN AIMANT N'EST PAS ALTÉRÉ QUAND ON COUPE  
L'AIMANT EN MORCEAUX

Prenons notre aimant AB et, après avoir déterminé son moment dans une position donnée, brisons-le et déterminons les moments des fragments séparés lorsqu'ils gardent la direction qu'ils avaient avant la rupture. En ajoutant ces moments, on doit trouver que la somme est égale au moment de l'aimant primitif (1).

Supposons, en effet, que la direction de la force soit AF, comme précédemment (fig. 54), et représentons par la lon-

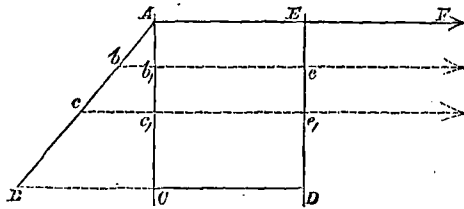


FIG. 54.

gueur  $AE$  l'intensité du pôle  $A$ ; alors, comme tout à l'heure,  $AC$  est le bras du couple, et son moment est l'aire  $ACDE$ . Coupons maintenant l'aimant en trois morceaux, par exemple  $Ab$ ,  $bc$  et  $cB$ , et déterminons leurs moments. Pour cela, menons  $be$ ,  $ce$ , dans la direction de la force, c'est-à-dire parallèlement à  $AE$ , et prenons sur ces lignes des longueurs  $b_1e$ ,  $c_1e_1$ , représentant les intensités des pôles  $b$  et  $c$ . L'expérience (page 278) nous a appris que l'intensité de

(1) La rupture des aiguilles aimantées a été étudiée récemment par M. Bouty (*Annales de l'École normale supérieure*, 2<sup>e</sup> série, vol. IV, p. 1, et *Journal de Physique*, vol. III, p. 361, 1874), qui a imaginé à cet effet une méthode ingénieuse permettant d'obtenir rapidement les moments magnétiques de très petites aiguilles. (Voir plus loin.)  
J. R.

chacun de ces pôles est égale à celle de A : les lignes AE,  $b_1e$ ,  $c_1e_1$  seront donc d'égale longueur. Les bras des nouveaux couples seront respectivement  $Ab_1$ ,  $b_1c_1$ ,  $c_1C$ , et, par conséquent, leurs moments seront les aires

$$Ab_1eE, b_1c_1e_1e, c_1CDe_1,$$

dont la somme forme l'aire ACDE, qui est le moment de l'aimant primitif.

Le moment total d'un aimant est le moment qu'il possède quand sa direction est perpendiculaire aux lignes de force.

#### POTENTIEL MAGNÉTIQUE

Le potentiel dû à un pôle magnétique donné est exactement de même nature que celui dû à un corps électrisé qui occuperait la même place. Tout le chapitre qui concerne le potentiel électrique s'applique aux pôles magnétiques, en faisant les changements suivants :

$$\begin{array}{l} \text{Au lieu de } \left\{ \begin{array}{l} \text{Corps chargé} \\ \text{d'électricité (+)} \end{array} \right\} \text{ lisez } \left\{ \begin{array}{l} \text{pôle magnétique} \\ \text{marqué.} \end{array} \right\} \\ \text{Au lieu de } \left\{ \begin{array}{l} \text{Corps chargé} \\ \text{d'électricité (-)} \end{array} \right\} \text{ lisez } \left\{ \begin{array}{l} \text{pôle magnétique} \\ \text{sans marque.} \end{array} \right\} \end{array}$$

Si, cependant, on veut obtenir le système complet de surfaces équipotentielles auquel un aimant donne naissance, il faut se rappeler que ces surfaces sont « symétriques » par rapport à la perpendiculaire élevée sur le milieu de la droite qui joint les pôles. Ainsi, considérons un aimant AB de forme quelconque (fig. 55), l'axe de symétrie sera la ligne CD de la figure. Par système symétrique par rapport à la ligne CD, on entend que si l'on trace ce système d'un côté de cette ligne, soit du côté A, et qu'on place un miroir

le long de la ligne CD, la réflexion du système dessiné représentera exactement le système du côté B de la ligne.

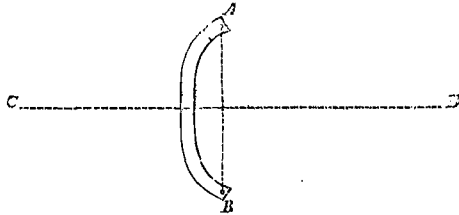


FIG. 55.

*Corollaire.* — Le potentiel tout le long de la ligne CD est zéro (voir pages 39 et 40), car le potentiel en un point de cette ligne est le potentiel dû à deux pôles égaux, équidistants et de signes contraires.

#### INDUCTION MAGNÉTIQUE

*Expérience.* — Prenez un barreau court de fer doux *ab* (fig. 56), de même forme que l'un des aimants, et placez-le contre un pôle de cet aimant; il est attiré, et l'attraction est la même, quel que soit le bout présenté à l'aimant.

Approchez maintenant d'une boussole le barreau composé A *b*.

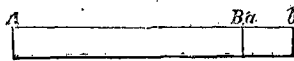


FIG. 56.

C'est à peine s'il y a des traces d'attraction ou de répulsion en B, tandis qu'un nouveau pôle de puissance presque égale au pôle A, mais d'espèce contraire, s'est développé en *b*. Ceci nous montre que l'extrémité B de l'aimant

d'acier a induit en *a* un pôle contraire au sien et d'intensité presque égale.

L'attraction du fer doux s'explique de cette façon, car le pôle B attire le pôle opposé qu'il a lui-même induit (comparez page 10).

(Les *armatures* sont des pièces de fer doux que l'on met en contact avec les pôles des aimants ; elles diminuent sen-

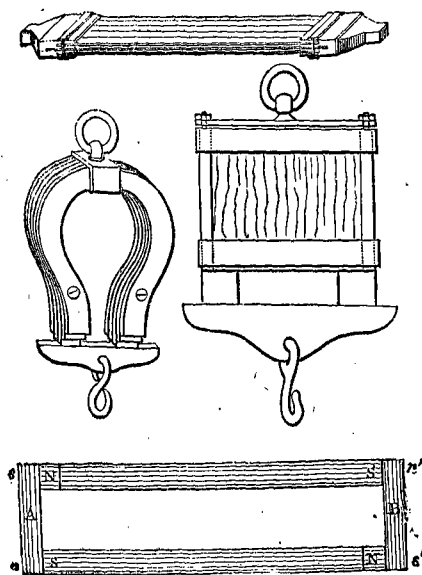


FIG. 37.

siblement la perte de magnétisme que les aimants éprouvent par suite de la tendance des magnétismes opposés à se réunir à travers l'aimant. Les pôles contraires, que les aimants développent dans les armatures, tendent à maintenir la séparation des magnétismes.

Avec un aimant en fer à cheval, un seul prisme de fer

doux ou *contact* suffit pour réunir les deux pôles; s'il s'agit de barreaux aimantés, on les met souvent par deux dans une même boîte, en ayant soin que les pôles contraires soient en regard, et aux deux extrémités on dispose en travers deux petits barreaux de fer doux.

Le contact, quand il est en place, diminue beaucoup l'intensité du champ magnétique produit par l'aimant. Quatre barreaux aimantés égaux, disposés en carré de telle sorte que aux quatre angles, le pôle nord de l'un soit en contact avec le pôle sud de l'autre, ne produiraient pas de champ magnétique).

#### INTENSITÉ D'AIMANTATION

Le même barreau d'acier peut être plus ou moins aimanté.

Comme règle, si l'on augmente l'intensité de l'aimant employé pour aimanter un barreau, on augmente l'aimantation de ce barreau. Il existe, cependant, dans tous les barreaux une certaine limite au delà de laquelle il est impossible d'augmenter leur magnétisme permanent, quelle que soit la force magnétique employée. C'est ce qu'on appelle leur « point de saturation », et les barreaux ainsi aimantés sont dits aimantés à saturation.

Il est possible de sursaturer un barreau de magnétisme, c'est-à-dire de lui donner temporairement une aimantation plus forte que celle qu'il pourra conserver d'une façon permanente. On a trouvé ainsi que, après avoir éloigné la force magnétique inductrice, la force magnétique diminue dans une proportion progressivement décroissante, jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur permanente. En d'autres termes, elle diminue rapidement pendant les premières heures, puis plus lentement pendant quelques jours, et



très lentement pendant des semaines. C'est pour ce motif que tous les aimants employés dans les recherches où l'intensité d'aimantation doit rester constante pendant la durée de l'expérience, doivent être aimantés au moins six mois auparavant.

La dissipation du magnétisme en excès peut être hâtée par toute opération ayant pour effet de permettre aux molécules de glisser les unes sur les autres : ainsi, par exemple, refroidir ou chauffer alternativement le barreau en le plongeant successivement dans l'eau froide et dans l'eau à 150 degrés F., le battre doucement avec un marteau, etc.

M. Jamin (1) a construit deux aimants, dont l'un pesant 6 kilogrammes, peut supporter 80 kilogrammes, ou  $13$  et  $\frac{1}{3}$  de fois son propre poids; l'autre, pesant 50 kilogrammes, peut en supporter 500. Ce dernier est de beaucoup l'aimant permanent le plus puissant qui ait été construit jusqu'à ce jour.

Les poids indiqués sont ceux que supportent les aimants après qu'ils ont atteint leur état permanent.

Un autre des aimants de M. Jamin portait 16 fois son propre poids immédiatement après avoir été aimanté.

On a construit, dit-on, de très petits aimants qui peuvent porter 25 fois leur propre poids.

#### UNITÉS MAGNÉTIQUES. — UNITÉ DE PÔLE MAGNÉTIQUE

L'unité de pôle magnétique est un pôle qui repousserait un pôle semblable situé à l'unité de distance avec l'unité de force.

*Dans le système C. G. S. (2), c'est le pôle qui repousse*

(1) *Comptes rendus*, 1873, tome LXXVI, page 1153.

(2) Page 77.

*un pôle semblable distant de un centimètre avec une force de une dyne.*

UNITÉS. — MOMENT MAGNÉTIQUE.

*L'unité de moment magnétique est le moment d'un aimant de longueur égale à l'unité, dont les pôles auraient l'unité d'intensité magnétique; et généralement d'un aimant dont le produit de l'intensité des pôles par sa longueur serait égal à l'unité.*

Dans le système C. G. S. l'aimant dont le moment est égal à l'unité, est un aimant dont la longueur est de un centimètre, et dont l'intensité des pôles a pour valeur celle de l'unité définie dans le paragraphe précédent.

Le moment magnétique d'un aimant est le produit de l'intensité d'un de ses pôles magnétiques par la longueur de son axe. Celui de la terre (1) est égal à

85,500,000,000,000,000,000,000 unités C. G. S.

NOTATION DE L'EXPOSANT

Il convient de donner ici la notation aujourd'hui adoptée pour se dispenser d'écrire une longue série de zéros dans les grands nombres. Elle consiste à écrire le premier des nombres entiers suivi de la virgule décimale, en indiquant que le nombre entier et sa partie décimale doivent être

(1) L'expression donnée par Gauss (Taylor's « Scientific Memoirs », vol. II, p. 225), réduite en unités C. G. S. est

$$0,33092 R^3,$$

R étant le rayon de la terre en centimètres, c'est-à-dire  $6,37 \times 10^8$ , ce qui donne

$$0,33092 \times (6,37 \times 10^8)^3 = 8,55 \times 10^{25}.$$

Voir aussi les « Œuvres de Verdet », tome IV, 2<sup>e</sup> partie, art. 355.]

J. R.

multipliés par 10 autant de fois que cela est nécessaire. Ce nombre de fois est indiqué par un petit chiffre appelé « l'exposant » placé après 10 et un peu au-dessus (1).

Cet exposant fait connaître le nombre de zéros qui entre dans le multiplicateur ; et comme il n'entre dans le nombre qu'un seul chiffre à gauche de la virgule décimale, l'exposant est aussi le nombre total de zéros et de chiffres significatifs qui suivent le premier chiffre du nombre.

Ainsi  $8,5 \times 10^6$  veut dire que le nombre se compose d'un 8 suivi de 6 chiffres, dont le premier est un 5 et le reste des zéros.

Dans ce système de notation, on écrit la valeur du moment magnétique de la terre

$$8,55 \times 10^{25},$$

ce qui est un nombre plus commode à lire et à écrire que la série de zéros que nous avons tout à l'heure. L'exposant montre que la virgule décimale doit être déplacée de 25 chiffres vers la *droite*. Les longues fractions décimales sont représentées d'une façon analogue, seulement l'exposant est précédé du signe *moins*. Un exposant négatif signifie que le nombre doit être *divisé* par 10 autant de fois que l'exposant renferme d'unités. Ainsi

$$8,55 \times 10^{-6}$$

veut dire une fraction décimale qui, écrite en entier, est :

$$0,00000855.$$

L'exposant négatif montre que la virgule décimale doit être déplacée de 6 chiffres sur la *gauche* (2).

(1) Ainsi,  $10^2 = 10 \times 10 = 100$ .  
 $10^3 = 10 \times 10 \times 10 = 1000$ , et ainsi de suite.

(2) Notons que cet exposant est aussi la caractéristique du logarithme du nombre.

## UNITÉS. — INTENSITÉ D'AIMANTATION.

Imaginons une certaine quantité d'une substance uniformément aimantée en tous ses points, taillons un barreau dans cette substance et déterminons son moment magnétique.

Laissant d'abord au barreau la même section, doublons sa longueur. On doublera son moment magnétique, car l'intensité des pôles reste la même et on a doublé le bras du couple. En doublant la longueur du barreau, on a doublé son volume.

Puis, laissant la même longueur, doublons la section; nous aurons doublé le moment magnétique, car l'intensité des pôles a été doublée et le bras du couple est resté constant. Dans ce cas nous avons encore doublé le volume.

Enfin, si nous doublons à la fois la longueur et la section transversale, nous quadruplons à la fois le moment et le volume.

Il en résulte que

*Si l'on sépare un fragment quelconque d'un bloc de substance aimantée uniformément, le moment magnétique de ce fragment est simplement proportionnel à son volume (1).*

Nous pouvons définir maintenant l'unité d'intensité d'aimantation.

L'intensité d'aimantation d'une substance aimantée uniformément est égale à l'unité quand l'unité de vo-

(1) On voit dans la figure 54, page 286, que si l'on coupe un aimant en deux et qu'on place les deux fragments côte à côte, l'aire du rectangle ACDE reste encore la même, puisqu'on a réduit de moitié sa hauteur et doublé sa longueur.

lume de cette substance a un moment magnétique égal à l'unité.

*Dans le système C. G. S. l'unité d'intensité d'aimantation est l'intensité à laquelle une substance doit être aimantée, pour qu'un volume de un centimètre cube de cette substance ait un moment magnétique égal à l'unité de moment magnétique que nous avons définie (page 292).*

L'intensité d'un champ magnétique est la force exercée sur l'unité de pôle placée dans ce champ.

*Un champ de l'unité d'intensité dans le système C. G. S. est un champ dans lequel l'unité de pôle serait actionnée par une force d'une dyne.*

#### MAXIMUM D'AIMANTATION PERMANENTE

Kohlrausch (1) a établi que le maximum d'aimantation qu'une tige d'acier, longue et mince, puisse garder d'une façon permanente est d'environ

785 unités C. G. S. d'intensité (2).

(1) *Mesures physiques*, édition anglaise, page 195.

(2) D'après Kohlrausch, le maximum de magnétisme permanent que des tiges très minces d'acier peuvent conserver est d'environ 100 unités C.G.S. de moment par gramme d'acier.

En prenant 7,85 pour la densité de l'acier, le volume d'un gramme d'acier est de  $\frac{1}{7,85}$  centimètre cube.

L'intensité d'aimantation étant le quotient du moment par le volume, on a

$$\text{Intensité d'aimantation} = \frac{\text{Moment}}{\text{Volume}} = 100 \times 7,85 = 785.$$

Remarquons que si  $l$  et  $s$  sont la longueur et la section d'un barreau aimanté, et  $m$  l'intensité de pôle, on a

$$\text{Intensité d'aimantation} = \frac{\text{Moment}}{\text{Volume}} = \frac{lm}{ls} = \frac{m}{s}.$$

Donc l'intensité de pôle  $m$  est égale au produit de l'intensité d'aimantation par la section du barreau.

J. R.

VALEUR DE L'ACTION DE LA TERRE SUR L'AIGUILLE  
D'UNE BOUSSOLE

La composante horizontale du magnétisme terrestre à Kew est en ce moment d'environ

0,179 dyne.

C'est-à-dire que, si l'on place dans la direction Est et Ouest une aiguille de boussole dont l'intensité des pôles serait l'unité, la force exercée sur chaque pôle et tendant à amener l'aiguille dans la direction Nord-Sud serait de 0,179.

Si l'on avait, comme aiguille, un des aimants de Kohlrausch, la force serait de

$$0,179 \times 785 = 140,5 \text{ dynes,}$$

la section du barreau étant supposée de 1 centimètre carré.

La force de gravité sur une masse d'un gramme à Greenwich est d'environ 981; par conséquent, si l'aiguille était maintenue dans la position E. O., au moyen d'une corde passant sur une poulie, il faudrait suspendre au bout de cette corde un poids de  $\frac{140,5}{981}$  gramme pour chaque pôle, afin d'équilibrer exactement la force de la terre; ce serait un poids d'environ 14 centigrammes pour chaque pôle, ou de 28 centigrammes pour l'aimant entier (1).

SOLÉNOIDES ET COUCHES MAGNÉTIQUES

Pour le calcul mathématique, on suppose souvent les aimants réels remplacés par certains aimants imaginaires.

(1) A Paris, l'intensité horizontale du magnétisme terrestre était, en 1876, de 0,193. La force agissant sur les pôles de l'aimant de un centimètre carré de section serait  $0,193 \times 785 = 151,5$  dynes, et en grammes,  $\frac{151,5}{981} = 0,15$  pour chaque pôle, soit 30 centigrammes pour l'aimant entier. J. R.

égaux aux aimants réels sous tous les rapports dont on s'occupe, mais qui, par leur forme, se prêtent mieux aux exigences du calcul.

On suppose ces aimants imaginaires formés de ce qu'on appelle la « matière magnétique imaginaire » ; c'est-à-dire d'une substance qui a toutes les propriétés magnétiques, et ne possède aucune des autres propriétés de la matière telles que le poids, le volume, etc.

Nous admettrons, par exemple, qu'une certaine quantité de cette matière peut être concentrée en un même point mathématique.

#### DÉFINITIONS (1)

« *Un solénoïde magnétique est un barreau infiniment mince, d'une forme quelconque, aimanté longitudinalement avec une intensité variant dans ses différentes parties en raison inverse de l'aire de la section normale, c'est-à-dire de la section transversale perpendiculaire à la longueur.* »

(Le produit de deux quantités dont l'une varie en raison inverse de l'autre est constant.)

« Le produit constant de l'intensité d'aimantation par l'aire de la section normale est appelé l'intensité magnétique, ou quelquefois simplement l'intensité du solénoïde. Il en résulte que le moment magnétique d'une portion droite ou d'une portion infiniment petite d'un solénoïde courbe est égal au produit de l'intensité magnétique par la longueur de cette portion. »

« Un certain nombre de solénoïdes magnétiques de dif-

(1) Voir le professeur J. Clerk Maxwell, *Electricity*, vol. II, chap. III, et Sir W. Thomson, *Mathematical Theory of Magnetism, Papers on Electrostatics and Magnetism*, chap. V, page 378.

férétes longueurs peuvent être ajoutés ensemble, de façon à constituer un système qui, au point de vue de l'action magnétique, est équivalent à un barreau unique infiniment mince, de forme quelconque, aimanté longitudinalement avec une intensité variant arbitrairement d'une extrémité du barreau à l'autre. Un aimant de ce genre est appelé pour cela un solénoïde magnétique complexe.

» L'intensité magnétique d'un solénoïde complexe n'est pas uniforme, mais elle varie d'une partie à l'autre. »

« Un anneau fermé, infiniment mince, aimanté de la façon décrite dans le premier alinéa, est appelé un solénoïde magnétique fermé. » (Thomson.)

On démontre mathématiquement que le potentiel dû à un solénoïde simple, *et, par conséquent, tous ses effets magnétiques* dépendent seulement de son intensité et des positions de ses extrémités, et pas du tout de la forme, droite ou courbe, qu'il affecte entre ses extrémités.

En d'autres termes, on démontre qu'un solénoïde (1) peut être regardé comme composé de deux portions égales de matière magnétique, concentrées aux points où se trouvent ses extrémités, et reliées par un barreau parfaitement rigide, non magnétique et impondérable.

Alors, si un solénoïde forme une courbe fermée, le potentiel auquel il donne naissance est zéro à chaque point, car nous avons vu que ses différentes parties n'exercent aucune action, à l'exception des pôles, et dans le cas actuel les pôles se neutralisent exactement.

#### 'COUCHES MAGNÉTIQUES. — DÉFINITION

« Si une mince couche de matière magnétique est ai-

(1) Quand on parle d'un « solénoïde », il s'agit d'un « solénoïde simple », à moins qu'on ne dise expressément le contraire.



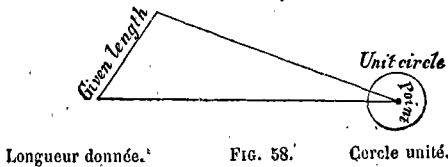
mantée dans une direction partout normale (perpendiculaire) à sa surface, le produit de l'intensité de l'aimantation en un point par l'épaisseur de la couche en ce point est appelé l'intensité de la couche magnétique à ce point. Si l'intensité de la couche est la même partout, on l'appelle une couche magnétique simple; si elle varie d'un point à l'autre, on peut considérer la couche comme formée d'un certain nombre (1) de couches simples (d'aires différentes) superposées et se recouvrant l'une l'autre. On l'appelle alors une couche magnétique complexe. » (Maxwell.)

On démontre mathématiquement que :

*Le potentiel développé en un point par une couche magnétique est le produit de l'intensité de cette couche par l'angle solide sous lequel son contour est vu du point donné.*

#### ANGLE SOLIDE

L'angle plan sous lequel on voit d'un point une longueur donnée, est, nous le savons, l'angle compris entre les deux lignes tirées de ce point aux extrémités de la longueur donnée, et on mesure cet angle en décrivant, de ce point comme centre, un cercle de rayon égal à l'unité



(fig. 58) : la portion de la circonférence comprise entre les deux lignes est l'angle cherché.

(1) Lorsqu'on parle d'une couche magnétique, il est question d'une couche magnétique simple, à moins qu'on ne dise expressément le contraire.

On voit que, si la longueur augmente ou si le centre se rapproche, l'angle ainsi mesuré augmente, et qu'il diminue si la longueur diminue ou si la distance augmente.

La définition de l'angle solide est analogue. L'angle solide sous lequel on voit d'un point une aire limitée par une courbe fermée, se mesure comme il suit : joignez à ce point par des lignes droites tous les points de la courbe limite, ces lignes formeront un cône (fig. 59) ; puis, de ce point comme centre, décrivez une sphère de rayon égal à l'unité.

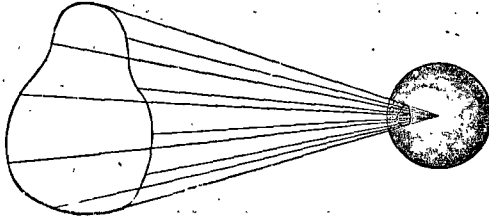


FIG. 59.

Les génératrices du cône, en traversant cette sphère, découperont sur sa surface une courbe plus ou moins semblable à la courbe limite donnée. *L'aire de la surface sphérique limitée par cette courbe est l'angle solide d'où l'aire donnée est vue de ce point.*

On voit que, si l'on augmente l'aire, les lignes divergeront davantage, et par conséquent l'angle solide augmentera : il en sera de même si l'on rapproche le point.

Comme comparaison, plaçons à ce point une bougie et plaçons un écran à une distance déterminée. Pour des expériences rigoureuses, on devrait prendre comme écran la surface intérieure d'une sphère creuse ; mais, pour notre comparaison, il suffit d'un écran plan. Si aucun objet n'est interposé, la totalité de la lumière tombe sur l'écran.

Si l'on interpose un morceau de carton, la lumière se partage entre le carton et l'écran, et la superficie de l'ombre du carton mesure la quantité de lumière que le carton reçoit. Cette quantité de lumière, ou encore, la superficie de l'ombre que le carton projette sur l'écran, est proportionnelle à l'angle solide sous lequel le carton est vu du point lumineux. On verra qu'avec un carton plus grand la superficie de l'ombre augmente, et qu'on produit le même effet en rapprochant le même carton du point lumineux.

Si, au contraire, on tourne le carton de façon à le présenter plus ou moins par sa tranche, l'ombre diminue ou augmente, à mesure que l'angle solide diminue ou augmente.

#### DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES LIGNES DE FORCE MAGNÉTIQUE

Comme les forces électriques, les forces émanant d'un aimant sont toujours perpendiculaires aux surfaces équipotentiellles. La méthode suivante permet de tracer directement ces lignes de force.

Prenez une planchette d'épaisseur égale ou supérieure à celle de l'aimant, et incrustez l'aimant dans le bois, de telle sorte que sa surface supérieure se confonde avec la surface supérieure de la planchette.

Posez sur le tout une feuille de papier lisse que vous fixez.

Puis, avec un tamis ou une passoire, saupoudrez tout le papier de limaille de fer bien fine.

Lorsqu'une parcelle de limaille tombe près de l'aimant, elle est aimantée par induction et elle tourne sur elle-même, de telle sorte que son diamètre le plus long coïn-

cide avec la ligne de force qui passe par le point où elle se trouve.

Chacun de ces petits aimants attire la parcelle voisine jusqu'à ce qu'il se forme une chaîne continue de limaille, tout le long de chacune des lignes de force. On frappe de temps en temps sur la planchette pour empêcher le frottement de la limaille sur le papier.

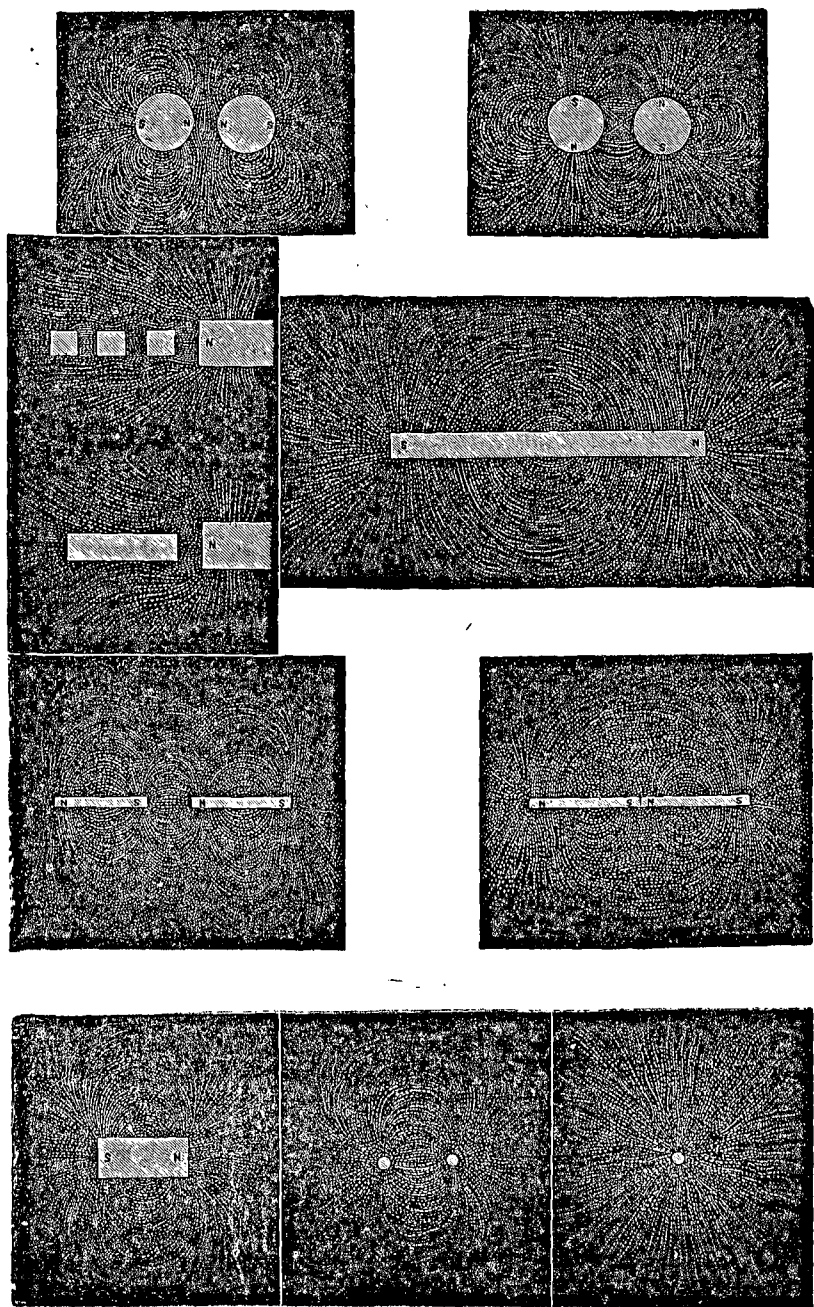
Si l'on veut conserver les courbes obtenues, on pose au-dessus une feuille de carton dont la surface inférieure est gommée. Quand la gomme se sèche, la limaille se colle au carton. Au lieu d'employer du papier, on peut, de préférence, placer l'aimant sous une plaque de verre, et alors il est inutile d'encastrier l'aimant dans une planchette.

Un bon moyen de préparer ces courbes, pour les projeter à l'aide d'une lanterne magique, consiste à recouvrir une plaque de verre de quelque mastic (1) transparent, qui fonde quand on le chauffe. Quand il est tout à fait durci, on place un aimant sous le verre, et on saupoudre de limaille. La plaque de verre est ensuite soigneusement portée dans une étuve, et chauffée jusqu'à ce que le mastic se ramollisse; la limaille pénètre alors dans ce dernier. En éloignant la plaque de verre et en la laissant refroidir, les parcelles sont toutes fixées dans leur position (2).

La planche XI est une gravure des lignes de force réelles déterminées par Faraday pour divers aimants.

(1) Le mastic connu sous le nom de « Mend all » (raccommodour universel) convient très bien. On le dilue avec de l'eau pour cet usage.

(2) M. Sylvainus P. Thomson indique le procédé suivant pour obtenir des *fantômes magnétiques*, procédé qui permet aussi de mettre en évidence les lignes de force magnétique produites par le passage d'un courant dans un système de fils conducteurs. Une plaque de verre de 10 centimètres de côté est disposée bien horizontalement sur l'aimant ou dans le voisinage des courants et recouverte d'une couche régulière de solution de gomme arabique et de gélatine. De la limaille de fer, préalablement tamisée, est projetée



Pl. XI. — Lignes de force magnétique.



## CHAPITRE XII (SUITE) (1)

### LOI DE LA FORCE MAGNÉTIQUE

*Les actions magnétiques sont proportionnelles au produit des masses magnétiques en présence et inversement proportionnelles au carré de la distance.*

Pour vérifier cette loi par l'expérience, il faut mesurer les forces magnétiques. Coulomb l'a fait par deux méthodes : la balance de torsion et la méthode des oscillations :

#### BALANCE DE TORSION

Dans la balance de torsion déjà employée pour la mesure des actions électriques (page 48), on remplace la tige horizontale qui supporte le petit corps électrisé par une aiguille aimantée aussi régulièrement que possible. La balle électrisée fixe est remplacée de son côté par l'un des pôles d'un barreau vertical assez long pour que l'action de l'autre pôle sur l'aiguille soit négligeable.

Les expériences s'exécutent comme pour la mesure des forces électriques ; mais il faut tenir compte d'un élément nouveau, c'est la *force directrice* de la terre :

sur la plaque à travers un morceau de mousseline, puis on fait passer le courant, s'il y a lieu, et l'on favorise par de petites secousses l'arrangement de la limaille. Quand la figure est bien dessinée, on dirige sur la plaque un léger courant de vapeur qui ramollit la couche de gomme. Les morceaux de limaille se trouvent emprisonnés dans la masse, et on laisse refroidir, après avoir recouvert d'une seconde lame de verre. On peut ensuite projeter ces figures. (*Phil. Mag.*, 5<sup>e</sup> série, vol. VI, p. 348, 1878.)

(1) Par J. R.

On place d'abord l'aiguille dans le *méridien magnétique*, sans que le fil éprouve de torsion. (Le méridien magnétique est le plan vertical passant par la direction de l'aiguille d'une boussole.) Il suffit pour cela de remplacer l'aiguille aimantée par un fil de laiton, et de tourner le cercle de torsion jusqu'à ce que ce fil soit parallèle à la direction de l'aiguille de la boussole. On remet alors l'aiguille aimantée, et on mesure l'action de la terre en notant la torsion qu'il faut donner au fil de suspension pour amener l'aiguille à différents angles.

Quand cette aiguille prend ensuite une certaine déviation par la répulsion de l'aimant fixe, la torsion qu'elle éprouve jointe à l'action magnétique de la terre fait équilibre à la force de répulsion, à la distance où se trouvent les pôles des deux aimants.

On peut encore compenser l'action de la terre, en plaçant dans la direction de l'aiguille *d'inclinaison* (voir chapitre XIII) un barreau aimanté, le pôle austral en haut, de manière que son action annule celle de la terre. On trouve par tâtonnements la position la plus convenable : c'est celle pour laquelle la durée des oscillations de l'aiguille est la plus longue.

#### MÉTHODE DES OSCILLATIONS

On fait osciller une aiguille aimantée, suspendue à un fil de soie sans torsion, en regard de l'un des pôles d'un aimant vertical assez long pour que l'autre pôle n'exerce pas d'action appréciable. On compte le nombre d'oscillations faites dans un temps donné, soit quand l'aiguille est sous l'influence de l'aimant, soit quand elle est soustraite à cette influence.

L'aiguille oscille comme un pendule : dans le premier



cas, la pesanteur est remplacée par la somme des actions de l'aimant et du magnétisme terrestre ; dans le second cas, par le magnétisme terrestre seul. On aura donc par différence l'action de l'aimant seul. L'intensité de la force est d'ailleurs proportionnelle, dans les deux cas, au carré du nombre d'oscillations faites dans le même temps.

#### VÉRIFICATION DIRECTE DE LA LOI DE L'INVERSE CARRÉ DES DISTANCES

Pour vérifier la loi de l'inverse carré des distances, on opère avec la balance d'une façon analogue à celle décrite pour la vérification de la loi électrique. Dans la seconde méthode, on fait varier simplement la distance de l'aimant vertical à l'aiguille d'épreuve.

#### VÉRIFICATION DE LA LOI DES MASSES

On prend deux barreaux aimantés que l'on fait agir séparément, puis tous les deux à la fois sur l'aiguille d'épreuve.

#### UNITÉ DE QUANTITÉ MAGNÉTIQUE

La définition de l'unité de quantité magnétique se déduit de la loi de la force : c'est la quantité qui repousse une quantité égale de magnétisme de la même espèce, située à l'unité de distance, avec l'unité de force.

Les expressions unité de quantité magnétique, unité de pôle, unité d'intensité de pôle, ont la même signification.

#### PREUVE INDIRECTE DE LA LOI DE L'INVERSE CARRÉ DES DISTANCES

Du moment que les actions magnétiques varient en raison inverse du carré de la distance, la théorie du potentiel est applicable au magnétisme comme à l'électricité.

De là l'importance d'avoir des preuves rigoureuses de cette loi. Comme pour l'électricité, on peut avoir une preuve indirecte plus précise que les expériences de Coulomb. Ainsi Gauss admet seulement que les attractions varient en raison inverse d'une certaine puissance  $n$  de la distance, et il prouve que  $n$  doit être égale à 2.

La méthode est connue sous le nom de *Méthode des aimants de Gauss* (1).

(1) *Aimants de Gauss*. — Gauss étudie la déviation que fait subir un aimant fixe, disposé perpendiculairement au méridien magnétique, à une petite aiguille aimantée suspendue à un fil sans torsion, et occupant, à une grande distance du barreau fixe, les deux positions suivantes :

1<sup>re</sup> position : le centre de l'aiguille est sur la normale au barreau passant par le milieu de celui-ci ;

2<sup>e</sup> position : le centre de l'aiguille est sur le prolongement de l'axe du barreau fixe.

$D$  étant la distance des centres des aimants,  $C_1$  et  $C_2$  les moments des couples de rotation exercés par le barreau fixe sur l'aiguille dans les deux positions, on démontre par le calcul que l'on doit avoir sensiblement

$$C_1 = \frac{MM'}{D^{n+1}}, \quad C_2 = \frac{nMM'}{D^{n+1}},$$

si  $D$  est très grand par rapport aux dimensions des aimants,  $M$  étant le moment magnétique de l'aimant fixe et  $M'$  celui de l'aimant mobile. D'où

$$\frac{C_2}{C_1} = n.$$

Quand la petite aiguille est en équilibre sous l'influence de l'action du barreau fixe et celle de la terre, elle a une déviation  $\theta_1$  dans le premier cas, et  $\theta_2$  dans le second ; et,  $H$  étant la composante horizontale de la terre, cet équilibre est exprimé par les relations :

$$\begin{aligned} C_1 &= M' H \tan \theta_1, \\ C_2 &= M' H \tan \theta_2. \end{aligned}$$

On doit donc avoir

$$\frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} = n.$$

ou, pour de très petits angles,

$$\theta_2 \approx n \theta_1.$$

En observant les déviations  $\theta_1$  et  $\theta_2$  à l'aide d'un miroir adapté à l'aimant

## AUTRE PREUVE INDIRECTE

Une autre preuve indirecte peut être tirée de l'étude des courbes du *spectre* ou *fantôme* magnétique d'un barreau, c'est-à-dire de ses lignes de force. Lambert a calculé l'équation de ces courbes, et le D<sup>r</sup> Roget a indiqué des procédés pour les tracer graphiquement. Or la loi de l'inverse carré résulte du calcul de ces courbes. (Voy. le *Traité d'électricité* de de la Rive, vol. I, p. 592.)

## MESURE DES MOMENTS MAGNÉTIQUES

## BALANCE DE TORSION

On peut comparer les moments magnétiques de deux barreaux aimantés en les plaçant dans un étrier fixé au fil de suspension de la balance de torsion, de manière qu'ils restent dans le méridien magnétique sans qu'il y ait de torsion. On cherche ensuite de combien de degrés il faut faire tourner le cercle de torsion pour obtenir un écart constant entre les deux barreaux que l'on compare.

## MÉTHODE DES OSCILLATIONS

Quand il s'agit d'aiguilles aimantées, on les suspend par

suspendu, on vérifie que le rapport se rapproche d'autant plus de 2 que l'expérience a été faite avec plus de soin.

La première position des aimants fournit alors la relation

$$\frac{M}{H} = D^3 \operatorname{tang} \theta_1,$$

et la deuxième

$$\frac{2M}{H} = D^3 \operatorname{tang} \theta_2.$$

Cette relation n'est qu'approchée si les aimants ne sont pas infiniment petits.

leur centre à un fil de soie sans torsion, et on les fait osciller sous l'action de la terre.

$t$  étant la durée d'une demi-oscillation,  $I$  le *moment d'inertie* de l'aiguille,  $C$  le moment du couple de rotation, la formule du pendule donne la relation

$$t = \pi \sqrt{\frac{I}{C}}$$

Dans le cas du magnétisme, on a  $C = MH$ ,  $M$  étant le moment  $ml$  de l'aiguille et  $H$  la composante horizontale de la terre. On a donc :

$$t = \pi \sqrt{\frac{I}{MH}}$$

d'où

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

$n$  étant le nombre de demi-oscillations par seconde.

Pour une autre aiguille oscillant dans le même lieu, on a :

$$M'H = \pi^2 n'^2 I',$$

d'où

$$\frac{M}{M'} = \frac{n^2}{n'^2} \times \frac{I}{I'}$$

Si les deux aiguilles ont même moment d'inertie,  $I = I'$  et

$$\frac{M}{M'} = \frac{n^2}{n'^2} \quad (1).$$

(1) *Détermination des moments d'inertie par le calcul et l'expérience.* — Si les dimensions transversales de l'aiguille sont négligeables,  $p$  étant son poids en grammes et  $l$  sa longueur, on a

$$I = \frac{p}{12} l^2,$$

l'aiguille étant suspendue horizontalement par son milieu. Pour un barreau

MÉTHODE DES DÉVIATIONS

Wiedemann (*Galvanismus*, vol. II) compare les moments magnétiques d'aiguilles aimantées par les déviations qu'elles produisent sur une aiguille aimantée très courte, munie d'un miroir et mobile autour d'un axe vertical.

L'aiguille dont on veut observer le magnétisme se place à poste fixe dans une rainure horizontale, dont la direction est sensiblement perpendiculaire au méridien magnétique. La distance de l'aiguille fixe à l'aiguille déviée est assez grande pour qu'une petite différence dans la position des pôles n'altère pas sensiblement les résultats. On peut choisir

ayant la forme d'un prisme rectangulaire ( $l, a, b$ ), suspendu de même,  $b$  étant la largeur,

$$I = \frac{p}{12} (l^3 + b^3).$$

Pour un cylindre circulaire ( $l, r$ ), suspendu de même,

$$I = p \left( \frac{r^2}{4} + \frac{l^3}{12} \right).$$

Gauss détermine expérimentalement le moment d'inertie d'un barreau ou d'une aiguille en lui suspendant deux poids égaux  $q$  à des distances égales du centre,  $a_1$  puis  $a_2$ , et faisant osciller à chaque fois sous l'action de la terre.  $A$  étant une constante dépendant de la forme des poids,  $t_1$  et  $t_2$  les durées d'oscillation,  $MH$  le couple,

$$MH = \frac{\pi^2 (I + A + 2qa_1^2)}{t_1^2} = \frac{\pi^2 (I + A + 2qa_2^2)}{t_2^2} = \frac{2\pi^2 q (a_1^2 - a_2^2)}{t_1^2 - t_2^2}. \quad (1)$$

Si l'on fait osciller le barreau sans les poids,  $t$  étant la durée d'oscillation, on a

$$MH = \frac{\pi^2 I}{t^2}.$$

d'où pour :

$$I = \frac{t^2 \times 2q (a_1^2 - a_2^2)}{t_1^2 - t_2^2}.$$

Mais, pour comparer les moments de deux barreaux, la relation (1) suffit.

arbitrairement l'azimut de la position de la ligne des centres et, pourvu que l'aiguille fixe reçoive la même position dans toutes les expériences, les déviations obtenues seront proportionnelles au moment de l'aiguille fixe. Si l'aiguille est aimantée régulièrement, on peut la retourner bout pour bout dans sa rainure et prendre la moyenne des déviations.

#### MÉTHODE DE M. BOUTY (1)

M. Bouty a imaginé récemment une méthode qui lui permet de mesurer rapidement les moments de très petites

(1) La méthode est décrite dans les *Annales de l'École normale supérieure*, 2<sup>e</sup> série, vol. IV, 1874, et dans le *Journal de Physique*, vol. III, p. 361, 1874. En voici le principe : sur un support rigide, mobile autour d'un axe vertical, on fixe une aiguille horizontale dont le moment magnétique  $M$  est connu, et la petite aiguille dont on veut déterminer le moment magnétique  $X$ . Les deux aiguilles sont placées l'une au-dessous de l'autre, de façon que leurs axes soient rectangulaires, et à une distance suffisante pour que leur action réciproque n'altère pas la distribution du magnétisme dans chacune d'elles.

Le système ainsi formé prend, sous l'influence du magnétisme terrestre, une position d'équilibre telle que l'axe magnétique de l'aiguille  $M$  fasse, avec le plan du méridien magnétique, un angle  $\alpha$  déterminé par l'équation

$$X = M \operatorname{tang} \alpha.$$

Si  $X$  est très petit par rapport à  $M$ , on mesure  $\alpha$  par la méthode du miroir : à cet effet le support des aiguilles porte un petit miroir argenté vertical dans lequel on observe, avec une lunette, l'image d'une règle divisée, horizontale, placée au dessous et très près de l'objectif, et perpendiculaire à l'axe optique de la lunette.

Comme on est libre de faire le moment  $M$  de l'aiguille directrice aussi aible qu'on le voudra, on pourra mesurer des moments magnétiques très faibles.

Le support employé peut être un simple bâtonnet en cire à cacheter dure et peu fusible : l'aiguille directrice est collée en dessous du bâtonnet, et un tube de verre très étroit, destiné à recevoir les petites aiguilles, traverse le bâtonnet vers sa partie supérieure, de telle sorte que son axe soit horizontal et perpendiculaire à l'axe de l'aiguille directrice : le petit miroir est collé en avant. Tout l'appareil, placé dans une boîte noircie à l'intérieur et fermée par une glace plane, est suspendu à un seul fil de soie sans torsion.

aiguilles de rupture n'ayant pas plus de 2 millimètres de long sur  $0^{\text{mm}},2$  de diamètre.

### DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME

#### MÉTHODES ET RÉSULTATS DE COULOMB

Coulomb a étudié la distribution magnétique dans des aimants, de longueur très grande par rapport à leurs dimensions transversales, de forme régulière (cylindrique ou prismatique) et aimantés régulièrement. Il a employé la balance de torsion et la méthode des oscillations.

*Balance de torsion.* — Le barreau ou la tige que l'on veut étudier est divisé en un certain nombre de parties égales; on le fait glisser verticalement derrière une règle de bois mince qui le sépare du pôle similaire de l'*aiguille d'épreuve*, de manière à amener successivement les points de division en regard de ce pôle, et on note la torsion à donner au fil de suspension pour obliger l'aiguille d'épreuve à rester dans le plan du méridien magnétique et presque en contact avec le barreau, dont elle n'est séparée que par l'épaisseur du bois.

*Méthode des oscillations.* — Le barreau glisse verticalement à une distance fixe de l'aiguille d'épreuve, que l'on fait osciller successivement devant les points de division au fur et à mesure qu'ils arrivent dans le plan horizontal de l'aiguille.

*Extrémités du barreau.* — En opérant ainsi, on mesure non pas la masse magnétique du point seul qui se trouve en regard de l'aiguille, mais la masse d'une petite région du barreau située autour de ce point, au-dessus et au-dessous. A l'extrémité du barreau, on ne mesure plus que l'action de la moitié de la région. Aussi Coulomb double

les résultats obtenus, pour exprimer l'intensité des forces qui émanent des extrémités mêmes.

*Résultats.* — Coulomb représente géométriquement les résultats de son étude, en élevant, sur chaque point d'une horizontale figurant la tige aimantée, des perpendiculaires de longueurs proportionnelles aux intensités trouvées par l'expérience, et prenant ces longueurs au-dessus de l'axe

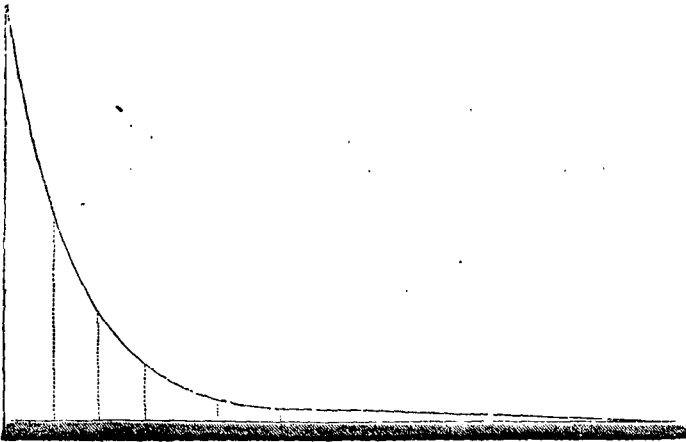


FIG. 60.

pour une extrémité et au-dessous pour l'autre, afin de distinguer les deux magnétismes. La figure représente la partie de la courbe correspondant à l'une des extrémités de la tige : la partie correspondant à l'autre extrémité est symétrique de celle-ci par rapport au milieu de la tige. Dans le cas d'une tige d'acier de 73 centimètres de long et de 4<sup>mm</sup>,5 de diamètre, la courbe complète se confond avec la tige dans la partie centrale sur une longueur de 49 centimètres et, sur les 12 centimètres restant de chaque côté, se relève



rapidement jusqu'aux extrémités où elle atteint son maximum (1).

La distribution dans une tige longue et mince consiste donc en deux plages de masses  $+m$  et  $-m$ , occupant les deux bouts et représentées par la somme des intensités ou les aires des deux courbes partielles. La position précise de chaque pôle, c'est-à-dire du point d'application de chacune des résultantes des forces parallèles qui sollicitent les masses  $+m$  et  $-m$  dans un champ uniforme, s'obtiendra en projetant sur la tige le centre de gravité de chacune des aires.

La courbe de distribution reste exactement la même pour des tiges ou des lames de longueurs différentes, pourvu que leur longueur dépasse 20 centimètres : la seule différence est que l'espace laissé au milieu, où le magnétisme est sensiblement nul, est plus ou moins long. Il en résulte encore que tous les aimants de même force et d'une longueur supérieure à 20 centimètres ont leurs pôles à la même distance des extrémités, distance qui serait de 4 centimètres d'après Coulomb. Coulomb a trouvé aussi que quand les aimants sont trop courts, leurs pôles sont à peu près au tiers de leur demi-longueur à partir des extrémités ; en d'autres termes, les deux courbes magnétiques opposées se confondent avec une même droite inclinée sur l'axe et passant par le centre de la tige.

$\frac{d}{2}$  étant la distance constante qui sépare le pôle de l'extrémité voisine de l'aiguille,  $l$  la longueur de l'aiguille (de

(1) En prenant l'origine à une extrémité, et appelant  $l$  la longueur du barreau, l'équation de cette courbe, que Biot a trouvée empiriquement, est

$$y = A (K^{-x} - K^{-(l-x)}).$$

20 centimètres ou au-dessus),  $m$  la quantité de magnétisme de l'une des plages polaires, le moment magnétique de l'aiguille sera alors  $m(l-d)$ .

#### MÉTHODES MODERNES

La distribution du magnétisme a été récemment l'objet des études d'un certain nombre de physiciens et notamment de M. Jamin. M. Jamin a résumé dans le *Journal de physique* (vol. V, p. 41 et 73, 1876) ses recherches, dont les résultats ont été successivement communiqués à l'Académie des sciences pendant les années 1872 à 1875 (Comptes rendus, vol. LXXV à LXXXI).

#### PROCÉDÉ D'AIMANTATION

Le procédé d'Élias, décrit dans les *Annales de Poggendorf* (7 mars 1844), est le procédé d'aimantation le plus employé.

Il consiste à faire aller et venir sur le barreau que l'on veut aimanter une bobine en fil de cuivre dans laquelle circule un courant électrique. Quand on opère sur un fer à cheval, on place une bobine sur chacune des deux branches, on fait passer le courant dans les deux bobines, et on les fait aller et venir ensemble sur les branches du fer à cheval. On peut obtenir l'aimantation maxima au moyen d'un seul couple de Grove et de Bunsen; seulement il faut que ce couple ait très peu de résistance, et que les bobines aimantantes en aient aussi très peu. M. Élias se servait d'un couple de Grove dont la résistance était égale à celle d'un fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre et de  $\frac{2}{3}$  de mètre de longueur. Sa bobine aimantante était formée d'un fil de 3 millimètres de diamètre et de 7 à 8 mètres de longueur.

Ce procédé offre une grande analogie avec celui de la double touche.

L'influence du nombre des passes est d'autant plus grande que l'intensité du courant inducteur est plus faible. Avec une intensité suffisante, on peut aimanter à saturation un barreau en une seule passe. La passe peut être plus ou moins rapide sans que l'aimantation qu'elle développe change pour cela (1).

## MÉTHODES D'OBSERVATION

On mesure directement le magnétisme total d'un barreau, en faisant glisser rapidement le long du barreau, depuis la ligne moyenne jusqu'au delà d'une de ses extrémités, une petite spirale de fil de cuivre recouvert de soie, très courte et qui l'entoure aussi près que possible. Cette spirale coupant toutes les lignes magnétiques sur son parcours, détermine un courant d'induction, qui imprime à l'aiguille d'un galvanomètre à miroir, auquel elle est reliée, un arc d'impulsion proportionnel au magnétisme libre contenu dans la moitié de l'aimant. Cette méthode a été employée par Van Rees, Gaugain et par M. Jamin.

M. H. Rowland (2) s'est servi d'une spirale, comme plan d'épreuve magnétique, pour obtenir la densité magnétique en un point d'un aimant. Il l'appliquait contre ce point et la retirait subitement.

M. Gaugain mesure la quantité de magnétisme entre deux points  $a$  et  $b$  en faisant glisser successivement la spirale du point  $a$ , puis du point  $b$  jusqu'au bout et prenant la

(1) Voir le *Mémoire sur le magnétisme*, de Gaugain. (*Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, vol. VIII, 1876, p. 320.)

(2) *Journal de Physique*, vol. V, 1876, p. 331. M. Gariel avait employé cette méthode dans des études dont il a rendu compte à la réunion de Bordeaux (1872) de l'Association Française.

différence des arcs d'impulsion. Si les deux points sont suffisamment rapprochés, on peut construire ainsi la courbe des intensités.

M. Jamin préfère mesurer l'intensité magnétique en chaque point par la force d'arrachement d'un petit contact sphérique de fer doux ou « clou d'épreuve ». La racine carrée de la force d'arrachement donne l'intensité magnétique au point considéré. Pour apprécier cette force, on attache la petite sphère à l'un des plateaux d'une balance sensible, et sous l'autre plateau on fixe un ressort à boudin, terminé par un fil de soie qui s'enroule sur un treuil micrométrique. On peut dès lors tendre progressivement et sans secousse le ressort, jusqu'à l'arrachement. Le micromètre donne l'allongement du ressort : à cet allongement correspond un poids indiqué par une graduation préalable du ressort. Il faut avoir soin de maintenir en état parfait de propreté et de poli les surfaces en contact de l'aimant et du clou. Pour avoir, par cette méthode, la totalité du magnétisme, on trace, à la surface du barreau, à des distances déterminées, des lignes perpendiculaires à la longueur et dans chacune d'elles on mesure l'intensité en divers points et on en déduit l'intensité moyenne ; on trace de la ligne moyenne à l'extrémité la courbe de ces valeurs, dont on évalue l'aire en la divisant en petits trapèzes par des ordonnées rapprochées. Cette aire exprime la somme du magnétisme.

#### HYPOTHÈSE DE M. JAMIN SUR LA CONSTITUTION DES AIMANTS

*Rôle de la section moyenne et des surfaces polaires.* — L'expérience de la rupture d'un aimant conduit à admettre qu'un barreau est composé de filets formés d'aimants

moléculaires qui se suivent et se joignent par leurs pôles contraires. M. Jamin suppose que ces filets sont égaux, c'est-à-dire qu'on les groupe en faisceaux de même intensité : les pôles élémentaires en regard entre deux molécules contiguës se neutralisant, les filets sont inactifs dans toute leur étendue, sauf à leur extrémité, où ils ont un pôle d'égale intensité pour tous. Tous les filets passent par la section moyenne du barreau « où ils sont serrés comme un faisceau dans une ceinture » ; mais comme ils sont terminés par des pôles libres qui se repoussent, ils s'épanouissent des deux côtés de la section moyenne aux divers points de la surface du barreau. Sur chaque élément superficiel, l'intensité est proportionnelle au nombre des pôles qui s'y trouvent, et la force d'arrachement au carré de ce nombre. Le nombre total des filets, ou la quantité totale de magnétisme libre, est égale à la somme des intensités sur tous les éléments de la surface ou à la somme des racines carrées des forces d'arrachement.

*Comme tous les filets passent par la section moyenne, leur nombre et par suite le magnétisme total que peut contenir le barreau doit dépendre de l'étendue de cette section ; mais la distribution et l'épanouissement des filets sont réglés par la forme et l'étendue des surfaces extérieures.*

Il faut, en effet, que les filets trouvent, dans les extrémités, des surfaces suffisantes pour l'épanouissement de leurs pôles.

Prenons une lame aimantée longue et mince et mesurons la force d'arrachement aux divers points de la ligne axiale, c'est-à-dire de la ligne menée par le milieu parallèlement aux bords. On constate que la force est nulle depuis le milieu jusqu'à une petite distance des bouts, puis

la force grandit rapidement jusqu'aux extrémités, et l'on retrouve les courbes d'intensité magnétique signalées par Coulomb : elles représentent les épanouissements des extrémités des filets. Si la lame est longue, les deux courbes sont très éloignées l'une de l'autre ; si la longueur décroît, les courbes se transportent seulement aux mêmes distances des extrémités : elles se rapprochent donc sans s'altérer et sans que la quantité de magnétisme change. La lame diminuant toujours, les courbes finissent par se rencontrer. A partir de ce moment, elles se pénètrent, se transforment en deux droites opposées et leur aire, qui exprime la quantité de magnétisme, diminue, car elle est égale à la somme algébrique de leurs ordonnées.

M. Jamin explique ces faits en disant que tout d'abord les filets magnétiques ont plus de place qu'il ne leur en faut pour s'épanouir ; la ceinture moyenne est pleine, mais avec la même surface polaire, elle pourrait être plus grande. Quand les courbes se touchent, les filets ont justement la place qui leur est nécessaire ; la surface polaire a l'étendue qui convient à la section moyenne : l'aimant est plein, c'est l'aimant *normal*. Si l'on diminue encore la longueur, les filets les plus courts disparaissent parce que leurs deux pôles se réunissent, et la quantité de magnétisme décroît par insuffisance de place pour l'épanouissement des pôles élémentaires.

Comme vérification, on prend trois lames d'acier de longueur suffisante et de 1 millimètre d'épaisseur aimantées à saturation. Leur section centrale a la même grandeur ; mais elles ont des formes très différentes : l'une est rectangulaire, l'autre a la forme de losange des aiguilles de boussole, la troisième s'élargit comme un double éventail de la ligne moyenne aux deux bouts. La distribution ma-

gnétique est très différente ; mais en faisant la somme des intensités mesurées aux divers points, on trouve des quantités de magnétisme sensiblement égales, ce qui doit être puisque les sections moyennes sont les mêmes.

*Rôle des armatures.* — Si la quantité de magnétisme ne dépend que de la section moyenne et si la surface des pôles ne sert qu'à l'épanouissement des filets, il importe peu que cette surface soit en acier ou en fer. M. Jamin a pris deux portions d'un même ruban d'acier : l'une très longue, à surface excessive, contenant un magnétisme total représenté par un arc d'impulsion A; l'autre, très courte, qui n'en contenait que  $a$ . On adapta aux deux extrémités de celle-ci deux longues armatures en tôle. Elle ne changèrent rien au magnétisme primitif qui resta  $a$  ; mais, en réaimantant la lame, l'arc d'impulsion devint A, c'est-à-dire qu'elle prit autant de magnétisme qu'une lame à grande surface. D'où les lois suivantes :

1° Deux armatures, appliquées à un aimant tout formé, changent la distribution mais non la somme de magnétisme ;

2° Deux armatures, appliquées à un acier à grande surface qu'on aimante ensuite, ne changent pas la somme de magnétisme ;

3° Deux armatures, appliquées à un acier à surface insuffisante, permettent de lui donner plus de magnétisme que si elle était nue et autant qu'à une lame à grande surface si la quantité de fer ajoutée est suffisante.

Ces lois expliquent le fait suivant attribué à tort à une condensation magnétique.

Un acier en fer à cheval à grande surface est aimanté, puis on lui applique un contact et on mesure sa force portative F. On remet le contact, et par deux bobines, intro-

duites à l'avance entre ses branches, on le réaimante.  $F$  ne change pas, car l'aimant, étant à grande surface, a pris d'avance tout ce que peut admettre sa ceinture.

Répétons l'expérience avec un aimant à surface trop petite; sa force portative est d'abord  $f$ ; mais, en le réaimantant après avoir placé le contact, la force d'arrachement devient  $F$  comme précédemment. C'est qu'en effet, avec son contact, l'acier est dans le même cas qu'avec deux armatures infiniment grosses et longues appliquées à ses pôles, et il prend tout ce qu'admet sa ceinture. Mais si l'on remet le contact après ce premier arrachement, on retrouve la force portative  $f$ .

#### FAISCEAUX MAGNÉTIQUES

Dans un barreau, les filets pénètrent à une certaine profondeur, mais sans arriver au cœur. Leur nombre est proportionnel à cette profondeur et au périmètre de la section moyenne. Si l'aimantation pénétrait jusqu'au cœur du barreau, le nombre des filets magnétiques serait proportionnel à la surface de la section moyenne. On en approche en divisant l'acier en lames minces que l'on superpose; le nombre des filets augmente alors proportionnellement au nombre des lames, et comme les surfaces ne s'accroissent que par l'augmentation d'épaisseur, elles se trouvent bientôt remplies de magnétisme. Les courbes d'intensité s'élèvent et se rapprochent, puis se rejoignent au milieu, et l'aimant est plein dans toutes ses dimensions, puisque d'une part la section moyenne est aimantée dans toute son étendue, et que, d'autre part, les courbes d'intensité remplissent les surfaces extérieures. On voit ainsi pourquoi les faisceaux magnétiques sont supérieurs aux aimants formés avec une seule pièce qui



aurait une épaisseur égale à la somme des épaisseurs des lames.

Si l'on arrête la formation de l'aimant à ce moment, chaque lame conserve son magnétisme primitif et le magnétisme total du faisceau est la somme du magnétisme des lames. Si l'on continue, les surfaces extérieures deviennent insuffisantes, puisqu'elles augmentent moins rapidement que la section moyenne et les courbes se pénètrent : le magnétisme du faisceau est toujours égal à la somme des magnétismes des lames, mais chaque lame perd de son magnétisme primitif. Le poids du faisceau augmente donc beaucoup plus rapidement que son magnétisme : il arrive un moment où l'addition de nouvelles lames n'ajoute plus rien au magnétisme total, et est en conséquence en pure perte. On a alors l'*aimant limite*, à partir duquel la courbe magnétique observée ne change plus sur les plats et se réduit à une droite. « Je me suis assuré, dit M. Jamin, que, dans presque tous les aimants des cabinets de physique, le nombre des lames est excessif. »

Si l'on sépare les lames par des matières non magnétiques, du carton par exemple, le magnétisme qui est sur les plats semble diminuer, mais une certaine quantité d'aimantation est restée entre les lames, et le magnétisme total est en réalité plus grand. Il y a donc avantage à constituer des faisceaux avec des lames nombreuses et séparées.

*Application d'armatures à des faisceaux tout formés.*  
— On superpose des lames aimantées à saturation jusqu'à ce que les surfaces polaires soient remplies, c'est-à-dire que l'on soit arrivé à l'aimant normal. Il faut pour cela, par exemple, trois lames et l'on trouve que la force portative est de 4 kilogrammes. Re commençons l'expérience, en

appliquant les mêmes lames contre deux armatures en fer, de 0<sup>m</sup><sup>m</sup>,0350 : les intensités croîtront plus lentement, parce que la somme des magnétismes se répand sur des surfaces plus considérables, et l'aimant normal ne sera obtenu que quand ces étendues seront pleines : il faudra superposer d'autant plus de lames que les armatures sont plus grandes. La force totale de l'aimant augmentera donc avec ses armatures. Avec les armatures de 0<sup>m</sup><sup>m</sup>,0350, on arrive à 140 kilogrammes.

#### CONTACT. — FORCE PORTATIVE

Quand on approche du pôle d'un aimant une armature en fer doux, elle subit la décomposition par influence : à un certain moment, le magnétisme induit de nom contraire dissimule le magnétisme de l'acier, et l'armature est tout entière chargée de magnétisme de même nom, comme si elle prolongeait l'aimant. L'armature gagne le magnétisme que perd l'acier, et si elle est suffisamment longue et grosse, tout le magnétisme de l'aimant semble s'être transporté sur l'armature. Il n'y a pas de perte de magnétisme, mais un simple échange.

Mais si l'on réunit les deux pôles d'un aimant par un contact de fer doux, une partie du magnétisme de l'aimant disparaît sans se retrouver dans le contact ; car un grand nombre des filets magnétiques, se prolongeant à travers le fer, se réunissent par leurs pôles de noms contraires, se ferment et le magnétisme libre correspondant disparaît.

Le contact prend d'autant plus de magnétisme à l'aimant qu'il est plus gros et plus court ; si sa longueur était nulle, les pôles, se trouvant réunis directement, seraient ramenés à l'état naturel. Enfin la surface d'adhérence ne doit pas dépasser une certaine limite.

La force portative atteint sa plus grande valeur, quand il reste sur l'aimant aussi peu que possible de magnétisme apparent ; car tout le magnétisme dissimulé est employé à la produire.

#### RÈGLES POUR LA CONSTRUCTION DES AIMANTS

1° Le contact doit avoir une masse suffisante pour dissimuler la presque totalité du magnétisme répandu sur la surface extérieure de l'aimant.

2° Cette masse étant donnée, on réduit la surface d'adhérence jusqu'au moment où l'on voit augmenter le peu de magnétisme libre que l'application du contact laisse sur l'aimant.

3° La longueur et la largeur des lames étant déterminées, il faut que leur nombre soit suffisant pour laisser apparaître un peu de magnétisme libre sur l'aimant, lorsque le contact est placé.

4° Les armatures doivent être très rapprochées, et leur développement doit être en raison du nombre de lames dont l'aimant est composé.

#### GRAND AIMANT DE M. JAMIN

Cet aimant, présenté à l'Académie des sciences le 12 mai 1873, est construit de la façon suivante : deux armatures pesant chacune 16 kilogrammes, placées vis-à-vis l'une de l'autre, sont fixées solidairement par des brides de cuivre très résistantes : leur largeur est de 0<sup>m</sup>,11 ; leurs surfaces polaires horizontales et dirigées vers le bas sont à 0<sup>m</sup>,12 de distance ; leur épaisseur transverse est de 0<sup>m</sup>,02 ; elles sont bien dressées et reçoivent un contact cubique de fer doux qui pèse 13 kilogrammes. A partir de ces surfaces, les armatures s'élèvent, en s'écartant l'une de l'autre

et en s'amincissant, et se terminent par un bord tranchant.

Elles sont réunies vers le haut par une lame d'acier de 1<sup>m</sup>,20, fixée par des vis sur leur surface extérieure, et qui se recourbe librement, suivant la forme déterminée par son élasticité. Toutes les autres lames préalablement aimantées sont réunies à l'intérieur de celles-ci, l'une après l'autre; abandonnées à elles-mêmes, elles se collent l'une à l'autre pendant que leurs extrémités appuient sur les armatures.

Quand il y a 55 lames, la force portative atteint sa valeur maxima, 500 kilogrammes. En s'arrêtant à 45 lames, le poids total est de 46 kilogrammes, l'aimant porte 460 kilogrammes, soit 10 fois son poids; au delà de ce nombre, le poids augmente plus rapidement que la puissance.

#### CONDUCTIBILITÉ MAGNÉTIQUE

Il y a des aimants pour lesquels deux points voisins peuvent offrir des intensités différentes; ce sont surtout les aimants naturels et les aciers trempés; il y en a d'autres où les mêmes différences de tension ne s'établissent qu'entre des points séparés par de grandes distances, et l'on ne parvient à leur donner des pôles énergiques qu'en les allongeant beaucoup. M. Jamin appelle ceux-ci *conducteurs*, et il définit la *conductibilité*, la propriété que possèdent les tensions de s'équilibrer entre deux points. Le fer est d'une conductibilité parfaite, puisqu'il perd immédiatement les tensions inégales, qu'on ne maintient sur sa surface qu'au moyen de courants électriques. C'est parce qu'un contact de fer est bon conducteur qu'il ramène à l'état neutre les deux pôles d'un aimant en fer à cheval, et c'est parce qu'il n'est pas conducteur que l'acier garde à

ses bouts des polarités contraires, qui ne se rejoignent et ne s'annulent que si l'acier est très court.

On constate cette inégale conductibilité comme il suit : on prend un aimant prismatique saturé et l'on adapte à une de ses extrémités A une armature de fer, la distribution en B ne change pas ; donc la quantité de magnétisme en B n'a pas changé, et par suite elle ne change pas en A ; mais de ce côté l'aimant a perdu de son magnétisme et l'armature en a gagné ; il faut nécessairement que la perte soit égale au gain. C'est ce que confirme la méthode d'induction ; le magnétisme A ne change pas, que l'on mette ou que l'on ôte l'armature.

Cependant si, par la méthode du clou, on fait la somme des pertes de l'acier et des gains du fer en leurs divers points, on trouve que le gain l'emporte sur la perte dans un rapport  $\mu$ . C'est que l'acier est moins conducteur que le fer. Or, le contact d'épreuve appliqué en un point attire non seulement le magnétisme de l'élément qu'il couvre, mais aussi celui des points voisins dans une certaine étendue qui dépend de la conductibilité. Pour ramener à des éléments égaux, c'est-à-dire à des conductibilités égales, il faut multiplier par un coefficient  $\mu$  les mesures faites sur l'acier. On trouve alors que les armatures ne prennent en réalité que peu de magnétisme aux aimants, lors même qu'elles sont très étendues. Comme vérification,  $\mu$  doit être invariable pour un même acier, quelles que soient son aimantation, la grandeur de sa surface et l'étendue des armatures. C'est ce que vérifie l'expérience. D'autre part,  $\mu$  doit changer avec la nature de l'acier, augmenter si le métal est mauvais conducteur, diminuer s'il conduit bien. En effet, on trouve que  $\mu$  varie de 5 pour un acier très cémenté et trempé, jusqu'à 1,25 pour un acier peu carburé recuit au blanc.

Certains aciers très durs, et qui semblent ne point s'aimanter, prennent cependant un magnétisme notable, mais qui apparaît très peu au contact d'épreuve parce que cet acier, étant très peu conducteur, ne cède à ce contact que le magnétisme de l'élément touché, élément très petit pour l'acier alors qu'il est très grand pour le fer.

Les actions sur la limaille de fer et la force portative sont dans le même cas. Ce ne sont pas les aimants les plus chargés qui portent le mieux, ce sont les plus conducteurs.

L'action à distance est tout autre, la conductibilité n'y est pour rien, c'est la charge vraie qui produit l'effet. Un fer doux et un acier très dur qui indiqueraient le même magnétisme au contact d'épreuve seraient très inégaux à distance; l'acier l'emporterait, et si à distance un acier est équivalent à un fer doux aimanté, il se montrera beaucoup plus faible en force portative, en intensité au contact ou par son effet sur la limaille (1).

#### AIMANTS CIRCULAIRES ET ELLIPTIQUES

La méthode du « clou d'épreuve » a été appliquée par

(1) *Lois de la conductibilité.* — Dans un barreau indéfini, si l'intensité magnétique en un point est égale à  $A$ , elle est, à une distance algébrique  $x$  de ce point, exprimée par la formule

$$y = AK^{-x}.$$

Cette loi, qui se déduit de l'équation de Biot (voy. p. 313), a été vérifiée par M. Jamin sur une barre de fer carrée de 0<sup>m</sup>,02 de large et 2 mètres de long, en l'appliquant par une de ses extrémités contre un électro-aimant.

$A$  (capacité magnétique) est constant pour un même acier et est indépendant de l'état physique, c'est-à-dire de la trempe ou du recuit.

$K$  (inverse de la conductibilité) caractérise au contraire l'état physique; il diminue avec le recuit, augmente avec la trempe, et est toujours plus grand pour l'acier que pour le fer. La courbe magnétique s'allongeant quand  $K$  diminue, l'acier employé devra être d'autant plus long qu'il sera plus recuit: autrement il ne pourrait conserver tout le magnétisme dont il est capable. Si l'acier est trempé, il ne sera pas nécessaire qu'il soit très allongé.

M. Dutet (1), à l'étude de la distribution du magnétisme dans des plaques circulaires et elliptiques d'acier de 1 millimètre d'épaisseur, aimantées à l'aide d'un cadre très plat, les recouvrant complètement. Il a constaté que le magnétisme se distribue alors suivant des filets hyperboliques (2), et que les totalités de magnétisme libre sont proportionnelles aux surfaces (3).

Il a vérifié aussi cette proportionnalité du magnétisme libre aux surfaces dans le cas de plaques circulaires d'acier aimantées en posant leur centre sur le pôle taillé en pointe d'un électro-aimant placé normalement à leurs plans, et dans celui d'anneaux circulaires plats placés sur un électro-aimant dont la tranche polaire s'adapte exactement au creux de l'anneau (4). Le fantôme magnétique obtenu avec la limaille de fer montre que les lignes de force sont les rayons du disque; les courbes d'égales tensions sont des circonférences concentriques.

Avec un disque plein, l'un des magnétismes occupe une plage centrale et l'autre une plage marginale entourant la première; l'intensité diminue du centre à une ligne neutre, puis augmente de cette ligne aux bords.

(1) *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, 2<sup>e</sup> série, vol. V, 1876, p. 217, et *Journal de physique*, vol. V, 1876, p. 65.

(2) Les axes transverses de ces hyperboles sont dirigés suivant la ligne neutre et leur grandeur varie d'un filet à l'autre. Les axes non transverses sont les axes de symétrie perpendiculaires à la ligne neutre et ont même grandeur. Le magnétisme contenu dans chaque filet est proportionnel au carré des tensions existant à l'extrémité de ces filets.

(3) La formule  $I = A(a^h - a^{-h})$  donne la distribution sur chaque filet:  $I$  est la tension au point considéré,  $h$  la longueur de l'arc d'hyperbole comprise entre ce point et la section moyenne;  $A$  et  $a$  varient d'un filet à l'autre. Quand la plaque est circulaire, les courbes d'égales tensions sont des ellipses homofocales, ayant pour foyers les extrémités du diamètre formant la ligne neutre.

(4) *Journal de physique*, vol. VII, 1878, p. 37.

Avec un disque évidé, les magnétismes occupent encore deux régions concentriques, le maximum de chacun d'eux se trouvant sur les circonférences terminales (1).

#### DISTRIBUTION INTÉRIEURE DU MAGNÉTISME PERMANENT

Pour étudier la distribution magnétique dans l'intérieur d'un barreau épais d'acier que l'on aimante dans une bobine, M. Jamin use peu à peu le métal dans un acide, par exemple dans l'eau régale plus ou moins étendue, ou à la meule. Mais, pour obtenir des résultats comparables, il faut que les lames soient bien homogènes. Il a employé des lames laminées à froid plusieurs fois après des recuits successifs. Trempées ensuite et à peine recuites, elles se dissolvent régulièrement dans l'eau régale et peuvent être amenées jusqu'à une épaisseur de 0<sup>mm</sup>,1, sans se rompre et sans cesser d'être planes.

On aimante la lame, on la plonge dans l'acide et on la retire après chaque demi-heure d'action pour mesurer son épaisseur et la quantité de magnétisme qu'elle contient. En dissolvant le métal, l'acide dissout aussi le magnétisme qu'il possédait. On trouve que le rapport de la quantité de magnétisme à l'épaisseur va en diminuant jusqu'à zéro. L'aimantation décroît donc de la surface où elle est maxima

(1) R et r étant les rayons extérieur et intérieur, le rayon de la circonférence neutre est

$$\sqrt{\frac{R^2 + r^2}{2}}$$

et la totalité de chaque magnétisme

$$A (R^2 - r^2).$$

On passe au cas du disque plein en faisant  $r = 0$ , A ayant la même valeur pour des disques évidés ou pleins taillés dans le même acier.



jusqu'à une certaine profondeur,  $0^{\text{mm}},4$  par exemple, où elle est nulle, le noyau restant n'étant plus aimanté.

Cette profondeur est indépendante de l'épaisseur primitive de la lame; tant qu'elle n'est pas atteinte le noyau peut être réaimanté, et il reprend la même somme de magnétisme que la lame primitive. Mais à partir du moment où le noyau est réduit à  $0^{\text{mm}},4$ , l'aimantation pénètre toute sa masse et, si on l'use de nouveau, il garde une aimantation toujours proportionnelle à son épaisseur.

En aimantant par des courants d'intensité croissante une série de lames rangées par ordre d'épaisseur, on constate facilement que l'épaisseur des couches de magnétisme croît avec l'intensité du courant. Un courant insuffisant pour saturer une lame d'une certaine épaisseur, sature une lame plus mince.

Mais quand l'épaisseur dépasse une certaine limite, toutes les lames deviennent identiques et prennent une aimantation égale, ce qui prouve que les couches magnétiques se limitent à cette épaisseur qu'elles ne peuvent dépasser.

Cette limite varie avec la nature de l'acier et la longueur de la lame. Les aciers recuits et courts ne s'aimantent qu'à la surface, tandis que les aciers trempés et longs s'aimantent à peu près uniformément dans toute leur épaisseur. En comparant les aciers plus ou moins carburés et trempés, on reconnaît qu'ils forment une échelle aux deux extrémités de laquelle se trouvent :

1° Des aciers trempés, très carburés, peu conducteurs, très perméables à l'aimantation, s'aimantant très peu, mais à toute profondeur;

2° Des aciers recuits, peu carburés, très conducteurs, très peu perméables à l'aimantation, s'aimantant beaucoup à la surface, mais peu à l'intérieur.

Les premiers se comportent pour le magnétisme comme les *diélectriques* pour l'électricité, les seconds comme les conducteurs.

Le fer doux, qui est le plus conducteur des métaux magnétiques, doit être le moins perméable à l'aimantation. De même qu'il n'y a pas d'électricité à l'intérieur d'un conducteur creux électrisé, de même il ne doit pas y avoir d'aimantation à l'intérieur d'une enveloppe de fer aimantée (1). Un barreau d'acier placé tout entier à l'intérieur d'un cylindre de fer creux formant le noyau d'un électro-aimant ne s'aimante pas. Si une partie du barreau dépasse le noyau, cette partie extrême seule s'aimante.

#### AIMANTATIONS SUPERPOSÉES

M. Wiedemann (2) a observé qu'on peut désaimanter un acier par un courant inverse plus faible que le courant direct nécessaire pour le saturer. Ainsi, si l'on aimante une lame dans une bobine avec un courant de 10 éléments, il suffit d'un courant inverse de 5 éléments pour faire perdre à la lame toute polarité apparente.

La lame est ramenée à l'état neutre, mais elle n'est pas désaimantée ; car tout courant de 1, 2, 3, 5 éléments inverses ne l'aimante pas ; au contraire, des courants de 1, 2, 3, 5 éléments directs lui donnent un magnétisme considérable (3).

(1) C'est ce qu'on exprime aussi en disant que le *magnétisme ne traverse pas les corps magnétiques*. Ainsi, on soustrait une aiguille aimantée à l'action de la terre en l'enfermant dans une caisse en fer forgé. Le galvanomètre marin présente une application de ce principe (voy. chap. XIX).

(2) *Poggendorff Annalen*, vol. C, p. 235.

(3) Maxwell (*Electricity*, vol. II, art. 446), expose ainsi les faits :

« Lorsqu'un barreau d'acier a été aimanté au moyen d'une force positive  $X_0$ , on ne peut augmenter son magnétisme qu'en employant une force plus

Ce fait s'explique facilement dans les idées de M. Jamin : la lame a d'abord été aimantée jusqu'à la profondeur maxima par le courant direct, à une profondeur moindre par le courant inverse. Il y a deux aimantations superposées dont on ne voit que la différence. Tout courant inverse, produit par un nombre d'éléments inférieur à 5, ne change rien à la couche inverse extérieure et rien au système ; les mêmes courants directs détruisent en partie cette couche et la remplacent par une aimantation directe, qui s'ajoute à celle qui était restée dans les profondeurs.

On le vérifie en dissolvant dans un acide la lame qui a subi deux aimantations, l'une profonde par un courant direct de grande intensité, l'autre superficielle par un courant inverse moindre. Après une usure suffisante, la lame qui avait une aimantation inverse devient neutre, puis elle prend une aimantation directe.

On peut encore ne plonger dans l'acide que l'une des moitiés de la lame pour dissoudre le magnétisme extérieur qui s'y trouve et, quand on a mis à découvert l'aimantation contraire qui est au-dessous, la lame entière offre deux pôles de même nom à ses deux extrémités, et un point conséquent à l'endroit où a commencé l'action de l'acide (1).

D'après M. Gaugain (2), il est possible de superposer cinq

grande que  $X_0$  ; mais une force de signe contraire, plus petite que  $X_0$ , suffit pour diminuer son aimantation.

» Si le barreau est complètement désaimanté par une force négative  $X_1$ , on ne peut l'aimanter dans le sens négatif qu'en appliquant une force plus grande que  $X_1$ , mais une force positive plus petite que  $X_1$  suffit pour réaimanter le barreau dans le sens primitif. »

Il attribue la découverte de ces faits à Ritchie (*Phil. Mag.*, 1833), Jacobi (*Pogg. Ann.*, 1834), Marianini (*Ann. de chimie et de physique*, 1846), et Joule (*Phil. Trans.*, 1855, p. 287).

(1) Un aimant de ce genre a été présenté par M. Jamin à la Société de physique.

(2) *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, vol. VIII, 1876, p. 326.

ou six couches de magnétismes alternativement de signes contraires, en faisant passer dans les bobines magnétisantes une série de courants alternativement positifs et négatifs, d'intensités décroissantes et convenablement échelonnées. On obtient encore ce résultat, sans changer l'intensité du courant, en faisant varier alternativement le sens du courant et le nombre des passes données à chaque fois pour aimanter le barreau par la méthode d'Élias.

M. Bouty (1) a trouvé une expression mathématique de l'accroissement de magnétisme que prend, à chaque passage dans une bobine traversée par un courant constant, une aiguille d'acier récemment trempée. L'aiguille est chaque fois introduite et extraite lentement pour que l'accroissement ne puisse pas être attribué à l'action des courants induits développés par ce mouvement.

Le moment magnétique est représenté par la formule

$$M = A - \frac{B}{n},$$

où  $n$  représente le nombre des passages, A et B étant deux constantes.

(1) *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, vol. IV, 1875, p. 24.

## APPENDICE AU CHAPITRE XII

### AIMANTATION PAR INDUCTION (1)

Un barreau de fer doux, placé parallèlement à la direction de la force magnétique de la terre, s'aimante de telle sorte que ses pôles se tournent respectivement vers les pôles de la terre qui ont un magnétisme opposé, comme ceux d'une aiguille de boussole en équilibre stable.

Un morceau de fer, placé dans un champ magnétique, manifeste des propriétés magnétiques, qui s'affaiblissent ou disparaissent entièrement dès qu'on l'éloigne du champ. Quand les propriétés magnétiques du fer ne dépendent que de la force magnétique du champ, et qu'elles disparaissent lorsque le fer n'est plus dans le champ, on dit que c'est du « fer doux ». Le fer « doux », dans le sens magnétique, l'est aussi dans le sens littéral du mot : il se courbe facilement, conserve sa courbure et se brise difficilement.

Le fer qui garde ses propriétés magnétiques, quand on l'éloigne du champ magnétique, s'appelle du fer « dur ». Il ne s'aimante pas aussi facilement que le fer doux. Le fer « dur », dans le sens magnétique, se courbe plus difficilement et se brise plus facilement.

Le martelage, le laminage, le passage à la filière et le refroidissement brusque du fer tendent à le rendre dur ; le recuit tend à le rendre doux.

Les différences magnétiques, comme d'ailleurs les différences mécaniques, entre l'acier trempé dur et l'acier trempé doux, sont plus grandes que celles qui existent entre le fer dur et le fer doux. L'acier doux s'aimante et se désaimante presque aussi facilement que le fer, tandis que l'acier dur est la matière la plus propre à la confection des aimants permanents.

(1) Maxwel, *Electricity*, vol. II, chap. IV.

La fonte, quoique contenant plus de carbone que l'acier, garde moins l'aimantation.

#### AIMANTATION TEMPORAIRE ET AIMANTATION PERMANENTE

Tous les aimants sans exception sont influencés par l'action d'une force magnétique; aussi il convient de distinguer entre l'aimantation *permanente* et l'aimantation *temporaire*.

L'aimantation permanente est celle qui existe indépendamment de la force magnétique, l'aimantation temporaire est celle qui dépend de cette force.

Ou encore, l'aimantation temporaire est celle que possède le barreau tant qu'il reste sous l'influence de la force aimantante; et l'aimantation permanente, celle qu'il conserve quand la force aimantante a cessé d'agir.

#### AIMANTATION TEMPORAIRE

Quand un corps s'aimante en vertu de l'action d'une force magnétique, on dit qu'il s'aimante par induction. L'aimantation induite par une force aimantante donnée varie dans les différentes substances. Elle a sa plus grande valeur dans le fer le plus pur et le plus doux; dans ce fer, le rapport de l'intensité d'aimantation à la force magnétique atteint, d'après Thalén, la valeur 32 (1). D'autres substances, telles que le nickel et le cobalt, sont susceptibles d'un degré moindre d'aimantation, et toutes les substances soumises à une force magnétique suffisamment intense donnent des indications de polarité.

#### SUBSTANCES PARAMAGNÉTIQUES ET DIAMAGNÉTIQUES (2)

Lorsque l'aimantation s'effectue dans la même direction que la force magnétique (3), comme dans le fer, le nickel, le cobalt, etc.,

(1) Thalén, *Nova acta Reg. Soc. Sc.*, Upsal, 1863.

(2) Voy. chap. xxxi.

(3) Quand il s'agit d'un champ de force magnétique, l'expression nord magnétique indique la direction que prendrait le pôle nord d'une aiguille de boussole placée dans ce champ.

En parlant d'une ligne de force magnétique, on suppose toujours qu'elle est tracée du sud magnétique au nord magnétique: c'est ce que l'on appelle la direction positive.

De même, la direction de l'aimantation d'un aimant est indiquée par une ligne tirée du pôle sud de l'aimant au pôle nord, et le pôle de l'aimant qui vise le nord est appelé le pôle positif. On doit donc regarder comme positif le magnétisme du pôle de l'aimant qui se dirige vers le nord, c'est-à-dire le magnétisme austral.

la substance est appelée *paramagnétique* ou *ferro-magnétique*, ou simplement magnétique.

Lorsque l'aimantation induite est dans une direction opposée à celle de la force magnétique, comme dans le bismuth, etc., la substance est dite *diamagnétique*.

Dans toutes ces dernières substances, le rapport de l'intensité d'aimantation à la force magnétique qui la produit est extrêmement petit : pour le bismuth, qui est la substance la plus diamagnétique connue, ce rapport n'est que de  $-\frac{1}{4 \times 10^5}$ .

Dans les substances cristallisées et celles soumises à des tensions, la direction de l'aimantation ne coïncide pas toujours avec celle de la force qui la produit. Ces phénomènes seront étudiés plus tard (voy. chap. XXXI). Placés dans un champ de force magnétique, ces cristaux se dirigent eux-mêmes de telle sorte que l'axe, suivant lequel l'induction paramagnétique est la plus grande ou l'induction diamagnétique la plus petite, soit parallèle aux lignes de force magnétique.

COEFFICIENT D'AIMANTATION INDUITE

Dans le fer doux, la direction de l'aimantation coïncide avec celle de la force magnétique, et, pour de *petites valeurs* de la force magnétique, l'aimantation lui est sensiblement proportionnelle.

Il étant la force magnétique,  $\gamma$  l'intensité d'aimantation ou le moment magnétique rapporté à l'unité de volume, le rapport  $\frac{\gamma}{H}$  est le *coefficient d'aimantation induite*. En appelant K ce coefficient numérique, on a

$$\gamma = KH.$$

Comme  $\gamma$  est le rapport du moment  $ml$  au volume  $ls$ , on aura, dans un barreau de fer doux placé dans un champ magnétique H,

$$\frac{ml}{ls} = KH.$$

Alors le moment du barreau est

$$ml = KHls,$$

et le magnétisme induit

$$m = KHs.$$

Le coefficient K est positif pour le fer et pour les substances paramagnétiques, négatif pour le bismuth et les diamagnétiques. Il atteint la valeur 32 dans le fer ; il a aussi une certaine valeur dans le

nickel et le cobalt, mais dans toutes les autres substances il ne dépasse pas 0,00001.

Quant à la force magnétique  $H$ , elle provient partie de l'action d'aimants extérieurs au corps aimanté et partie de l'aimantation induite du corps lui-même, et il faut tenir compte de ces deux éléments dans la théorie mathématique.

La connaissance du coefficient  $K$  a une grande importance pratique puisqu'elle permet de déterminer l'aimantation que prend une substance donnée dans un champ magnétique connu : elle aurait son utilité notamment dans la construction des moteurs électro-magnétiques et des machines dynamo-électriques, où l'aimantation temporaire du fer joue un si grand rôle.

Mais  $K$  ne peut être regardé comme constant que pour de petites valeurs de l'intensité du champ ; au delà, il varie avec  $H$  : c'est une fonction de  $H$ , et on l'appelle souvent la *fonction magnétisante* (1).

Admettons que, pour le fer doux travaillé,  $K$  ait la valeur 32 donnée par Thalén. La relation  $m = KHs$  permet de calculer l'intensité de pôle que prendra un barreau de fer doux, de section  $s = 1$  centimètre carré, placé dans le champ magnétique de la terre, parallèlement à la composante horizontale ( $H = 0,19$ ), c'est-à-dire à l'aiguille de déclinaison. On a

$$m = 32 \times 0,19 = 6,08.$$

Ce pôle attirerait un pôle semblable situé à une distance de 1 millimètre avec une force

$$\frac{6,08 \times 6,08}{(0,1)^2} = 3700 \text{ dynes,}$$

ou

$$\frac{3700}{981} = 3,8 \text{ grammes.}$$

Le même barreau placé dans la direction de la force terrestre, c'est-à-dire parallèlement à la ligne d'inclinaison ( $H = 0,465$ ), prendrait une intensité de pôle

$$m = 32 \times 0,465 = 15.$$

Ces calculs supposent les barreaux très longs par rapport à leurs

(1) Les déterminations les plus récentes de  $K$  pour diverses substances et diverses valeurs de  $H$  sont celles du docteur Stoletow (*Phil. mag.*, 4<sup>e</sup> série, vol. XLV, 1873, p. 40), et de M. H. Rowland (*id.*, vol: XLVI, p. 140, 1873 et novembre 1874).



dimensions transversales : un barreau de 1 centimètre carré de section devrait avoir 5 à 6 mètres de long pour que les formules soient applicables.

LIMITE D'AIMANTATION

Quand l'intensité du champ croît, le coefficient K diminue, et l'aimantation, ou le produit KH, atteint une valeur limite qu'elle ne peut dépasser, si grande que soit l'intensité H.

Müller avait trouvé qu'en désignant par I la force magnétisante d'une hélice (produit de l'intensité du courant par le nombre de spires), par  $d$  le diamètre du noyau de fer doux et M le moment magnétique du noyau aimanté, on avait la relation

$$I = 220 d^{\frac{3}{2}} \operatorname{tang} \frac{M}{0,00005 d^2},$$

d'où

$$\frac{M}{0,00005 d^2} = \operatorname{arc} \operatorname{tang} \frac{I}{220 d^{\frac{3}{2}}}.$$

Si I est assez faible pour qu'on puisse remplacer l'arc par la tangente, on tire

$$M = \operatorname{const} \times I \sqrt{d},$$

c'est-à-dire le moment magnétique proportionnel à la force magnétisante et à la racine carrée du diamètre, loi déjà indiquée par Lenz et Jacobi.

Mais si la force I croît jusqu'à l'infini, la tangente devient infinie et l'arc égal à 90 degrés. Alors  $M = \operatorname{const} \times d^2$ , c'est-à-dire que le noyau atteint une limite de saturation proportionnelle au carré de son diamètre.

Des expériences ultérieures ont démontré que la formule de Müller ne conduisait pas à des résultats exacts.

Weber (1) a appliqué le calcul à sa théorie du magnétisme induit, et a indiqué la loi de variation du magnétisme temporaire. Il trouve que la force magnétisante variant de 0 à une valeur  $d$ , l'aimantation croît proportionnellement, et en portant sur un axe horizontal les valeurs de la force et sur les ordonnées correspondantes les valeurs de l'aimantation, la courbe de 0 à  $d$  est une ligne droite : au delà, c'est une courbe concave vers l'axe et ayant une asymptote horizontale

(1) Maxwell, *Electricity*, vol. II, ch. vi.  
GORDON. Electricité.

représentant le maximum d'aimantation. Pour la valeur  $d$  de la force aimantante, l'aimantation serait les  $\frac{2}{3}$  de la valeur limite.

Maxwell a refait le calcul en tenant compte du magnétisme résiduel ou permanent, qui subsiste quand la force aimantante a cessé d'agir et que Weber laisse de côté. Il trouve alors que la force aimantante croissant de 0 à une certaine valeur  $c$ ; la courbe du magnétisme temporaire est encore une ligne droite. La force continuant à croître, la courbe s'élève d'abord plus rapidement, présentant par suite une inflexion au point  $x = c$ ; elle est concave vers le bas, et à partir d'une valeur  $x = d$  elle se rapproche de l'asymptote horizontale représentant la limite d'aimantation.

La courbe de magnétisme permanent commence seulement quand  $x = c$ , croît toujours moins rapidement que l'intensité, et a une asymptote horizontale représentant un maximum de magnétisme permanent égal à 0,81 du maximum d'aimantation temporaire.

En représentant par 1000 l'aimantation limite, par 3 la valeur de  $c$  et par 5 celle de  $d$ , Maxwell obtient les résultats suivants :

Force aimantante.	Aimantation temporaire.	Aimantation permanente.
0	0	0
1	133	0
2	267	0
3	400	0
4	729	280
5	837	410
6	864	485
7	882	537
8	897	574
$\infty$	1000	810

M. H. Rowland, dans son mémoire déjà cité, établit les lois suivantes :

1° Tout le magnétisme ou presque tout le magnétisme développé par de faibles forces aimantantes est *temporaire* : avec l'*acier*, ce phénomène est plus apparent qu'avec le fer.

2° Le magnétisme *temporaire* augmente toujours avec l'intensité du courant. Quand celle-ci augmente indéfiniment, il tend vers une limite déterminée.

3° Le magnétisme *permanent* croît d'abord très vite avec le courant ; mais plus tard il diminue à mesure que le courant augmente, lorsque le fer est voisin de son maximum d'aimantation.

L'auteur appelle magnétisme *temporaire* celui qui disparaît par la cessation du courant, et magnétisme *total*, la somme de ce magnétisme et du magnétisme permanent; tandis que jusqu'ici nous avons appelé magnétisme temporaire tout le magnétisme qui se développe pendant que le fer est sous l'influence de la force aimantante, c'est-à-dire le magnétisme total. Mais la seconde loi subsiste quel que soit le sens attaché au mot temporaire.

Voici les principaux caractères des courbes données par M. Rowland. La courbe du magnétisme temporaire est sensiblement droite au début, où elle se confond avec la courbe du magnétisme total. La courbe du magnétisme permanent est convexe vers le bas dans la petite partie qui est voisine de l'origine et située entre l'axe et la partie droite de la courbe temporaire; puis elle coupe celle-ci et passe au-dessus d'elle en devenant concave vers l'axe, et faisant par suite une inflexion. La courbe du magnétisme total s'obtient en ajoutant les ordonnées des deux autres. Elle présente aussi une inflexion pour une valeur de  $x$  un peu supérieure à celle de l'inflexion de la courbe temporaire.

M. Rowland donne comme valeurs du maximum d'intensité d'aimantation :

	A. 12° C.	A. 220° C.
Fer et acier..	1390	1360
Nickel.....	494	380

On peut encore tirer la valeur de ce maximum, pour le fer, d'une expérience de Joule (1), d'après laquelle le maximum d'attraction entre un électro-aimant et son armature serait de 14 515 grammes par centimètre carré (200 livres par pouce carré). Le magnétisme étant alors tout entier à la surface, on peut appliquer la relation trouvée en électricité pour l'attraction de deux disques plans (voir page 268) :  $f$  étant cette attraction maxima,  $\gamma$  l'intensité d'aimantation (qui est ici le moment magnétique rapporté à l'unité de surface),  $S$  l'aire de la surface attirante,

$$f = 2\pi S\gamma^2 \quad (2),$$

on trouve  $\gamma = 1500$  environ.

(1) Jenkin, *Electricity and magnetism*, p. 123.

(2) Cette formule montre encore que l'attraction d'un électro-aimant ne dépend que du diamètre du noyau. La longueur du noyau n'a d'autre but que d'empêcher les pôles de contrarier leurs actions.

Si on fait  $S = 1$  centimètre carré,

$$f = 14\,515 \text{ grammes} = 14\,515 \times 981 \text{ dynes.}$$

Si  $K$  était constant, l'intensité du champ magnétique qui produirait le maximum d'aimantation serait donnée par

$$32 \times H = 1500,$$

d'où

$$H = 47.$$

Mais les expériences les plus favorables ne permettent pas de regarder  $K$  comme constant pour une aimantation supérieure au  $\frac{1}{4}$  de la valeur maxima, c'est-à-dire pour des valeurs de  $H$  supérieures à 12 (1). En admettant, d'après certaines expériences de Müller, que, dans le voisinage de la limite d'aimantation,  $K$  soit seulement le tiers de la valeur adoptée, 32, l'intensité du champ magnétique nécessaire pour obtenir ce maximum serait donnée par

$$\frac{1}{3} \times 32 \times H = 1500,$$

ou

$$H = 144,$$

environ 300 fois l'intensité totale du champ magnétique de la terre (0,465).

Gauss (2) s'est servi dans ses expériences de barreaux aimantés pesant 453<sup>gr</sup>,6 (1 livre anglaise), dont le moment était de 40087,7 unités C. G. S. En prenant 7,85 comme densité de l'acier, le volume du barreau en centimètres cubes =  $\frac{453,6}{7,85} = 57,78$ , et l'intensité d'aimantation =  $\frac{\text{moment}}{\text{volume}} = \frac{40\,088}{57,78} = 174,6$ .

Si l'on regarde la terre comme un corps uniformément aimanté, son intensité d'aimantation sera

$$\frac{\text{moment}}{\text{volume}} = \frac{8,55 \times 10^{23}}{1,083 \times 10^{27}} \times 0,079,$$

soit  $\frac{1}{2200}$  celle du barreau de Gauss. Alors 2,2 décimètres cubes de

(1) Les expériences du docteur Stoletow mettent cette limite bien plus bas.

(2) Docteur Everett, *Units and physical Constants*, p. 123.

la terre équivaldraient à 1 centimètre cube de l'acier de Gauss, si les effets du magnétisme terrestre étaient dus à l'aimantation uniforme de la substance de la terre.

## EXPÉRIENCES DE M. BOUTY

M. Bouty a publié dans les *Annales scientifiques de l'École normale supérieure* ses recherches sur l'aimantation temporaire et permanente d'aiguilles minces d'acier trempées plus ou moins fortement.

Pour l'aimantation permanente des aiguilles trempées dur, il mesure, par la méthode indiquée page 310, le moment magnétique représenté par la formule  $M = m(l - d)$ ,  $\frac{d}{2}$  étant la distance d'un pôle à l'extrémité voisine. En brisant les deux bouts de cette aiguille sur une certaine longueur, la section moyenne fournit une aiguille dont le moment est  $M' = m(l' - d)$ ,  $m$  et  $\frac{d}{2}$  étant les mêmes que pour l'aiguille mère. Mesurant  $M$ ,  $M'$ ,  $l$  et  $l'$ , les deux relations font connaître  $m$  et  $d$ , et en formant de nouvelles aiguilles de rupture on pourra avoir des vérifications.

L'intensité du courant était mesurée par l'action de la petite spirale magnétisante, dont l'axe est placé perpendiculairement au méridien magnétique, sur une petite aiguille aimantée, suspendue à distance, avec son centre sur le prolongement de l'axe de la spirale, ce qui constitue une boussole des tangentes.

La courbe des valeurs de  $m$  obtenues en faisant varier l'intensité du courant offre une grande analogie avec la courbe de M. Rowland pour le magnétisme permanent de l'acier Bessemer.

En répétant le passage de l'aiguille dans la spirale magnétisante, le moment magnétique est représenté par la formule

$$M = A - \frac{B}{n},$$

$n$  étant le nombre des passages. M. Bouty a pu, par sa méthode, rechercher si l'augmentation de  $M$  tenait à l'accroissement de  $m$  ou à une augmentation de  $d$ , c'est-à-dire à un simple déplacement des pôles vers l'extrémité. Il a trouvé que  $m$  et  $d$  changent à la fois, mais cette dernière quantité d'une manière peu sensible.

Pour mesurer les moments temporaires, on peut placer une petite aiguille aimantée et la spirale magnétisante, contenant l'aiguille que l'on aimante, dans la deuxième position des aimants de Gauss;

alors  $M$  et  $M'$  étant les moments des deux aiguilles, on a la relation

$$\text{tang } \theta = \frac{2 MM'}{HD^3} \quad (1).$$

On retranche de la valeur de  $\theta$  celle de la déviation produite par la spirale seule, avant l'introduction de l'aiguille, déviation qui mesure l'intensité du courant. La différence mesure le moment temporaire pour des aiguilles de même longueur. Comme la formule exige que  $D$  soit très grand et qu'alors les déviations sont très petites, il est utile de rendre l'aiguille suspendue presque astatique, c'est-à-dire indépendante de l'action de la terre, à l'aide d'un aimant compensateur convenablement placé.

M. Bouty admet que la distribution du magnétisme et la situation des pôles sont indépendantes de l'intensité du courant. Cependant, d'après M. Thomson (2), ce fait ne serait exact que pour des barreaux courts et épais.

M. Bouty a constaté que, dans l'aimantation temporaire et permanente d'aiguilles d'acier trempées dur, la fonction magnétisante, exprimée par le rapport de  $m$  au carré du diamètre, était constante pour une même valeur de l'intensité du courant, avec des aiguilles de diamètres différents.

Les courbes de magnétisme permanent et temporaire (total) présentent sensiblement les mêmes caractères que celles de Rowland. Les portions des deux courbes, comprises entre les ordonnées passant par le pied de la tangente au point d'inflexion et par le point où cette tangente coupe l'asymptote horizontale de chaque courbe, constituent les régions d'*aimantation rapide*, dont l'étendue et les ordonnées des deux courbes correspondant aux points extrêmes caractérisent, à défaut de courbes complètes, les qualités magnétiques de l'acier employé.

#### INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE

Quand un barreau a été aimanté à une certaine température, tout changement de température, dans un sens comme dans l'autre, produit une diminution de magnétisme qui disparaît plus ou moins par le retour à la température d'aimantation. Ce fait a été constaté par M. Dufour (3).

(1) Voir page 306, note 1.

(2) *Papers on Electricity and Magnetism*, p. 512.

(3) De la Rive, vol. III, p. 692.

Mais M. Wiedemann a trouvé que, si l'on fait subir au barreau un grand nombre de variations de température, la température à laquelle le barreau a été aimanté n'influe plus sur le sens de la variation de l'intensité magnétique. Enfin, quand un barreau a été aimanté à 100 degrés, puis chauffé et refroidi à plusieurs reprises, les variations de température influent moins sur son magnétisme que s'il a été aimanté à une température plus basse.

Pour les températures ordinaires, on peut admettre entre les nombres  $n_t$  et  $n_0$  d'oscillations faites par une aiguille aimantée aux températures  $t^\circ$  et 0, la relation

$$n_t = n_0 (1 - ct).$$

Cette formule, due à M. Kupfer, est employée pour ramener à la température de 0 les observations d'intensités magnétiques faites à des températures diverses. Mais il faut avoir la précaution d'aimanter l'aiguille à une température *supérieure* à celle à laquelle les observations seront faites, et de faire varier au préalable sa température un grand nombre de fois (de 20 à 30) entre la température d'aimantation et celle à laquelle les observations seront faites.

L'aimantation n'est complètement détruite par la chaleur que si on porte le barreau au rouge vif; mais une température beaucoup moindre suffit pour qu'il y ait une perte de magnétisme permanent: le magnétisme qui reste ensuite présente alors beaucoup plus de stabilité, il se perd moins facilement par la percussion, etc.

La proportion de magnétisme que les barreaux perdent et reprennent, quand on les échauffe et les refroidit, est moins grande pour les barreaux fortement trempés que pour les autres.

D'après M. Pouillet, l'acier, pendant qu'il est maintenu au rouge, n'est pas attiré par l'aimant.

M. Gaugain (1) a remarqué que si un barreau d'acier a été aimanté à une température de 400 à 500 degrés, et qu'on le laisse refroidir, il se trouve aimanté en sens inverse, quand il est revenu à la température ordinaire. Si on le chauffe de nouveau, ce magnétisme inverse, qui est toujours assez faible, disparaît, et on voit reparaître le magnétisme primitif. Ces interversions peuvent être reproduites un grand nombre de fois sur le même barreau, sans qu'il soit nécessaire de le réaimanter.

Réciproquement, un barreau aimanté à froid, que l'on porte à une température plus élevée, peut présenter à cette température une aimantation inverse de celle qu'il avait à froid. Ces phénomènes s'expli-

(1) Mémoire cité.

quent en supposant que les barreaux dont il s'agit renferment deux couches superposées de magnétismes contraires, qui sont différemment modifiées par les variations de température que l'on fait subir au barreau.

#### INFLUENCE DES ACTIONS MOLÉCULAIRES (1)

*Vibrations.* — Si, par la percussion ou autrement, on détermine des vibrations dans un aimant de fer dur, pendant qu'il est soumis à l'action de la force aimantante, il s'aimante plus facilement; mais ces actions mécaniques, exercées quand la force aimantante a cessé d'agir, diminuent le magnétisme permanent (2). Le magnétisme qui reste après cette diminution est très stable (3).

Wiedemann (4) a constaté le même phénomène pour l'acier. De plus, un barreau désaimanté par l'action d'un courant reprend, sous l'influence de la percussion, une partie de son magnétisme primitif, ou la perd davantage, suivant l'intensité de la désaimantation. Dans ces expériences, les barreaux sont disposés perpendiculairement au méridien magnétique, pour éliminer l'influence de la terre.

*Tension.* — Les expériences de Matteucci et Wertheim montrent qu'une tension exercée sur un barreau de fer dur, pendant qu'il subit l'action de la force aimantante, augmente son magnétisme temporaire. C'est le contraire pour le fer doux.

Le magnétisme permanent d'un barreau augmente par la tension et diminue par la compression. Il en résulte que si du fer aimanté dans une certaine direction subit ensuite une extension dans une autre direction, la direction de l'aimantation tend à se rapprocher de celle de l'extension. Par la compression, la direction de l'aimantation tend à devenir normale à la direction de la compression.

*Torsion.* — Nous résumons, d'après M. De la Rive (5), les expériences de Wertheim sur l'effet de la torsion. L'action mécanique de la torsion ou de la détorsion ne développe pas à elle seule le magnétisme; mais lorsqu'un barreau est placé sous une action magnétique, les torsions augmentent le magnétisme permanent.

Dès que le fer a atteint sa limite d'aimantation temporaire ou per-

(1) Comparez les effets de la température et des actions moléculaires sur l'aimantation, avec les effets analogues produits dans la charge résiduelle de la bouteille de Leyde (chap. x, p. 100).

(2) Matteucci, voir De la Rive, vol. I, p. 315.

(3) Gauguain, mémoire cité.

(4) De la Rive, *Pogg. ann.*, vol. C, p. 235.

(5) Wiedemann, *Traité d'Électricité*, vol. III, p. 687.



manente, toute torsion diminue son aimantation totale, et la détorsion correspondante la rétablit.

Quand le barreau une fois aimanté est soustrait à la force aimantante, les torsions ou détorsions diminuent son aimantation; mais l'aimantation qui subsiste encore, après est diminuée par les torsions et rétablie par les détorsions.

Plus le fer est dur, plus il faut de torsions pour lui faire prendre ou perdre son aimantation temporaire. Pour l'acier, les torsions accélèrent l'établissement de l'équilibre magnétique; mais une fois établi, il ne peut plus être dérangé par la seule torsion, sans l'aide d'une influence magnétique.

M. Wiedemann(1) a reconnu que si l'on tord de gauche à droite, pendant ou après le passage du courant, un fil vertical qu'un courant traverse de haut en bas, l'extrémité inférieure du fil prend une polarité nord.

#### EFFETS MOLÉCULAIRES DÉTERMINÉS PAR L'AIMANTATION

*Mouvements vibratoires* (2). — Page a observé, en 1837, qu'on approchant le pôle d'un fort aimant d'une spirale plate traversée par un courant, on produit un son. De la Rive (1843) remarqua que des tiges de fer rendaient un son très prononcé quand on les place dans l'intérieur d'une bobine traversée par un courant. En 1860, Reis appliqua ces phénomènes à la construction du premier *téléphone*. Le transmetteur était simplement une membrane tendue qui, vibrant quand on émettait des sons sur elle, fermait et ouvrait un circuit électrique. Le récepteur était une barre de fer doux entourée d'une hélice placée dans le circuit. Les deux instruments étaient placés sur une caisse d'harmonie pour amplifier les sons.

*Élasticité*. — Wertheim a trouvé que l'aimantation diminue le coefficient d'élasticité du fer doux et de l'acier; dans l'acier, la diminution est permanente.

Un barreau de fer doux encastré par une extrémité seulement, et qui fléchit par l'action de son poids ou d'un poids placé à son extrémité libre, se redresse avec l'hélice qui l'entoure, quand on fait passer un courant (Guillemin).

*Effet sur les dimensions d'un aimant*. — Joule (1842) a reconnu qu'un barreau de fer placé dans une hélice magnétisante s'allonge et que ses dimensions transversales se contractent; car, en introduisant le bar-

(1) Maxwell, *Electricity*, vol. II, p. 85.

(2) De la Rive, vol. II, p. 297.

reau dans un tube de verre plein d'eau, on vérifie que le volume du fer n'est pas augmenté par l'aimantation. — Un fil de fer tendu longitudinalement s'allonge par l'aimantation; il se raccourcit au contraire si la tension est très grande. Un fil d'acier dur, tendu, se raccourcit toujours par l'aimantation; mais l'altération n'est pas permanente et cesse avec la force aimantante : l'aimantation permanente de l'acier ne change donc pas sa longueur.

D'après Joule, l'allongement des fils de fer est à peu près proportionnel au carré de l'aimantation qu'ils possèdent, en sorte que le premier effet d'un courant de désaimantation est de raccourcir les fils. — L'effet de raccourcissement sur les fils soumis à une tension et sur l'acier varierait comme le produit de l'aimantation par le courant magnétisant.

*Torsion.* — Un fil d'acier tordu se détord par l'aimantation. Quand un fil vertical aimanté, avec son pôle nord en haut, est traversé de haut en bas par un courant, l'extrémité inférieure du fil, si elle est libre, se tord dans la direction des aiguilles d'une montre, c'est-à-dire de gauche à droite.

#### MAGNÉTISME ET TORSION (1)

Quand on tord un fil imparfaitement élastique par des forces croissantes, il n'éprouve d'abord qu'une torsion temporaire; mais bientôt il conserve d'une façon permanente une partie de la torsion qu'il a subie temporairement.

Les torsions se superposent dans un même fil comme les aimantations, et on peut superposer une torsion permanente et une torsion temporaire de sens contraire.

Pour détordre un fil, il suffit d'une force plus faible que celle qui l'a tordu, de même qu'on désaimante un aimant par un courant inverse plus faible que le courant direct qui l'a aimanté.

Dans son traité *Du galvanisme* (vol. II, p. 179 et 567), Wiedemann donne, sous forme de tableau comparatif, un exposé complet des relations qui existent entre les propriétés mécaniques et magnétiques des corps. « En étudiant en détail les effets de l'aimantation et ceux de la torsion, ainsi que leur influence réciproque, il montre que les idées d'élasticité et de plasticité, qui dérivent des expériences sur la torsion temporaire et permanente, s'appliquent également à l'aimantation

(1) Comparez avec les faits analogues signalés au chap. x, à propos de la bouteille de Leyde.

temporaire et permanente du fer et de l'acier. » (Maxwell, vol. II, p. 85.)

Dans un travail récent (1), Wiedemann a observé la torsion produite sur un fil de laiton, tordu sans secousse, au moyen d'une poulie chargée d'un poids : la torsion initiale croît jusqu'à une certaine valeur, puis s'arrête; on supprime alors le poids et on note la torsion résiduelle, qui diminue jusqu'à une certaine valeur représentant la torsion permanente. La différence entre la torsion maxima obtenue et la première torsion résiduelle, c'est-à-dire l'effet temporaire, est notée pour des poids différents, et on trouve que l'effet temporaire d'une même addition au poids initial va en croissant avec la valeur absolue de ce poids. Si on recommence l'expérience avec les poids croissants par ordre de grandeur, la torsion permanente acquise dans l'expérience précédente par l'effet du poids le plus grand se conserve sans altération, et la torsion temporaire reprend successivement la valeur qu'elle avait dans l'expérience précédente.

M. Bouty a signalé le même phénomène pour les moments magnétiques permanents ou temporaires, dans le cas d'aimantations successives. Il a appliqué la formule

$$M = A - \frac{B}{n},$$

qui exprime la valeur du moment magnétique après  $n$  passages de l'aiguille dans l'hélice magnétisante, aux expériences faites par M. Wiedemann sur la torsion initiale produite par l'action répétée d'un même poids, et a constaté un accord satisfaisant entre le calcul et les résultats de l'expérience.

#### EXPLICATION DE L'AIMANT DE GALILÉE

La possibilité d'obtenir dans un aimant la superposition de couches de magnétisme contraires permet d'expliquer un phénomène observé par Galilée dans un aimant naturel qui attirait de loin et repoussait de près un même pôle d'une aiguille aimantée. M. Jamin a réussi à reproduire cette particularité en dissolvant dans un acide un acier dans lequel il avait superposé des aimantations contraires. « Les couches inférieures ou australes ne sont pas découvertes partout en même temps; elles commencent à percer aux extrémités, surtout aux arêtes et aux coins, comme des sommets très aigus, très limités. Elles

(1) *Journal de physique*, vol. VIII, p. 349, 1879.

y ont une grande tension, mais leur moment magnétique est très petit, parce qu'elles occupent une très petite surface. En même temps règne une couche boréale non interrompue depuis l'extrémité jusqu'à la ligne moyenne; d'est le reste des couches supérieures que l'érosion n'a point enlevées. L'intensité est presque nulle à chaque point; mais la surface étant très grande, la quantité et le moment de ce magnétisme boréal sont considérables, plus considérables que la quantité et le moment des sommets austraux qui percent à l'extrémité même: d'où il suit que cette extrémité du barreau se tourne vers le sud, comme si ces sommets n'existaient pas.

» Approchons peu à peu le pôle austral d'un aimant ordinaire: tant qu'il sera loin, il subira l'effet prédominant des couches boréales, et sera attiré; mais si on l'approche contre l'extrémité même, il se trouvera à très petite distance des pointes australes qui occupent cette extrémité, leur effet l'emportera et il y aura répulsion.

» Ainsi: attraction à distance, répulsion au contact, c'est le cas de la pierre de Galilée; et, ce qui n'est pas moins curieux, on reconnaît entre ces barreaux et une aiguille ordinaire une répulsion au contact des extrémités qui se dirigent vers les pôles de nom contraire de la terre, et une attraction des extrémités qui se tournent du même côté. A une distance suffisante, le sens des actions est changé, et toute rentre dans l'ordre habituel. »

J. R.

## CHAPITRE XIII

### MAGNÉTISME TERRESTRE — NOTICE HISTORIQUE

---

#### INTRODUCTION

Si un aimant est placé en équilibre sur un pivot vertical, de façon qu'il puisse se mouvoir librement dans un plan horizontal, comme une aiguille de boussole, il prend une position déterminée. L'extrémité marquée se dirige vers le nord. Si l'on met un barreau d'acier exactement en équilibre sur un axe horizontal, et qu'on l'aimante, on trouve qu'il ne se maintient plus dans une position horizontale, mais que (dans l'hémisphère nord) l'extrémité marquée *s'incline*, l'inclinaison étant la moindre quand l'aiguille est dans la position qu'elle aurait prise si elle avait pu se mouvoir librement dans un plan horizontal.

La direction exacte de la force magnétique peut être mise en évidence d'un seul coup, en suspendant une aiguille à tricoter à un fil fin attaché en son milieu, de façon qu'avant l'aimantation elle reste en équilibre dans une position horizontale. Une fois aimantée, l'aiguille tourne jusqu'à ce que le bout marqué se dirige vers le nord et vers le sol (non pas verticalement, mais sous un certain angle) : là l'aiguille reste au repos.

En différents lieux, ou à différentes époques dans le même lieu, une telle aiguille ne prend pas toujours la même direction.

En général, elle n'indique pas le nord vrai.

L'angle que le bout marqué (1) fait avec un plan horizontal s'appelle l'« inclinaison ». L'angle que fait, avec une ligne allant du nord vrai au milieu de l'aiguille, la partie du plan vertical passant par l'aiguille qui en contient le bout marqué, est appelé « déclinaison ». Les marins appellent aussi cet angle la « variation ». Mais nous conserverons le nom de déclinaison, réservant celui de variation aux changements de l'angle (2).

Cet angle est évidemment celui que fait avec la direction du nord vrai l'aiguille d'une boussole ordinaire.

Ainsi, pour obtenir les relèvements vrais d'un objet d'après la boussole, il est nécessaire de tenir compte de la déclinaison (3) au lieu et au moment de l'observation, données que l'on trouve en se reportant à l'*Almanach nautique*. La déclinaison est actuellement à Greenwich de  $18^{\circ} 0'$ , c'est-à-dire que l'aiguille se dirige de  $18^{\circ}$  à l'ouest du nord vrai.

#### OBSERVATIONS ANCIENNES — DÉCLINAISON

On croit que la déclinaison fut observée pour la première fois, en Europe, par un certain Pierre Adziger (4), en 1269; il trouva qu'elle était alors de  $5^{\circ} E$ . Mais l'authen-

(1) On emploie le terme de *bout marqué* pour éviter l'ambiguïté des angles + ou —.

(2) On appelle « méridien magnétique » le plan vertical qui passe par la direction d'une aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité. La déclinaison est l'angle du méridien magnétique avec le méridien astronomique, et l'inclinaison, l'angle de l'aiguille aimantée avec un plan horizontal.

J. R.

(3) Quand on emploie une boussole marine de poche, avant de corriger de la déclinaison, il est bon de regarder sous la rose, ces instruments étant souvent corrigés de la déclinaison de Greenwich, au moyen d'un aimant fixé à  $18^{\circ}$  de la ligne N. S. de la rose, c'est-à-dire à peu près sur la ligne N. N. O. et S. S. E.

(4) *Terrestrial and cosmical Magnetism*, par E. Walker, M. A. (Prix Adams, 1865). Tout l'historique ancien de la déclinaison, contenu dans ce chapitre, est emprunté à cet ouvrage.

ticité de la lettre qui sert de fondement à cette revendication, est douteuse, et Humboldt considère que la première découverte sur ce sujet a été faite par Colomb, le 13 septembre 1482.

Que Colomb ait été ou non le premier à observer l'existence de la déclinaison, ce qui est certain, c'est qu'il est le premier Européen qui ait remarqué que la déclinaison est variable, et change aux différents lieux et à différentes époques. Ce fait était cependant connu des Chinois au commencement du douzième siècle.

Le premier ouvrage connu, à l'usage des marins, est celui de Boroughs, contrôleur de la marine sous la reine Élisabeth. Il a été publié en 1581, et réimprimé en 1585. Il est intitulé : *Discours sur la variation du compas ou de l'aiguille aimantée*, et il est dédié « aux voyageurs, hommes de mer et marins de l'Angleterre ».

Boroughs trouva que, le 16 octobre 1580, la déclinaison de l'aiguille à Limehouse était de  $11^{\circ} 18' E$ .

En 1622, les professeurs Gellibrand et Gunter résolurent de reprendre les observations de Boroughs à Limehouse ; ils trouvèrent que la déclinaison était seulement de  $6^{\circ} 15'$ , ce qui fit du tort à la réputation de Boroughs, que l'on croyait avoir commis une erreur de 50 pour 100.

En 1634, les deux professeurs, s'étant procuré des instruments nouveaux et perfectionnés, voulurent donner à la réputation de Boroughs une chance de se relever et recommencèrent leurs expériences. Ils ne trouvèrent plus pour la déclinaison que  $4^{\circ} 4' 49'' E$ .

Voici la conclusion du mémoire du professeur Gellibrand (1) :

(1) Walker, *ibid.*, p. 15.

« Il serait inutile, avec tant de preuves suffisantes, d'en chercher d'autres. Ainsi nous pouvons conclure que, pour cet intervalle de cinquante-quatre ans (qui sépare nos dernières observations de celles de M. Boroughs), il y a eu une diminution observée de 7° et plus. »

M. Walker continue :

« Depuis ce moment, le fait des variations séculaires de la déclinaison peut être regardé comme parfaitement établi ; la détermination de la grandeur et la recherche de la loi de ces variations devinrent une partie reconnue de toute étude magnétique.

« D'après les observations conservées, nous trouvons que la diminution de la déclinaison orientale, signalée par Gellibrand, a toujours continué : en 1660, ou vers cette époque, la déclinaison était nulle à Londres, c'est-à-dire que l'aiguille aimantée indiquait le nord et le sud vrais. Depuis lors, le bout marqué commença à dévier vers l'ouest, et cette déclinaison occidentale ne cessa de croître jusqu'à un maximum qu'elle atteignit vers l'année 1818, époque à laquelle sa valeur était de 24°30' O. Depuis lors elle décroît, c'est-à-dire que la variation séculaire marche maintenant vers l'est. »

#### L'INCLINAISON

L'*inclinaison* fut découverte par hasard, en 1576, par un certain Norman, constructeur d'instruments. Il publia un compte rendu de sa découverte dans un ouvrage qu'il intitula : *La nouvelle attraction*, et dont M. Walker a extrait le paragraphe suivant : « Ayant fait un grand nombre de boussoles de formes diverses, et ayant toujours

(1) Walker, *ibid*, p. 146.



eu l'habitude de les finir complètement avant d'aimer l'aiguille, j'ai continuellement trouvé, après avoir touché l'acier avec la pierre d'aimant, que la pointe nord s'incline ou s'abaisse au-dessous de l'horizon d'une certaine quantité ; à ce point que, la rose de la boussole étant d'abord de niveau, j'étais toujours obligé d'ajouter un morceau de fil de métal à la pointe sud, pour rétablir l'équilibre. Cet effet s'est souvent produit entre mes mains sans que j'y fisse attention, car j'ignorais l'existence d'aucune propriété de ce genre dans la pierre d'aimant, et n'avais jamais rien entendu ou lu à ce sujet. Finalement, il arriva que j'eus à mettre la main à un instrument pourvu d'une aiguille de six pouces de longueur. Après avoir poli cette aiguille, l'avoir coupée à la longueur exacte, et l'avoir mise en équilibre horizontalement sur son pivot, il ne me restait plus qu'à la toucher avec la pierre d'aimant. Lorsque je l'eus touchée, la pointe nord s'abassa de telle manière que je fus obligé d'en couper un morceau pour rétablir l'égalité : j'en abattis trop, et abîmai complètement cette aiguille qui m'avait coûté tant de peine. J'en fus assez irrité, et me mis à examiner plus complètement cet effet ; et ayant mis au courant de la chose certaines personnes instruites et expertes de mes amis, elles m'engagèrent à construire un instrument pour faire une expérience exacte et voir de combien s'inclinerait l'aiguille touchée avec l'aimant, ou quel serait le plus grand angle qu'elle ferait avec l'horizon.

» C'est pourquoi j'ai fait des vérifications soigneuses, de la façon qui est indiquée dans le chapitre suivant.

» Prenez une petite aiguille de fil d'acier de cinq à six pouces de long, la plus petite et la plus fine est la meilleure : au milieu, et en croix avec elle, fixez du mieux que vous pouvez une sorte de petit axe en fer ou en laiton d'en-

viron un pouce ; faites-en les extrémités bien aiguës, en sorte que l'aiguille soit suspendue de niveau et tourne à volonté. Préparez alors un instrument circulaire, comme un astrolabe, divisé exactement en 160 (?) parties, et dont le diamètre soit de la longueur de l'aiguille ou à peu près ; placez-le sur un pied de hauteur convenable, avec un fil à plomb pour le mettre perpendiculaire. Au centre de cet instrument, mettez un morceau de verre creusé ; en face du centre, sur une plaque de laiton fixée au pied de l'instrument, ajustez un autre morceau de verre de façon que les pointes de l'axe étant portées dans ces deux verres, l'aiguille joue librement, suivant la position de l'instrument. Il faut travailler l'aiguille avec assez de soin pour qu'elle puisse rester suspendue sur son axe, les deux bouts de niveau avec l'horizon, et que, lorsqu'on la déplace, elle reste fixe et en repos dans toute position où elle aura été amenée. Cela étant fait, touchez l'aiguille avec la pierre d'aimant, mettez l'instrument bien vertical au moyen du fil à plomb, et orientez son limbe nord-sud, de façon que l'aiguille soit bien placée suivant la variation à l'endroit où l'on opère. L'aiguille indiquerait elle-même cette variation en raison de sa vertu propre, si elle n'en était empêchée par l'axe. Alors vous verrez l'inclinaison de la pointe nord de l'aiguille aimantée : pour cette ville de Londres, je l'ai trouvée, par des observations exactes, de  $71^{\circ}50'$ . »

On trouva bientôt que l'inclinaison n'est pas la même en tout lieu ni en tout temps ; mais qu'elle est sujette à des variations, de même que la déclinaison.

#### L'ÉQUATEUR MAGNÉTIQUE.

D'une façon générale, l'aiguille est presque horizontale

à l'équateur : les points où elle est rigoureusement horizontale, forment une ligne courbe irrégulière voisine de l'équateur. Au nord de cette ligne, c'est le bout marqué qui s'incline ; au sud, c'est le bout non marqué. Cette ligne est appelée *l'équateur magnétique*. A mesure que l'on s'approche de l'un ou de l'autre pôle, l'aiguille est de plus en plus près d'être verticale, et, en certains points de chaque hémisphère, elle est exactement verticale.

#### L'INTENSITÉ.

L'intensité de la force magnétique terrestre varie aussi avec le temps et la localité.

Le premier essai d'observations systématiques fut fait par le gouvernement français, en 1785. L'expédition qu'il envoya se composait de deux frégates, *l'Astrolabe*, capitaine de Langle, et *la Boussole*, capitaine de la Pérouse, commandant en chef de l'expédition. On reçut des lettres de Botany-Bay, en 1788 ; depuis cette époque, on n'a plus eu de nouvelles de l'expédition. On suppose que les navires se sont perdus corps et biens.

M. Paul de Lamanon, qui accompagnait l'expédition, reconnut que la force est moindre aux tropiques que vers les pôles ; mais les premières observations systématiques furent celles que fit Humboldt pendant ses voyages en Amérique, de 1798 à 1803 (1).

(1) Walker, *Terrestrial and Cosmical Magnetism*, p. 183.

## CHAPITRE XIV

### MAGNÉTISME TERRESTRE. — MÉTHODES EXPÉRIMENTALES MODERNES (1,

Nous allons maintenant décrire les méthodes employées dans les observations modernes pour observer d'une manière continue et enregistrer les trois quantités suivantes :

Déclinaison,  
Inclinaison,  
Intensité.

Dans la pratique, il y a quatre quantités à déterminer, l'intensité de la force étant toujours décomposée suivant deux directions rectangulaires, et l'on observe :

L'intensité horizontale, et  
L'intensité verticale.

Mais des trois quantités, inclinaison, force horizontale, force verticale, il suffit d'en observer deux : celles-ci connues, on peut calculer la troisième. Dans les observations ordinaires, on observe l'inclinaison et la force horizontale, et l'on calcule la force verticale. Dans les observations où l'on emploie des appareils enregistreurs, on observe la force horizontale et la force verticale, et l'on calcule l'inclinaison.

(1) *Les Annaires de l'observatoire de Montsouris*, pour les années 1878 et 1879, contiennent une description détaillée des instruments et des méthodes en usage dans cet observatoire. J. R.

## INSTRUMENTS

LE MAGNÉTOMÈTRE UNIFILAIRE, MODÈLE DE KEW  
(Pl. XII et XIII)

Cet instrument sert :

A mesurer la force horizontale absolue,  
Par des observations de déviation,  
Par des observations d'oscillation ;  
Et à mesurer la déclinaison, c'est-à-dire l'angle du méridien astronomique et de la direction de la force magnétique terrestre.

## DÉTERMINATION DE LA FORCE HORIZONTALE

La planche XII montre l'instrument disposé pour des observations de déviation, la planche XIII pour des observations d'oscillation.

Nous allons décrire immédiatement les méthodes expérimentales servant à déterminer exactement la durée des oscillations et à observer les déviations ; mais nous allons montrer d'abord comment on peut déterminer la valeur de la force horizontale, en combinant les observations de déviation et d'oscillation.

*Expériences d'oscillation.* — On peut démontrer que si un aimant suspendu ou monté sur un pivot oscille dans un plan horizontal sous l'influence de la force terrestre, le produit de la force horizontale terrestre par le moment magnétique de l'aimant est inversement proportionnel au carré de la durée d'une oscillation. Le moment magnétique d'un aimant est, comme on sait, le produit de sa longueur par l'intensité de ses pôles.

*Expériences de déviation.* — Si un aimant suspendu est dévié par un autre aimant, la grandeur de la déviation

dépend du *rapport* de la force horizontale terrestre au moment de l'aimant qui cause la déviation.

Dans les observations que nous allons décrire, on se sert du même aimant pour exécuter les oscillations et pour produire la déviation.

Soient  $H$  la force horizontale,  $M$  le moment magnétique de l'aimant  $K$ , qui sert à la fois d'aimant déviant et d'aimant oscillant. Ce sont des quantités inconnues à déterminer. Par les observations de déviation nous pouvons calculer le rapport de  $H$  à  $M$ , c'est-à-dire que si nous posons

$$\frac{H}{M} = A,$$

$A$  est une quantité connue.

Par les observations d'oscillation nous connaissons le produit de  $H$  et  $M$ , et si nous posons

$$HM = B,$$

$B$  est une quantité connue.

Mais si  $A$  et  $B$  sont connus, leur produit  $AB$  est aussi connu. Nous avons donc :

$$HM \cdot \frac{H}{M} = AB,$$

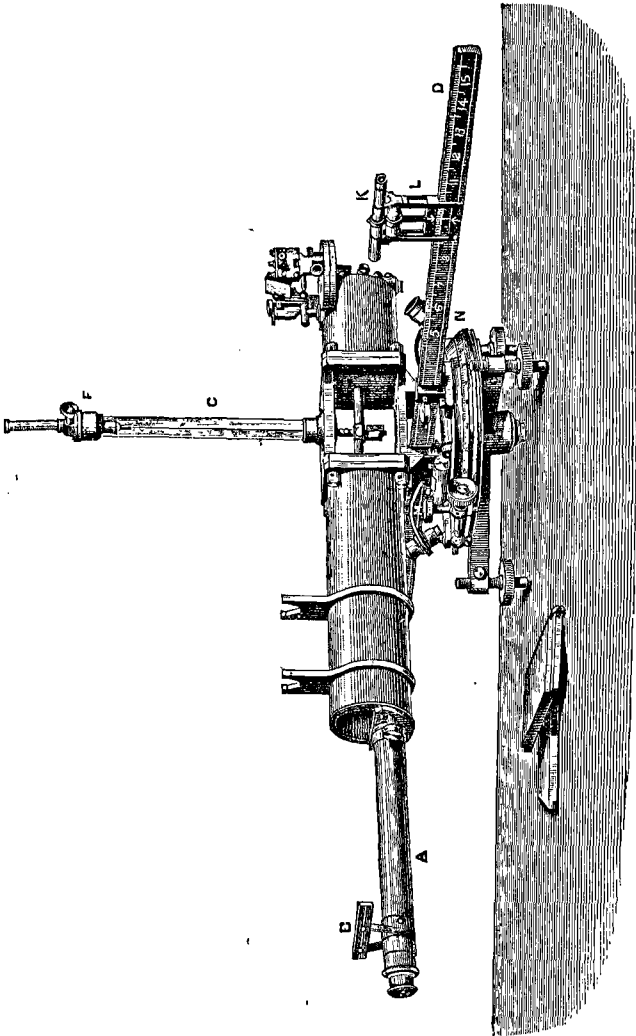
quantité connue.

Réduisant, nous avons

$$H^2 = AB \quad \text{ou} \quad H = \sqrt{AB},$$

c'est-à-dire que la composante horizontale du magnétisme terrestre est égale à la racine carrée du produit des deux quantités déterminées par les observations de déviation et d'oscillation.





Pl. XII. — Magnéto-mètre unifilaire de Kew, disposé pour les observations de déviation.



De même, si nous voulons déterminer  $M$ , nous avons

$$\frac{HM}{\frac{H}{M}} = \frac{B}{A} = M^2,$$

ou

$$M = \sqrt{\frac{B}{A}}.$$

Quand nous connaissons  $M$ , nous pouvons déterminer  $H$  à différentes époques et en différents lieux par de simples observations de déviation. Il suffit de faire l'expérience d'oscillation au début d'une étude. Cependant il est préférable de la répéter toutes les fois qu'il se présente une occasion favorable, de façon à se garantir des erreurs que pourrait introduire un changement accidentel dans l'intensité de l'aimant.

#### OBSERVATIONS DE DÉVIATION.

La planche XII montre l'instrument disposé pour observer la déviation.

Quand il est en service, l'instrument est porté sur un trépied semblable à ceux des photographes : trois rainures en forme de V, disposées suivant des rayons, reçoivent les vis calantes qui forment le pied de l'instrument. L'aimant est suspendu par un faisceau de fils de soie de cocon C à une tête de torsion et à une crémaillère F, au moyen de laquelle on peut l'élever ou l'abaisser.

Avant de suspendre l'aimant, on attache aux fils de soie, pendant un temps considérable, une masse circulaire de laiton (E, pl. XIII) de même poids que l'aimant, et on la laisse tourner sur elle-même sous l'influence de la torsion, jusqu'à ce que cette torsion ait entièrement disparu. La masse est alors enlevée de son étrier et remplacée par l'aimant :

pendant cette opération, on a soin de tenir l'étrier pour l'empêcher de tourner et d'introduire une nouvelle torsion (1).

Une règle de laiton graduée, D, porte sur un chariot L l'aimant déviant K. Avant de mettre K en place, on observe l'azimut de l'aimant suspendu. K produit une déviation. L'intensité de K est constante et connue; elle agit contrairement à la force horizontale de la terre, qui est variable. La grandeur de la déviation est donc une mesure de la force horizontale de la terre : quand cette force est grande, la déviation est petite; quand elle est petite, la déviation est grande.

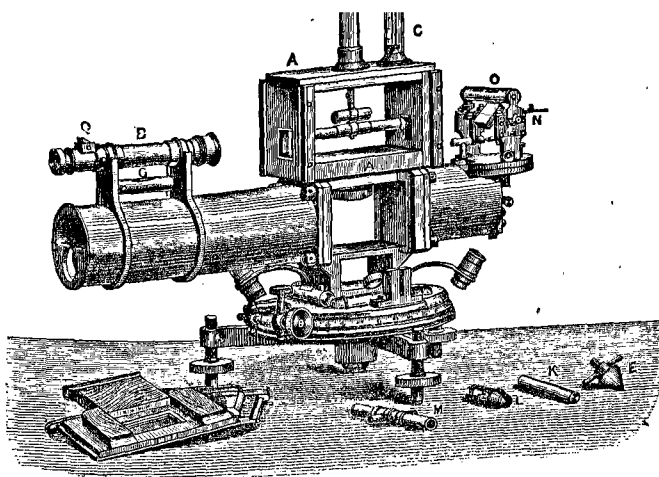
La grandeur de la déviation se mesure au moyen d'une modification de la méthode du miroir déjà décrite (2).

Cette modification consiste à substituer au miroir concave un miroir plan, et à la lampe une lunette A, à laquelle est fixée l'échelle B. En regardant dans la lunette, on voit par réflexion dans le miroir une partie de l'échelle B. Si l'aimant est dévié, le miroir tourne avec lui, et une autre partie de l'échelle apparaît dans le champ de la lunette. L'oculaire de la lunette est muni d'un réticule vertical, qui permet de mesurer exactement la déviation; en effet, la différence des deux lectures des divisions de l'échelle, qui passent sur le réticule, donne le nombre des divisions

(1) Pour rendre la torsion des fibres de soie aussi faible que possible, les fils de cocon, d'abord traités par l'eau de savon bouillante, sont ensuite tendus parallèlement chacun par un poids distinct, puis reliés en un seul faisceau en leur conservant leur parallélisme. Le tout est finalement enduit de suif. Les fils ainsi préparés et chargés de leur équipage, dans lequel l'aimant est remplacé par une masse de cuivre de même poids, mettent encore un certain temps à prendre leur équilibre définitif. Lorsqu'ils sont arrivés à l'état stable, on remet le barreau aimanté dans sa monture. (*Annuaire de Montsouris.*)

J. R.

(2) Voy. I<sup>re</sup> partie, p. 58.



Pl. XIII. — Magnétomètre unifilaire de Kew, disposé pour les observations d'oscillation.



de l'échelle correspondant à la déviation de l'aiguille qui a eu lieu dans l'intervalle des deux lectures.

*Détails sur l'usage de l'instrument.* — On le met d'abord exactement de niveau; enlevant alors l'aimant déviant, on fait tourner tout l'appareil autour d'un axe vertical (dont on voit l'extrémité sous la base de l'instrument), jusqu'à ce que le milieu de l'échelle forme son image réfléchie sur le réticule en A. On s'assure ainsi que la ligne D est perpendiculaire à la direction de l'aimant. On fixe alors l'appareil au moyen de la vis verticale M et, s'il est nécessaire, on parfait le réglage au moyen de la vis tangente horizontale placée en dessous de M. On place ensuite l'aimant K sur son chariot L, et on le fait glisser jusqu'à une distance déterminée de l'aimant suspendu.

On lit alors la déviation.

Puis, l'aimant K est placé à une distance égale de l'autre côté de l'aimant suspendu, et l'on observe la déviation en sens inverse de la première. On élimine ainsi toute inexactitude dans le premier réglage de l'appareil; car une inexactitude de ce genre diminuerait la seconde lecture d'autant qu'elle aurait augmenté la première, et *vice versa*. Si le temps le permet, on fait plusieurs paires d'observations à des distances différentes.

On fait aussi des observations avec l'aimant déviant K dans la même position, mais retourné bout pour bout.

De ces observations, on déduit par une méthode mathématique le rapport de la force magnétique de l'aimant K à la force horizontale de la terre.

Dans toutes les observations, on met des écrans de bois pour protéger l'aimant contre les courants d'air.

L'intensité de l'aimant déviant K décroît à mesure que la température s'élève. Il faut donc observer la tempéra-

ture, calculer la correction et ramener toutes les observations à une température uniforme.

L'intensité de l'aimant suspendu n'intervient pas dans le calcul, car tout changement dans cette intensité affecte également l'attraction de la terre et celle de l'aimant déviant (1).

#### OBSERVATIONS D'OSCILLATION (2).

On *peut* se servir de la disposition de la planche XII, l'aimant déviant étant suspendu à la place de l'aimant suspendu employé dans l'expérience précédente. En marquant au zéro de l'échelle un point facile à distinguer, la durée d'une demi-oscillation est l'intervalle entre deux passages consécutifs, au réticule de la lunette, de l'image du point vu par réflexion dans le miroir.

Cette méthode est souvent employée pour déterminer des durées d'oscillation avec d'autres espèces d'instruments. Avec le magnétomètre de Kew, on préfère observer les oscillations en modifiant la disposition précédente, ainsi que le montre la planche XIII.

A cet effet, la lunette, l'échelle, la règle de déviation et l'appareil de torsion sont enlevés, et une autre lunette B, un appareil de torsion DPH et une boîte à aimant A leur sont substitués, ainsi que le montre la planche XIII.

L'aimant suspendu est le même que celui désigné par K sur la planche XII, et qui servait alors à produire la déviation. Il est formé d'un tube d'acier aimanté (fig. 61) dont l'un des bouts est muni d'une glace plane, sur laquelle on a photographié une petite graduation, et l'autre bout

(1) III<sup>e</sup> partie, chap. XIX.

(2) Voy. Maxwell, *Electricity*, art. 456, vol. II, p. 102; et *Admiralty Manual Instructions for Magnetic Surveys*, p. 19.

est une lentille de collimateur, c'est-à-dire une lentille telle que les rayons divergents, partis de l'échelle placée au bout du tube, soient rendus parallèles en tombant sur la lentille.

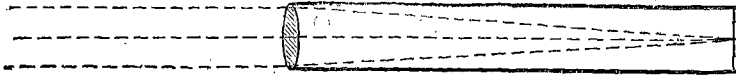


FIG. 61.

On tourne le cercle jusqu'à ce que le réticule de la lunette B passe par la division du milieu de cette échelle, quand on la regarde avec la lunette à travers l'aimant.

L'aimant étant mis en vibration, on détermine grossièrement et par une simple observation la durée approchée d'une demi-oscillation. Par durée d'une oscillation complète, on entend l'intervalle compris entre deux passages successifs, *dans la même direction*, du point zéro devant le réticule. Par durée d'une demi-oscillation; on entend l'intervalle de deux passages consécutifs, ces passages se faisant naturellement dans des directions opposées. Dans quelques livres français cette dernière durée, que l'on appelle en Angleterre une demi-oscillation, est désignée comme une oscillation.

La durée d'une demi-oscillation sera, avec les aimants dont on dispose d'habitude, de 2 à 4 secondes.

Une horloge, battant la seconde, est placée de façon que l'on puisse la voir et entendre les battements; l'observateur dit à haute voix le temps qu'indique l'horloge au moment où il la quitte des yeux : ce temps est noté par un aide. L'observateur continue de compter à l'oreille depuis l'instant où il a cessé de regarder l'horloge et, observant à travers la lunette, il note entre quels battements le centre de l'échelle passe au réticule. Les fractions de seconde se

déterminent à l'estime par l'observation de l'échelle. Si, par exemple, au battement qui précède le passage, le réticule est sur la cinquième division à gauche du zéro et si, au battement qui suit le passage, il est sur la vingtième à droite du zéro, on saura que le passage a eu lieu  $5/25$  ou  $1/5$  de seconde après le premier battement.

L'observateur doit choisir un nombre de demi-oscillations impair et tel que l'intervalle soit de douze à vingt secondes, afin d'avoir le temps de regarder l'horloge et prendre un nouveau point de départ en comptant à l'oreille. Le nombre de demi-oscillations choisi doit être impair, afin que l'on puisse observer alternativement des passages vers la droite et vers la gauche.

Supposons, par exemple, que l'on ait résolu d'observer tous les septièmes passages. Il n'est pas nécessaire de compter tous les septièmes passages; mais, connaissant la durée approchée d'une oscillation, on inscrit et l'on place en vue devant l'observateur le temps, onze par exemple, vers lequel on doit attendre les septièmes passages, en partant d'une minute paire. Ce n'est là qu'une façon commode de s'assurer que dans chaque cas on lira bien le vrai passage.

Alors l'observateur attend qu'un passage se produise à une minute paire ou dans son voisinage, et commence à observer alternativement les passages dans les deux directions: ils se produisent, à très peu près, aux temps marqués sur la liste qu'il a devant lui.

Pour la commodité de l'écriture, on marque + les passages dans une direction choisie arbitrairement, et — ceux dans le sens inverse. Ils sont annoncés à haute voix et inscrits par un aide sur deux colonnes, les passages + d'un côté; les passages — de l'autre.

Pour une raison que l'on comprendra tout de suite, la série



doit finir par un passage de même signe que celui par lequel elle a commencé, en sorte que si l'on a commencé, par exemple, par un passage +, et si l'on a pris cinq passages —, il y aura six passages +. Supposons maintenant qu'il y ait six lectures + et cinq lectures —, la moyenne des lectures — sera évidemment égale à la lecture du milieu. En ayant cinq lectures, on se propose d'assurer une plus grande exactitude. La moyenne des cinq lectures négatives est inscrite sous le titre :

« Temps du passage moyen négatif du milieu, d'après les observations —, *h. m. s.* »

Mais la moyenne des six observations + doit aussi donner le temps du passage *négatif* du milieu, car si l'on groupe par deux les observations de façon à avoir 1 et 6, 2 et 5, 3 et 4, la première de chaque groupe précède le passage du milieu du même temps que la seconde le suit. Cette moyenne est inscrite sous le titre :

« Temps du passage moyen négatif du milieu, d'après les observations +, *h. m. s.* »

L'accord de ces deux moyennes est une preuve de la bonté des observations. Leur moyenne est inscrite sous le titre :

« Temps vrai du passage négatif du milieu, *h. m. s.* »

L'aimant est alors abandonné à lui-même pendant une période de deux à trois cents demi-oscillations et l'on détermine une seconde fois un « temps vrai du passage négatif du milieu » au moyen de onze observations, six positives, cinq négatives, exactement comme dans la première série. L'intervalle des deux passages négatifs du milieu est déterminé par soustraction et inscrit sous le titre :

« Intervalle entre les passages négatifs moyens du milieu pour la série I et la série II; *m. s.* »

La durée d'une demi-oscillation est encore une fois déterminée en prenant la moyenne de plusieurs intervalles, pris au hasard dans les deux séries ou, mieux encore, déduits des observations dans lesquelles l'observateur a le plus de confiance. Cette durée est inscrite :

« Durée d'une demi oscillation, deuxième approximation, secondes. »

Or, il est évident qu'il y a eu nécessairement un *nombre entier pair* de passages entre les passages négatifs du milieu des séries I et II.

L'intervalle de ces passages étant divisé par la durée d'une demi-oscillation (deuxième approximation), le nombre entier pair le plus voisin du quotient est le nombre de demi-oscillations exécutées entre les passages négatifs moyens du milieu dans les séries I et II. Cet intervalle étant divisé par ce nombre entier pair, le quotient est la troisième approximation de la durée d'une demi-oscillation et on l'inscrit sous le titre :

« Durée effective vraie d'une demi-oscillation = secondes (1) ».

Mais ceci n'est pas encore tout à fait ce qu'il nous faut ; ce que nous voulons, ce n'est pas la durée effective d'une oscillation, mais la durée qu'elle aurait si toutes les causes perturbatrices étaient écartées et si l'aimant était à la température étalon (2).

La température doit être observée au commencement et à la fin de chaque série : sur la planche XIII, on voit un thermomètre C fixé à la boîte à aimant.

(1) Pour être exact, au lieu de « secondes » lire « battements de l'horloge ».

(2) Le degré de température pris pour étalon importe peu, pourvu que cette température reste la même pendant toute la série des observations.

## CORRECTIONS

Dans les expériences d'oscillation, une correction doit être appliquée pour :

*La marche de l'horloge.* Si l'horloge avance ou retarde, les battements ne sont plus exactement des secondes;  $s$  étant le nombre des secondes d'avance ou de retard par jour, la correction à appliquer est :

$$\text{Temps vrai} = \text{temps observé} \times \frac{86400 - s}{86400}$$

où  $s$  est positif pour l'avance et négatif pour le retard. 86400 est le nombre de secondes dans un jour.

Dans les expériences de déviation, il y a des corrections à faire pour :

La dilatation et les erreurs de graduation de la règle D;

La distribution du magnétisme sur l'aimant suspendu et sur celui qui produit la déviation;

L'altération de cette distribution par l'induction mutuelle des aimants;

La variation de la distance et de la direction avec l'angle de déviation.

Dans les deux genres d'observations, il y a des corrections à faire pour :

*La température.* L'effet de la température sur le moment magnétique de l'aimant est déterminé par des observations séparées, où l'on note la diminution du moment pour chaque degré dont s'élève la température. La correction n'est pas constante pour toutes les températures. Voici une formule que l'expérience a reconnue à peu près exacte :

Si  $t$  est la température observée,  $t_0$  la température adoptée comme température étalon :

Moment magnétique à  $t'$  = (mom. magn. à  $t_0$ ) [ $q(t_0 - t) + q'(t_0 - t)^2$ ],

où  $q$  et  $q'$  sont des nombres constants pour un même aimant, mais variables pour des aimants différents. Tous deux doivent être déterminés séparément par expérience pour chaque aimant.

Toute *diminution* du moment magnétique cause un *accroissement* correspondant du *carré* de la durée des oscillations. La correction précédente doit donc s'appliquer en sens inverse au carré de la durée des oscillations.

*La torsion.* La force de torsion du fil de suspension diminue la durée des oscillations : il y a une correction à faire de ce chef.

Tournons la tête de torsion de  $90^\circ$  successivement dans les deux directions, et appelons  $u$  la moyenne des déviations produites.

La force magnétique directrice est  $HM$  et, si  $T$  est la force de torsion, le rapport de la force de torsion à la force magnétique est :

$$\frac{T}{HM} = \frac{u}{90^\circ - u},$$

$u$  étant égal à l'angle dont est dévié l'aimant par une torsion de  $90^\circ$  appliquée au fil.

Il y a aussi une correction à introduire pour le moment d'inertie et l'arc d'oscillation de l'aimant.

#### SPÉCIMEN D'OBSERVATIONS

Comme spécimen de ce genre d'observations, l'auteur reproduit ici quelques extraits détaillés de la comparaison de la force magnétique à son laboratoire et à Kew (1).

On a fait osciller le même aimant à Kew, et au laboratoire de l'auteur, à Pixholme, Dorking.

(1) *Phil. Trans.*, 1877, p. 22.

Quelques expériences préliminaires avaient donné pour la durée d'une demi-oscillation à Pixholme : 3,693 secondes. On a pris cinq séries doubles d'observations.

Voici les détails des deux parties de la 1<sup>re</sup> série. On observait les passages de sept en sept :

## PREMIÈRE PARTIE.

23 avril 1876 (après midi). — Température moyenne 13°,9 C.

Passages dans la direction (+).			Passages dans la direction (-).		
he.	min.	sec.	he.	min.	sec.
6	22	3 $\frac{1}{2}$	6	22	29
6	22	55	6	23	20 $\frac{1}{2}$
6	23	46 $\frac{1}{2}$	6	24	12 $\frac{1}{2}$
6	24	38 $\frac{1}{4}$	6	25	4
6	25	30	6	25	56
6	26	21 $\frac{1}{2}$			
Moyenne 6	24	12,458	6	24	12,400

Temps du passage négatif du milieu.

	he.	min.	sec.
D'après les observations (+).....	6	24	12,458
D'après les observations (-).....	6	24	12,400
Moyenne.....	6	24	12,429

## DEUXIÈME PARTIE.

Passages dans la direction (+).			Passages dans la direction (-).		
he.	min.	sec.	he.	min.	sec.
6	39	2	6	39	28
6	39	53 $\frac{1}{2}$	6	40	19 $\frac{1}{2}$
6	40	45 $\frac{1}{4}$	6	41	11 $\frac{1}{8}$
6	41	37	6	42	3
6	42	28 $\frac{1}{2}$	6	42	54 $\frac{1}{2}$
6	43	20 $\frac{1}{4}$			
Moyenne 6	41	11,83	6	41	11,26

Temps du passage négatif du milieu.

	he.	min.	sec.
D'après les observations (+).....	6	41	11,83
D'après les observations (-).....	6	41	11,26
Moyenne.....	6	41	11,545

Intervalle entre le passage négatif moyen I  
et le passage négatif moyen II :

16 min. 59,251 sec. = 1019,251 sec.

Si nous divisons ce nombre par 3,693, durée approchée d'une demi-oscillation, le nombre entier pair, le plus voisin du quotient, sera le nombre de passages effectués dans ce temps. En divisant par 3,693, nous obtenons le quotient 275,99, ce qui donne, pour ce temps, 276 demi-oscillations.

Divisant 1019,25 secondes par 276, on obtient pour la durée (non corrigée) d'une demi-oscillation : 3,6929 secondes.

Cette série et les quatre autres, les corrections faites, donnaient la durée d'oscillation à Pixholme à certaines dates. Les durées d'oscillation à Kew étaient déterminées à d'autres dates. D'autre part, les indications enregistrées par le magnétomètre bifilaire font connaître le rapport des forces magnétiques à Kew, aux dates des observations de Pixholme et de celles de Kew (1).

Admettons que le rapport des forces magnétiques à Pixholme et à Kew, au même instant, soit constant, nous avons alors :

$$\begin{aligned} & \text{Rapport à un moment quelconque de } \frac{\text{Force horizontale à Pixholme}}{\text{Force horizontale à Kew}} \\ &= \frac{1}{\text{carré de la durée d'oscillation à P}} \left\{ \begin{array}{l} \text{carré de la durée au moment des oscillations à K} \\ \text{d'oscillation à K} \end{array} \frac{\text{Force horizontale à K}}{\text{Force horizontale à K au moment des oscillations à P}} \right\} \\ &= \frac{(\text{Durée d'oscillation à K})^2}{(\text{Durée d'oscillation à P})^2} \cdot \frac{\text{Force hor. à K au moment des osc. à K}}{\text{Force hor. à K au moment des osc. à P}} \end{aligned}$$

On voit que si l'on pouvait faire osciller le même aimant

(1) Chap. xv

au même instant à Kew et à Pixholme, le rapport serait exprimé par le premier terme seulement de ce produit.

Un aimant de la dimension usuelle oscille environ une heure, entre les moments où les amplitudes des oscillations sont trop grandes et trop petites pour qu'on les observe.

OBSERVATION DE LA DÉCLINAISON AU MOYEN  
DU MAGNÉTOMÈTRE UNIFILAIRE

Pour déterminer la déclinaison, c'est-à-dire l'angle du méridien astronomique et du méridien magnétique d'un lieu à un moment donné, on emploie la même disposition que pour observer les oscillations (pl. XIII). N est un petit miroir plan, appelé le miroir des passages; on y voit par réflexion le soleil à travers la lunette.

« Trois réglages sont nécessaires pour le miroir des passages (1) :

» 1° L'axe auquel est fixé le miroir doit être horizontal. Ce réglage se fait au moyen d'un niveau placé à cheval sur cet axe.

» 2° Le miroir doit être parallèle à l'axe géométrique de l'axe cylindrique auquel il est fixé. Ce réglage se fait de la manière suivante, au moyen d'une vis placée au dos du miroir : Tournez le cercle de façon que l'on puisse voir par réflexion dans la lunette un objet quelconque bien défini et suffisamment élevé; divisez cet objet en deux moitiés par le réticule; puis renversez l'axe du miroir bout pour bout, et observez si l'objet est toujours coupé en son milieu par le réticule; s'il ne l'est plus, changez l'inclinaison du miroir au moyen de la vis de réglage jusqu'à réduire à moitié la distance du milieu de l'objet au fil. Renversez

(1) *Admiralty Instructions for Magnetic Surveys* (Instructions de l'Amirauté pour les observations magnétiques, p. 24).

l'axe de nouveau, et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'objet demeure coupé en deux moitiés avant et après le renversement de l'axe.

» 3° La ligne de collimation de la lunette doit être perpendiculaire à l'axe. Les deux premiers réglages étant faits, on obtient celui-ci de la manière suivante : suspendez un fil à plomb d'une certaine longueur dans un endroit abrité ou, si c'est possible, dans une maison [le poids plongeant dans de l'eau, pour amortir les oscillations]. Tournez le cercle jusqu'à ce que le réticule divise en deux moitiés le fil à plomb, quand on regarde directement ; faites la lecture du cercle et tournez-le de 180° exactement. Observez alors si la partie supérieure du fil à plomb, réfléchie dans la lunette, coïncide avec le réticule ; s'il n'en est pas ainsi, il faut agir sur la vis de réglage jusqu'à ce que la coïncidence soit obtenue. Pour cette opération, il est nécessaire d'enlever la boîte à aimant et le tube de suspension. Lorsque ce réglage est terminé, on arrête les vis de réglage aussi invariablement que possible.

» Dans les instruments les plus récents, la lunette est pourvue d'un oculaire collimateur, au moyen duquel on voit l'image par réflexion du réticule, quand le plan du miroir des passages est vertical. En réglant convenablement les vis, le deuxième et le troisième réglage peuvent s'effectuer en amenant le réticule, vu directement, à coïncider avec son image vue par réflexion, avant et après le renversement de l'axe du miroir des passages. De cette façon, on peut vérifier rapidement ces deux réglages avant chaque observation. »



## DÉTERMINATION DU MÉRIDIEN ASTRONOMIQUE

Quand on emploie l'instrument, il faut :

Soulever l'aimant au moyen de la crémaillère, de façon que, de la lunette, on puisse voir le miroir des passages à travers les fenêtres de glace placées au bout de la boîte.

Alors, on fait tourner toute la partie supérieure de l'instrument « en azimuth » (c'est-à-dire autour de l'axe vertical), et le miroir des passages en hauteur (c'est-à-dire autour de son axe horizontal), jusqu'à ce que l'on voie le soleil dans la lunette à côté et à l'est du réticule. On fixe alors le cercle, et l'on note au chronomètre le moment où chaque bord du soleil passe au réticule. On lit les verniers au moyen des microscopes. Puis, pour éliminer toute erreur dans le réglage du miroir des passages, on le renverse sur ses supports, et l'on recommence les observations du soleil en notant le temps.

De ces observations et de la connaissance de l'heure du lieu, de la latitude et de la longitude approchée, on peut déduire, par la trigonométrie, la direction du méridien astronomique (1).

(1) Formule de calcul :

Soient  $a$  la distance polaire du soleil à l'instant de l'observation;

$b$  la co-latitude du lieu;

$C$  l'angle horaire du soleil à l'instant de l'observation;

$A$  l'azimuth du soleil à partir du sud;

$B$  un angle quelconque.

$$\text{Alors,} \quad \text{tang } \frac{1}{2} (A + B) = \frac{\cos \frac{1}{2} (a - b)}{\cos \frac{1}{2} (a + b)} \cot \frac{C}{2}$$

$$\text{tang } \frac{1}{2} (A - B) = \frac{\sin \frac{1}{2} (a - b)}{\sin \frac{1}{2} (a + b)} \cot \frac{C}{2}$$

$$\frac{1}{2} (A + B) + \frac{1}{2} (A - B) = A.$$

## DÉTERMINATION DU MÉRIDIEN MAGNÉTIQUE

L'aimant est alors abaissé et observé au moyen de la lunette, le cercle étant tourné jusqu'à ce que la lunette soit à peu près dans le méridien magnétique. On fixe alors le cercle, et on le fait tourner au moyen de la vis tangente,

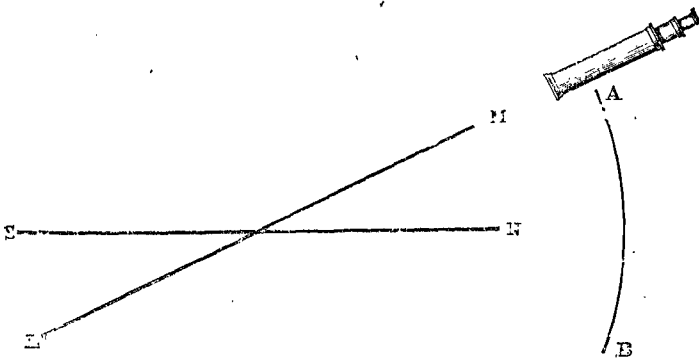


FIG. 62.

jusqu'à ce que la division du milieu de l'échelle placée dans l'aimant tombe sur le réticule. On lit alors les verniers. L'aimant est ensuite retourné, c'est-à-dire qu'on le fait tourner de  $180^\circ$  autour de la ligne qui joint ses pôles; on règle de nouveau le cercle, de façon que le réticule tombe sur le milieu de l'échelle, et on lit les verniers. L'objet de cette double lecture est le suivant : il est impossible de s'assurer que l'axe magnétique de l'aimant coïncide avec la division du milieu de l'échelle ; en général, il s'en faut d'un petit angle. La moyenne des lectures, pour l'aimant « droit » et pour l'aimant « retourné », donne la position du méridien magnétique, indépendamment de la grandeur de cet angle. Car, soient dans la figure 62, SN le méridien magnétique et LM la direction de la division du milieu de l'échelle quand

l'aimant est droit : A sera alors la position de la lunette (1).

Supposons, maintenant, l'aimant retourné : la direction SN ne change pas, mais la direction LM va faire avec elle, en sens inverse, un angle de même grandeur que le premier angle, et la lunette devra être amenée dans la position B (fig. 63). La moyenne des deux positions A et B de

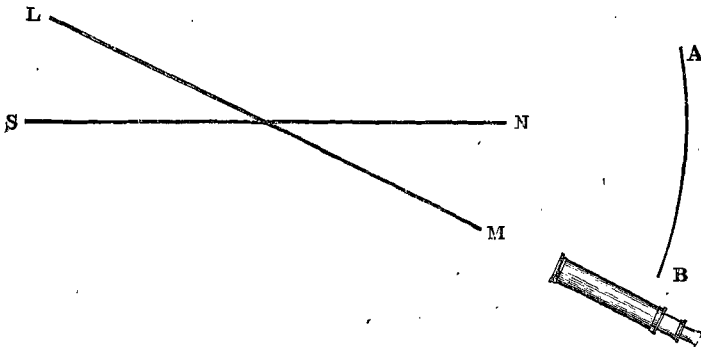


FIG. 63.

la lunette est la direction vraie SN. Il est aisé de voir que la demi-différence des lectures en A et en B est l'angle compris entre SN et LM ; la connaissance de cet angle dispense de retourner l'aimant lorsque l'on doit faire des observations rapides.

« La torsion du fil devra être détruite toutes les fois qu'il sera possible (2). C'est ce qu'on fait en enlevant l'aimant et le remplaçant par un barreau de laiton *de même poids*, qu'on laisse suspendu jusqu'à ce qu'il ait pris une position fixe. On tourne alors le haut du tube de

(1) L'angle de LM et de SN a été beaucoup exagéré pour la clarté de la figure. Dans aucun instrument existant, il n'est supérieur à une petite fraction de degré.

(2) *Instructions de l'Amirauté pour les observations magnétiques*, p. 23.

suspension jusqu'à ce que le barreau soit fixe dans l'alignement de la lunette. On remet alors l'aimant pour faire les observations, l'échelle étant toujours horizontale et les divisions droites. En remettant l'aimant, on prendra soin de ne pas introduire dans le fil une torsion d'un tour ou d'un demi-tour. Toutes les fois que le temps le permettra, on détruira la torsion. »

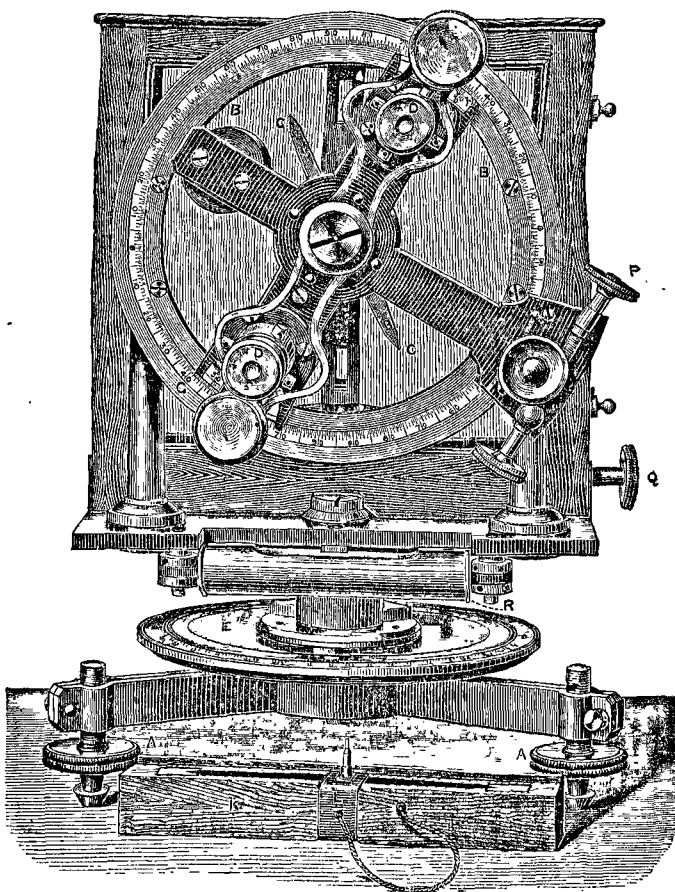
#### RAMENER AU REPOS UN AIMANT QUI OSCILLE

Dans toutes les observations magnétiques, il est de toute nécessité de pouvoir ramener rapidement au repos un aimant qui oscille. Avec un peu de pratique, on y arrive sans peine en approchant brusquement, d'un bout ou de l'autre de l'aimant qui oscille, un petit aimant que l'on tient à la main.

Si l'on tient l'aimant en main, de façon qu'il repousse l'extrémité la plus voisine de l'aimant qui oscille, et si on l'approche brusquement de l'aimant qui oscille, pendant que celui-ci s'avance vers l'observateur et au moment même où il va passer au zéro, l'effet sera d'abord d'arrêter l'aimant oscillant ; ensuite de lui donner une impulsion en sens inverse du mouvement qu'il avait ; mais en retirant l'aimant tenu à la main, au moment où s'arrête l'aimant oscillant, l'observateur arrive, avec un peu de pratique, à arrêter presque court l'aimant devant son zéro. Il n'est pas nécessaire d'avoir un aimant spécial pour cet usage : le levier d'acier ou le tournevis de l'instrument, s'il est aimanté, peut très bien servir (1).

(1) On diminue d'ailleurs beaucoup les oscillations en disposant dans le voisinage du barreau des masses de cuivre rouge, dans lesquelles se développent des courants induits qui réagissent sur l'aimant mobile et tendent à le ramener au repos.





PL. XIV. — Cercle de Barrow, disposé pour la mesure de l'inclinaison.

CERCLE DE BARROW. — INCLINAISON ET FORCE TOTALE  
OBSERVATION DE L'INCLINAISON AVEC LE CERCLE  
DE BARROW (pl. XIV)

*Cercle de Barrow.* — La planche XIV montre l'instrument disposé pour la mesure de l'inclinaison. Voici un aperçu de sa construction :

Toute la partie supérieure de l'instrument tourne autour d'un pivot vertical sur le cercle E.

L'aiguille C se meut dans un plan vertical sur un axe horizontal.

A une distance de quelques centimètres (3 à 5) derrière l'aiguille se trouve une feuille de verre taillé B; à quelques centimètres en avant (5 à 8), est le cercle G, sur lequel tourne un bras mû par une vis tangente P et portant des microscopes DD et des verniers HH. En reportant ce bras si loin en avant de l'aiguille, on se propose de garantir celle-ci de l'influence des parcelles de fer qui peuvent se trouver comme impuretés dans le laiton.

Pour observer la position de l'aiguille, on fait tourner le bras qui porte les microscopes jusqu'à ce que l'on voie les bouts de l'aiguille dans les microscopes. Le bras est alors fixé et réglé au moyen de la vis tangente P, jusqu'à ce qu'une des pointes de l'aiguille soit exactement au centre du champ d'un des microscopes. On lit alors les verniers et l'on fait une observation semblable à l'autre bout. Les lentilles extérieures aux microscopes servent à lire les verniers.

Pour amener le plan du cercle dans le méridien magnétique, rappelons-nous que, quand ce plan est perpendiculaire au méridien magnétique, la composante horizontale n'agit que pour presser les pivots de l'aiguille contre

leurs supports, et que la composante verticale seule tend à produire la rotation.

L'aiguille sera donc verticale quand le plan du cercle sera perpendiculaire au méridien magnétique. On place verticalement le bras porte-microscope ; on règle à  $90^\circ$  l'un de ses verniers, celui du bas par exemple, et l'on fait tourner le cercle autour de son pivot vertical jusqu'à ce que l'extrémité de l'aiguille apparaisse au milieu du champ du microscope. On lit alors le cercle horizontal.

On règle ensuite à  $90^\circ$  le vernier supérieur du porte-microscope (1), et l'on règle le cercle horizontal, jusqu'à ce que l'on voie dans le microscope le haut de l'aiguille. Lecture faite du cercle horizontal, on retourne l'aiguille sur ses supports, c'est-à-dire que l'extrémité de son axe qui était d'abord dirigée vers la face de l'instrument, est tournée vers le fond ; puis on répète les deux observations.

La moyenne des quatre lectures du cercle horizontal est la position du vernier pour laquelle le plan du cercle est *perpendiculaire au méridien magnétique*. Le cercle étant tourné autour de son pivot vertical et placé de façon que la lecture de vernier sur le cercle horizontal diffère de  $90^\circ$  de la valeur moyenne précédemment trouvée, le plan du cercle est dans le méridien magnétique.

Pendant que l'on observe, le pivot de l'aiguille roule simplement sur deux plans d'agate. Pour s'assurer qu'il est bien au centre, on peut le soulever au-dessus des agates par deux fourchettes de métal en forme d'Y, que l'on élève et abaisse au moyen du manche latéral Q. Quand il est soulevé sur ces fourchettes, le pivot tombe au centre,

(1) Si l'instrument était parfait, les deux verniers donneraient à la fois la lecture  $90^\circ$  ; dans la pratique, il y a toujours une différence de  $1'$  à  $2'$ .



et lorsqu'on les abaisse, il est déposé sur les agates dans la position convenable. En tournant, il peut rouler et sortir de cette position; mais après l'avoir soulevé et abaissé plusieurs fois, il finit par tomber à la place exacte pendant qu'il est dans la direction exacte.

Quand on a fini de se servir du manche Q, on règle le porte-microscope de manière à voir les deux bouts de l'aiguille, et on note les lectures correspondantes faites sur le cercle au moyen des verniers.

On recommence l'opération : si dans la première observation on a fait d'abord la lecture de l'extrémité nord de l'aiguille, on commence cette fois par l'extrémité sud, et inversement.

Cela donne quatre lectures. Ensuite on tourne le cercle vertical sur son pivot de  $180^\circ$  lus au cercle horizontal; en sorte que si l'instrument faisait d'abord face à l'est, il fait maintenant face à l'ouest.

Et on prend de même quatre lectures. L'aimant est alors enlevé de ses supports, et retourné de façon que le bout de son pivot qui se dirigeait d'abord vers le devant soit maintenant tourné vers le fond de l'instrument.

On répète les huit lectures précédemment décrites. Puis on retire l'aimant, on le met dans la pièce de bois K, on l'y assujettit au moyen de la pince de laiton L, et l'on renverse ses pôles en promenant sur lui, du centre vers les bouts, deux barreaux aimantés (1).

On emploie cette méthode pour éliminer toute inégalité affectant l'équilibre de l'aiguille ou de son pivot.

Le lecteur se souviendra d'ailleurs que l'intensité de l'aimantation n'influe pas sur les méthodes pour la déter-

(1) Voir figure 49, page 276.

minaison de l'inclinaison, et que, par le retournement du pivot de l'aiguille sur ses supports, on élimine toute différence entre la direction de l'axe magnétique et celle de la ligne qui joint les pointes de l'aiguille (1).

Toutes les seize opérations sont répétées avec l'aiguille aimantée à nouveau.

La moyenne des trente-deux lectures est la direction de l'inclinaison.

Avant de commencer les observations; on doit d'abord mettre l'instrument exactement vertical, au moyen du niveau à alcool R et des vis calantes A, de façon que, les verniers donnant la lecture zéro, une aiguille vue dans les microscopes soit rigoureusement horizontale.

On a l'habitude de faire deux séries de trente-deux lectures et de prendre la moyenne; mais si les résultats des deux séries diffèrent de plus de 3 ou 4 minutes, on refait une autre série.

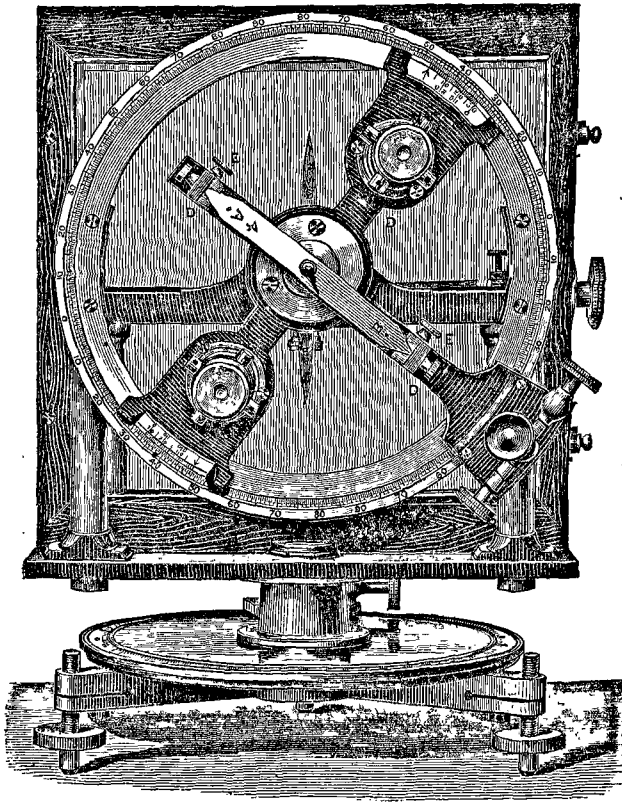
#### OBSERVATION DE LA FORCE TOTALE AVEC LE CERCLE DE BARROW (pl. XV)

La planche XV montre l'instrument disposé pour l'observation de la force totale. La méthode est due au docteur Lloyd.

« A cet effet (2), l'appareil est pourvu de deux aiguilles additionnelles, que l'on peut appeler, pour les distinguer, les numéros 3 et 4 : *jamais leurs pôles ne sont renversés ni modifiés*. Les aiguilles n<sup>os</sup> 1 et 2 servent pour les observations d'inclinaison, de la façon qu'on vient de décrire. Le numéro 3 est une aiguille d'inclinaison ordinaire; le numéro 4 est une aiguille semblable, chargée d'un petit poids fixe et constant,

(1) Comparez page 379.

(2) *Instructions de l'Amirauté pour les observations magnétiques*, page 27.



Pl. XV. — Cercle de Barrow, disposé pour la mesure de la force totale.



agissant en sens inverse du magnétisme. La monture qui porte les microscopes du cercle est disposée de façon à recevoir et à maintenir solidement le numéro 4 dans une position fixe, quand il sert à dévier le numéro 3.

» Les observations comprennent deux opérations : dans la première, on observe « la position d'équilibre (1) » du numéro 3, soumis à la fois à l'action du magnétisme terrestre et à celle du numéro 4, employé à le dévier et placé avec son pôle nord successivement dirigé vers le nord et vers le sud magnétique ; dans la seconde, on observe la position d'équilibre que prend le numéro 4 sous l'action du magnétisme terrestre et du petit poids constant dont il est chargé ».

La première opération nous donne une relation entre la force totale de la terre et le moment magnétique du numéro 4.

La seconde nous donne une relation entre ce même moment et celui d'un poids connu placé à une distance connue de l'axe.

Le produit de ces deux rapports est le rapport de la force terrestre au moment connu du poids, et, par suite, donne la force terrestre en mesure absolue.

Ainsi :

$$\text{Rapport de } \frac{\text{magnétisme terrestre}}{\text{moment magnétique du n}^\circ 4} = A,$$

quantité connue ;

$$\text{Rapport de } \frac{\text{moment magnétique du n}^\circ 4}{\text{moment d'un poids connu}} = B,$$

quantité connue.

(1) La « position d'équilibre » est la position de l'aiguille quand elle est exactement perpendiculaire au porte-microscope DD et à l'aimant qui produit la déviation. Dans cette position, on voit les bouts de l'aiguille dans les microscopes.

Multipliant et réduisant, nous avons :

$$\text{Rapport de } \frac{\text{magnétisme terrestre}}{\text{moment d'un poids}} = AB,$$

quantité connue.

OBSERVATIONS A LA MER — CERCLE DE FOX (pl. XVI)

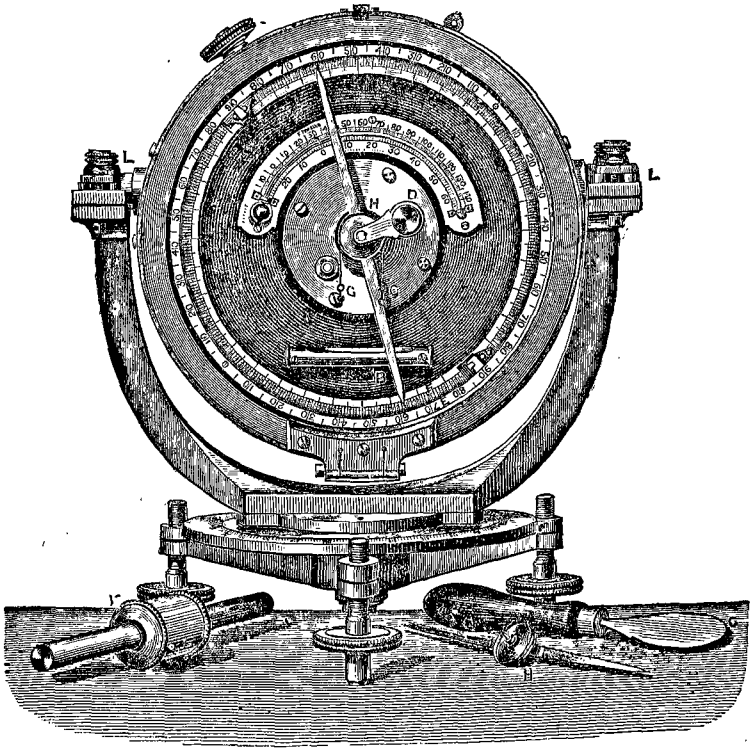
Aucun des instruments décrits jusqu'à présent ne peut servir à la mer. Les mouvements du navire les rendent tout à fait inapplicables. Or, la plus grande partie des observations magnétiques se faisant à la mer, il est nécessaire d'avoir un appareil que l'on puisse employer à bord. Tel est l'instrument inventé par feu M. R. W. Fox, appareil qui, au prix d'un peu d'exactitude, est susceptible de servir dans presque toutes les circonstances.

« L'instrument (1) consiste en deux limbes circulaires divisés (pl. XVI), dont les plans sont verticaux et perpendiculaires à la ligne qui joint leurs centres. La graduation est en quarts de degré, et les zéros sont sur le diamètre horizontal (2). L'ouverture du limbe intérieur est moindre que celle du limbe extérieur, en sorte qu'un observateur, placé devant l'appareil, peut voir à la fois les deux graduations qui doivent se correspondre exactement.

» L'aiguille B oscille entre les deux limbes, bien plus près de celui de l'intérieur que de l'autre. Son axe, qui doit être sur la ligne des centres des limbes, se termine par deux pivots cylindriques très courts, tournant dans des trous de rubis. L'axe porte une petite roue à gorge H, au-

(1) Walker, *Terrestrial and Cosmical Magnetism*, page 218.

(2) Par suite d'une erreur, les zéros ont été figurés déplacés sur la planche XVI. Ils doivent être sur une horizontale, et les divisions 90° sur une verticale.



Pl. XVI. — Cercle de Fox.





tour de laquelle passe un fil de cocon portant deux crochets GG, où l'on attache des poids dans les observations d'intensité. Le tout est renfermé dans une boîte cylindrique de laiton. Cette boîte est montée sur un pied azimuthal, dans lequel tourne un plateau formant vernier, comme dans un théodolite ordinaire.

» Le plateau azimuthal est fixé à une autre plaque, dite de fondation, reposant sur des vis calantes. Quelquefois l'instrument est fait de façon que l'on puisse le visser sur un pied pareil à celui d'un théodolite. Dans la boîte est un thermomètre, pour noter la température au moment de l'observation. »

#### MANIÈRE DE SE SERVIR DE L'INSTRUMENT

« Il y a deux raisons pour avoir deux séries de divisions coincidentes, de part et d'autre du plan d'oscillation de l'aiguille. En premier lieu, on prévient ainsi toute erreur de parallaxe dans les lectures, l'œil se plaçant sur la ligne qui joint les divisions correspondantes; en second lieu, les divisions du cercle extérieur servent de vernier (1).

» L'instrument peut servir à déterminer l'*inclinaison* ou l'*intensité*. »

(1) « En effet, si le cercle extérieur est  $n$  fois plus éloigné du plan de l'aiguille que le cercle intérieur, la ligne de visée passant par la pointe de l'aiguille devra se déplacer de  $n$  divisions du premier pour que l'aiguille paraisse se mouvoir d'une division du second.

» Ainsi supposons qu'il y ait sur les deux cercles  $p$  divisions, chaque division du cercle extérieur correspond à  $\left(\frac{p}{n}\right)$  divisions du cercle intérieur. La méthode consistera donc à lire la division la plus voisine du bout de l'aiguille et à déplacer ensuite l'œil le long du cercle extérieur, jusqu'à ce que l'œil, la division et la pointe de l'aiguille soient en ligne droite. Si  $m$  est le nombre des divisions parcourues sur le limbe extérieur,  $\frac{mp}{n}$  est le nombre de minutes à ajouter à la première lecture. »

Pour empêcher l'aiguille de « coller », on frotte doucement les bouts de son axe avec le frottoir C (pl. XVI), formé d'une feuille de corne, dont la surface a été rendue rugueuse par quelques traits de scie.



#### INCLINAISON (1)

« Le plan du méridien magnétique ayant été déterminé, on amène, en coïncidence avec ce plan, la face de l'instrument, et on fait la lecture des deux pointes de l'aiguille. On fait ensuite tourner la boîte de 180° en azimuth, et on recommence l'observation. La moyenne des quatre nombres indique approximativement l'inclinaison.

» Voici comment on peut corriger cette valeur approchée :

» On a un petit aimant K (appelé aimant déviant), renfermé dans un tube de laiton muni d'une vis. On visse ce tube au dos de l'instrument, de manière à repousser l'extrémité de l'aiguille la plus voisine, et on le fixe à une distance angulaire déterminée de la direction d'inclinaison observée.

» Lorsque l'aiguille est arrivée au repos, on lit les divisions qui correspondent aux deux extrémités. L'aimant déviant est ensuite transporté à une distance égale de l'autre côté de la direction d'inclinaison, et on lit les deux bouts de l'aiguille, comme précédemment. On répète cette opération après avoir fait tourner de 180° la face de l'instrument. La moyenne des quatre lectures est la valeur corrigée de l'inclinaison.

» La plupart des instruments de ce type sont pourvus

(1) Walker, *Terrestrial and Cosmical Magnetism*, page 220.

de deux aimants déviants, l'un pour repousser la pointe nord, l'autre pour repousser la pointe sud de l'aiguille. Mais M. Fox paraît préférer l'emploi d'un seul aimant de déviation, les résultats obtenus étant ordinairement plus concordants avec de petits angles qu'avec de grands. Quelquefois, comme cela est arrivé à bord de l'*Érèbus*, dans l'expédition antarctique de 1839-1843, il est nécessaire d'employer à la fois les deux aimants déviants, à cause de la faiblesse de la force qui produit la déviation, si on se sert d'un seul.

#### INTENSITÉ

» L'aimant déviant (ou les aimants déviants) étant enlevé, le fil de soie est placé sur la roue à gorge et un poids donné est suspendu à l'un des crochets; quand l'aiguille est arrivée au repos, on lit ses deux extrémités. Le poids est ensuite enlevé, suspendu à l'autre bout de la soie, et les deux pointes de l'aiguille lues comme précédemment. La déviation est la demi-différence des deux lectures (1). »

On obtient ainsi le rapport du moment connu du poids au produit de la force terrestre par le moment magnétique de l'aiguille.

Pour déterminer le moment magnétique de l'aiguille, il faut la démonter, la mettre dans la boîte de cuivre K, et s'en servir comme aimant déviant, tandis qu'une autre aiguille, non chargée de poids, lui est substituée au centre.

Cela donne le rapport du moment magnétique du premier aimant à la force terrestre.

Connaissant le rapport et le produit de la force terrestre et du moment magnétique du premier aimant, la première

(1) Walker, *Terrestrial and Cosmical Magnetism*, page 221.

quantité peut être déterminée par un calcul semblable à celui qui a été donné pour les observations de déviation au magnétomètre unifilaire (page 358).

Cette dernière méthode d'observation est une application de la méthode du D<sup>r</sup> Lloyd (décrite page 386) faite par M. Welsh, de l'observatoire de Kew (1).

« La correction de température (2) s'obtient en mettant l'appareil sous un récipient de verre, où l'on introduit de l'air chaud. L'aiguille ayant été écartée d'un angle donné de sa position d'inclinaison par un poids donné, on note le changement de cet angle qui correspond à l'élévation de température. Le changement *réel* dépendra de l'aimantation de l'aiguille; mais le *rapport* paraît être à très peu près uniforme dans les limites des variations de température sous ce climat. »

Voici le témoignage du capitaine Ross, relativement à la valeur de l'instrument de M. Fox :

« Grâce à l'admirable disposition de M. R. W. Fox, nous avons été en mesure, par des temps passablement maniables, de déterminer les trois éléments magnétiques à bord de nos bâtiments, avec plus de précision même qu'on ne peut en obtenir à terre, à cause de la grandeur inconnue et impossible à déterminer de l'attraction locale; même par les coups de vent les plus violents, avec un peu de pratique, on pouvait observer ces instruments avec assez d'exactitude pour en tirer des renseignements importants et utiles. Sur toute la distance de trois à quatre mille milles, qui s'étend de l'île de Kerguelen à la terre de Van Diemen, nous n'aurions pu obtenir aucun résultat satisfaisant avec les instruments communément employés; et

(1) *Instructions pour les observations magnétiques*, page 31.

(2) Walker, *ibid*, page 225.

cette partie de l'Océan, tout au moins, serait restée en blanc sur nos cartes. Mais, avec l'instrument de M. Fox, on a pu faire une série presque ininterrompue d'expériences journalières pour observer l'inclinaison et l'intensité. » (*Ross's Antarctic Voyage*, vol. I, chap. v.)

« La principale raison de la supériorité de l'appareil de Fox, pour prendre des observations à la mer, est sa stabilité, due au mode de suspension de l'aiguille. Comme nous l'avons vu, l'axe se termine par des pivots cylindriques très courts, tournant dans des trous garnis de rubis. Cette construction empêche tout déplacement de l'aiguille sous l'influence du tangage ou du roulis; quant à la perte de sensibilité, qui résulte, sans doute, d'un pareil mode de suspension, elle constitue, dans quelques circonstances, un avantage positif. Un autre avantage de cet instrument est de remplacer la méthode d'oscillation par une méthode *statique* dans les observations d'intensité. Avec la suspension délicate, nécessaire pour les expériences d'oscillation, de pareilles observations seraient, sauf de très rares circonstances, de toute impossibilité. »

## CHAPITRE XV

### APPAREILS ENREGISTREURS (pl. XVII et XVIII)

L'étude des variations diurnes et horaires des éléments magnétiques exige des appareils enregistreurs. Voici, d'une façon générale, le principe de ces instruments :

Un miroir fixé sur l'aimant mobile renvoie un rayon de lumière, venant d'une lampe, sur une bande de papier photographique sensible, mue d'une manière continue par un mouvement d'horlogerie.

Si l'aimant reste en repos, la trace est une ligne droite ; une ligne en zigzag, s'il est en mouvement.

On observe trois éléments, savoir :

La déclinaison,

La force horizontale,

La force verticale.

Du rapport des deux dernières, on peut déduire l'inclinaison : aussi ne l'observe-t-on pas directement.

#### DÉCLINAISON (pl. XVII et XVIII, fig. 1 sur chacune)

La partie de l'appareil qui enregistre la déclinaison consiste en un aimant suspendu auquel est fixé un miroir ; l'aimant est suspendu par un seul fil, comme dans le magnétomètre unifilaire. Il est placé sur un bloc de pierre massif. La lumière d'une lampe à gaz traverse la fente et la lentille d'un collimateur, tombe sur le miroir, et s'y réfléchit à travers un tube de bois jusque dans la boîte (fig. 4, pl. XVII) qui contient les cylindres et le mouvement

d'horlogerie représentés à la planche XVIII, fig. 4. La lumière tombe sur un des cylindres horizontaux, sur la surface duquel est fixée une feuille de papier impressionnable. Si le cylindre était au repos et l'aimant en mouvement, il s'inscrirait sur le cylindre une ligne noire parallèle à son axe, dont la longueur correspondrait aux mouvements extrêmes de l'aimant. Si l'aimant restait fixe tandis que le cylindre tourne, il s'inscrirait autour du cylindre une ligne qui, le papier une fois développé, serait une ligne droite perpendiculaire à l'axe. Mais si le mouvement d'horlogerie imprime au cylindre un mouvement de rotation continu, et si en même temps l'aimant oscille, la ligne inscrite autour du tambour est une ligne courbe irrégulière ou une ligne en zigzag : la distance d'un quelconque de ses points à la ligne de base donne la direction du méridien magnétique à l'instant correspondant.

La ligne de base est tracée par un rayon lumineux réfléchi sur un miroir fixe, dont la direction relativement au méridien astronomique est connue.

Les miroirs sont formés des deux moitiés d'un disque dont la moitié inférieure est fixée à la base et la moitié supérieure attachée à l'aimant suspendu.

Un écran, mû par l'horloge, intercepte la lumière du miroir fixe pour une minute ou deux au commencement de l'heure, toutes les deux heures (1). On a ainsi une

(1) L'indication des heures est obtenue, à Montsouris, de la façon suivante : le tuyau de gaz, avant de se rendre à la lampe, passe dans la cage de l'horloge, à l'intérieur d'une petite cloche de verre renversée sur une cuvette à mercure mobile. Au moment voulu, la cuvette est soulevée et la flamme de la lampe baisse assez pour que le double rayon lumineux cesse de s'inscrire sur le papier sensible. La distance du miroir au papier est telle que la minute d'arc correspond sensiblement à 1 millimètre sur le papier. Au reste, ce rapport est déterminé par des expériences directes.<sup>1</sup>

J. R.

échelle du temps; de la sorte, quand même l'horloge ne marcherait pas bien, aussi longtemps que l'on connaît sa marche, on peut comparer entre eux différents diagrammes.

FORCE HORIZONTALE (pl. XVII et XVIII, fig. 2 sur chacune)

La force horizontale est enregistrée au moyen d'une suspension bifilaire.

Les deux bouts d'un fil fin d'acier sont attachés à une vis horizontale perpendiculaire au méridien magnétique. L'aimant est suspendu à une poulie autour de laquelle passe le fil. Ainsi se trouve réalisée pratiquement la suspension de l'aimant à deux fils toujours également tendus.

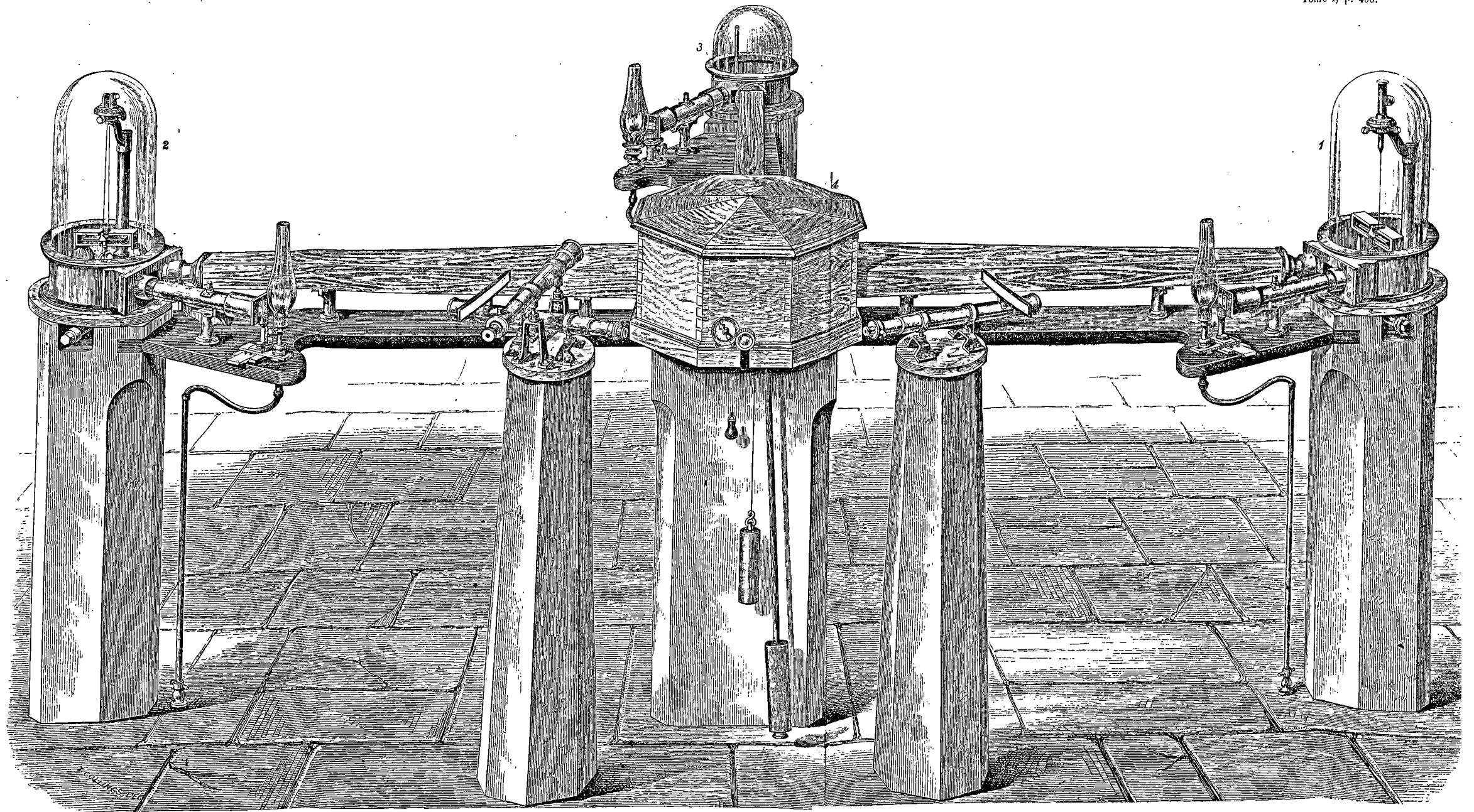
La force magnétique tend à faire tourner l'aimant : mais, s'il tourne, il commence à tordre les fils et à s'élever lui-même. Une fraction du poids de l'aimant agit alors contre le moment magnétique multiplié par la force horizontale : si cette dernière croît, l'aimant continue de tourner jusqu'à ce que ce changement de position fasse agir une proportion plus considérable de son poids pour faire équilibre à la force magnétique. La position de l'aimant indique donc la grandeur de la force horizontale (1).

La valeur de la force horizontale indiquée par une position donnée de l'aimant se détermine par des expériences d'oscillation dont on compare les résultats avec la position moyenne de l'aimant bifilaire pendant la durée des expériences d'oscillation. Les mouvements sont enregistrés sur un autre tambour horizontal, exactement comme ceux de l'aimant de déclinaison.

Pour de *petites* variations de la force horizontale, les

(1) La déviation totale étant très petite.



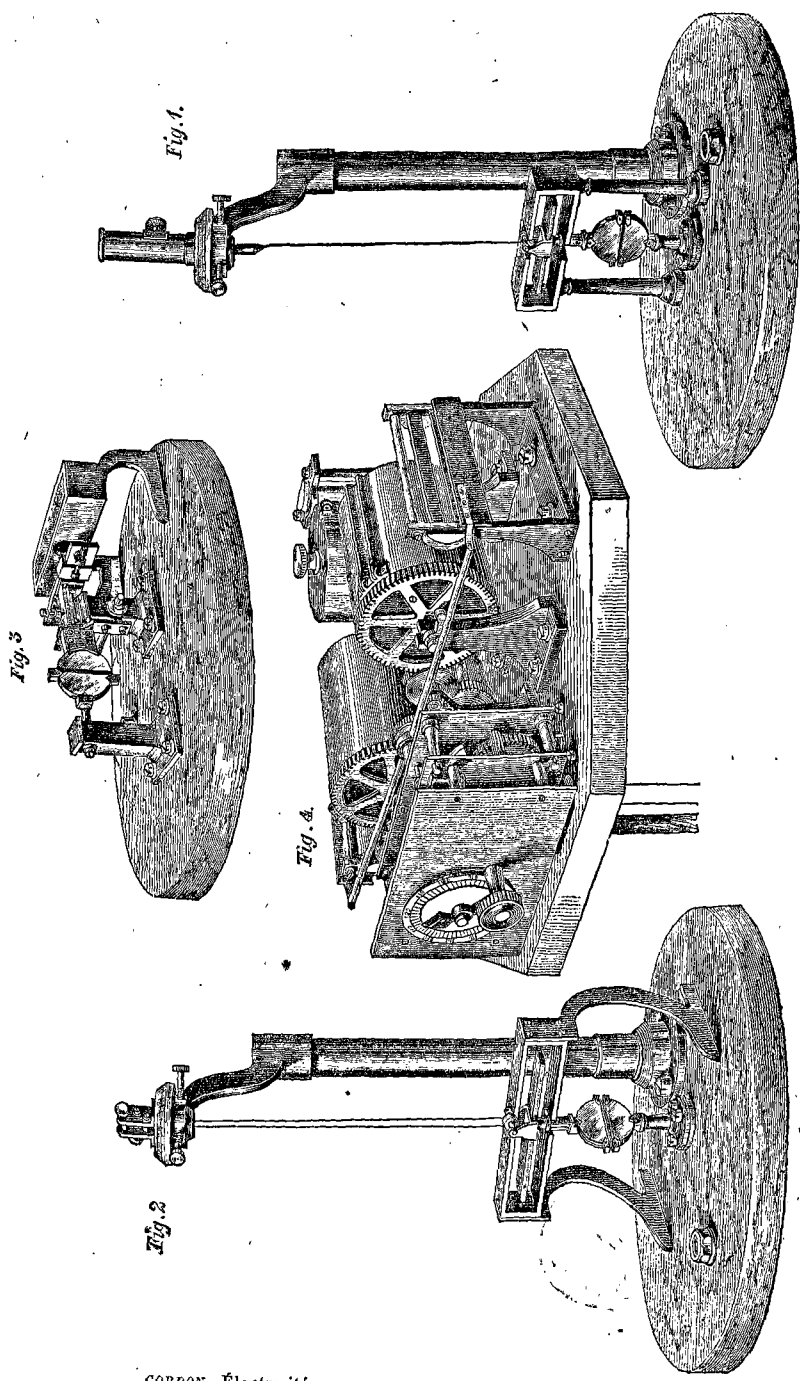


GORDON. Électricité.

PL. XVII. — Magnétomètres enregistreurs de Kew.

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





GORDON. Électricité.

I. — 26

Pl. XVII. -- Magnétomètres enregistreurs de Kew. Détails.



distances de la courbe à la ligne de base peuvent être considérées comme proportionnelles à la force. On peut élever et abaisser l'aimant, pour le régler, en tournant la vis (1).

#### FORCE VERTICALE

(Pl. XVII et XVIII, fig. 3 sur chacune.)

Un barreau d'acier est monté sur un axe garni de cou-teaux d'agate et reposant exactement en équilibre sur des plans d'agate. Il est alors aimanté, et le bout marqué s'incline. On le ramène à une position voisine de l'horizontale, au moyen d'un poids de laiton attaché au bout non marqué, et ajusté de façon que le centre de gravité de tout le système soit un peu en dessous du point de suspension. L'effet de cette disposition est que, plus l'aimant est écarté de la position horizontale, plus grand est le moment du poids qui tend à l'y ramener.

Ainsi, si la force magnétique décroît, l'aimant se meut de manière à se rapprocher de l'horizontale ; si elle augmente, l'aimant tourne en sens inverse. À un moment quelconque, sa position est une mesure de l'intensité de la force verticale.

Les mouvements sont enregistrés sur un tambour de la même manière que la déclinaison et la force horizontale ; la seule différence est que, dans ce cas, les oscillations du point lumineux se font suivant la verticale, en sorte que le

(1) Dans quelques instruments, mais pas dans ceux qui servent à Kew, on s'est arrangé de façon que la vis, en tournant, se déplace longitudinalement à travers ses supports, tandis que le fil de métal ou de soie, en s'enroulant dans le filet de la vis, se meut en sens inverse et à la même vitesse, en sorte que l'aimant n'a qu'un mouvement vertical. L'emploi d'une vis maintient les fils toujours au même écartement, et empêche les spires de chevaucher, comme elles le feraient sur une tige lisse.

tambour doit tourner autour d'un axe vertical au lieu d'un axe horizontal.

#### DÉTAILS

Pour éviter les perturbations causées par les courants d'air, les trois aimants fonctionnent dans le vide. Les boîtes de laiton présentant des rebords bien unis, on place dessus des cloches de verre dont les bords ont été dressés, et l'air est enlevé par une pompe à air ordinaire.

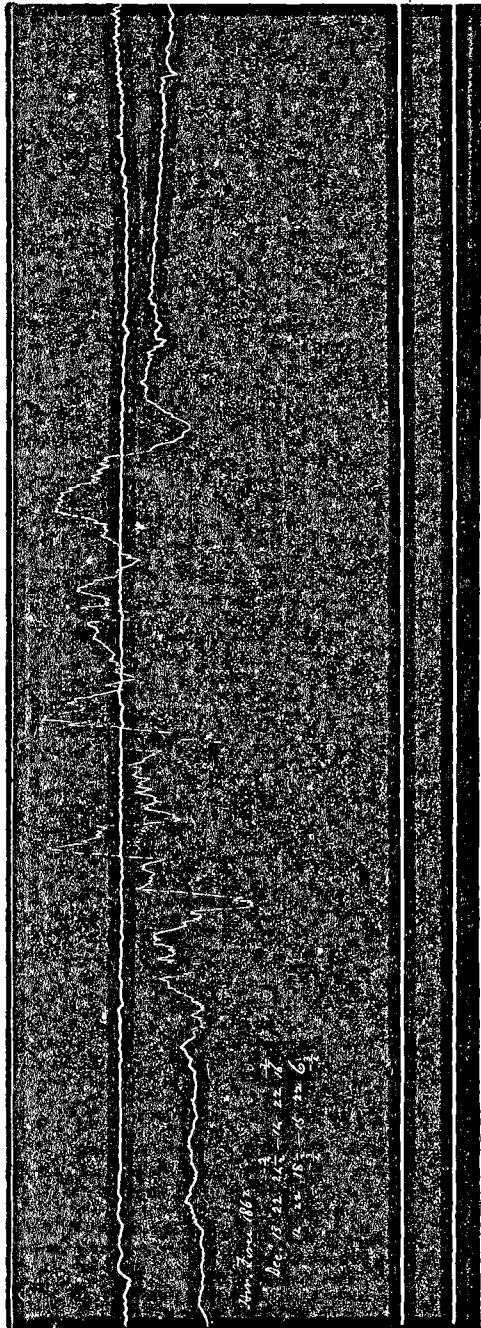
Chaque aimant est pourvu d'une lunette et d'une échelle, en sorte que l'on peut observer, avec l'œil, la position à un instant quelconque.

Les valeurs mesurées sur les courbes doivent être corrigées pour la température. Aussi, les variations de la température sont-elles enregistrées d'une manière continue : un thermomètre est fixé dans une fente d'un écran, d'un côté duquel est une lumière et de l'autre un tambour couvert de papier impressionnable. La lumière traverse le haut du tube, mais est arrêtée par la colonne de mercure. Une courbe est ainsi tracée, montrant les variations de hauteur de la colonne mercurielle : tout le papier est blanc d'un côté de la courbe, et noir de l'autre (1).

Par économie, on prend généralement pour deux jours, sur le même papier, les tracés de chacun des trois éléments magnétiques : pour cela, on déplace le bec de gaz légèrement sur le côté à la fin du premier jour.

La planche XIX montre les variations de la force horizontale pour deux jours consécutifs : le premier jour donnant lieu à des changements ordinaires, et le second caractérisé par une violente tempête magnétique. La planche

(1) Dans les observations météorologiques, on emploie la même méthode pour enregistrer les variations du baromètre.



Pl. XIII. — Spécimen d'enregistrement magnétique obtenu à Kew. (Échelle en pouces.)





#### APPAREILS ENREGISTREURS .

est, en réduction, le fac-simile exact d'un des tracés photographiques. Pour deux jours à variations ordinaires, les deux tracés ne se coupent pas.

Le tracé original est noir sur fond blanc. En 1862, quand il a été relevé, la disposition pour intercepter la lumière toutes les deux heures n'avait pas encore été introduite.

## CHAPITRE XVI

### OBSERVATIONS RELATIVES AU MAGNÉTISME TERRESTRE VARIATIONS SÉCULAIRES

#### DÉCLINAISON

Le tableau suivant montre les changements qui se sont produits dans la déclinaison, depuis l'année 1580.

Année.	Déclinaison à Londres.	Année.	Déclinaison à Londres.
1580	11° 17' E.	1806	24° 8' O.
1622	6° 12' »	1815	24° 27' »
1634	4° 5' »	1820	24° 11' »
1657	0° 0' »	1831	24° 0' »
1666	0° 34' O.		
1672	2° 30' »		
1700	9° 40' »		A Kew.
1720	13° 0' »	1858	21° 54' O.
1740	16° 0' »	1863	21° 13' »
1760	19° 30' »	1868	20° 33' »
1774	22° 20' »	1873	19° 58' »
1790	23° 39' »	1878	19° 14' »
1800	24° 36' »	1879	19° 7' »

On voit qu'à Londres la déclinaison était orientale de 1580 à 1657. En 1657, elle était nulle et le méridien magnétique coïncidait avec le méridien astronomique.

L'aiguille commença alors à se mouvoir du nord à l'ouest, et la déclinaison occidentale s'accrut jusque vers 1815.

A cette époque, l'aiguille est revenue en arrière, et de-

puis lors rétrograde continuellement vers le méridien astronomique.

## INCLINAISON

Le tableau suivant montre les changements observés dans l'inclinaison depuis sa découverte en 1576 :

Année.	Inclinaison à Londres.	Année.	Inclinaison à Londres.
1576	71° 50'	1838	69° 17'
1600	72° 0'	1854	68° 31'
1676	73° 30'		
1723	74° 42'		A Kew.
1780	72° 8'	1858	68° 23'
1790	71° 33'	1863	68° 12'
1800	70° 35'	1868	68° 2'
1818	70° 34'	1873	67° 52'
1821	70° 3'	1878	67° 43'
1828	69° 47'	1879	67° 42'

On voit que, depuis l'époque de sa découverte jusque vers 1723, l'inclinaison a augmenté à Londres. Elle a décré depuis cette époque jusqu'à présent.

## FORCE

Il y a aussi une variation séculaire dans la force horizontale et la force totale.

La *force horizontale* croît d'année en année d'une manière sensiblement uniforme. Sa valeur moyenne était à Greenwich :

0,1716 en 1848  
 0,1776 en 1867  
 (A Kew) 0,1797 en 1879

L'accroissement annuel est d'environ 0,00124 de la force.

La *force totale* décroît d'année en année. Sa valeur moyenne, à Greenwich, était :

0,4791 en 1848  
 0,4740 en 1866  
 (A Kew) 0,4736 en 1879 (1)

#### VARIATIONS PÉRIODIQUES (2)

*Observations magnétiques faites sous la direction du major-général SABINE, ex-président de la SOCIÉTÉ ROYALE.*

L'ouvrage du général Sabine sur le magnétisme terrestre est formé d'une série de mémoires insérés dans presque tous les numéros des *Philosophical transactions* depuis 1840 jusqu'à présent.

Une grande partie de ses communications a été reproduite dans une *Description magnétique du globe*, destinée

(1) D'après M. Airy, le point où l'intensité totale a sa plus grande valeur est la terre Victoria du sud, vers 70° de latitude sud et 160° de longitude à l'est de Greenwich. L'intensité y est représentée par 0,7898.

Le point où l'intensité totale a sa plus petite valeur est voisin de Sainte-Hélène, par 16° de latitude sud et 355° de longitude à l'est de Greenwich. L'intensité y est de 0,2828.

M. le docteur Everett (*Units and physical Constants*, p. 127) donne les relations suivantes comme représentant les valeurs moyennes des éléments magnétiques à Greenwich, d'après l'astronome royal, M. Airy :

Déclinaison 0.....	19° 12',1	− (t − 1876) × 7',38
Force horizontale.....	0,1797	+ (t − 1876) × 0,00027
Inclinaison.....	67° 40',3	− (t − 1876) × 2',04
Force verticale.....	0,4375	− (t − 1876) × 0,00008
		= Force horizontale × tang. inclinaison.

Chaque formule donne la moyenne de l'année entière *t*. J. R.

(2) Le lecteur pourra utilement consulter l'étude des phénomènes à variations périodiques, faite par M. Faye, dans sa note « sur la météorologie cosmique », insérée dans l'« Annuaire du bureau des Longitudes pour 1878 ».

J. R.

surtout aux marins. Comme, d'ailleurs, on ne peut pas dire qu'on ait encore établi une théorie générale de la distribution du magnétisme terrestre, nous limiterons notre étude aux observations et aux conclusions du général Sabine, en ce qui concerne les variations des divers éléments. Au préalable, nous dirons quelques mots des méthodes employées pour distinguer les perturbations dont les périodes ne sont pas les mêmes.

Supposons que nous ayons, pour une longue durée, les observations des divers éléments d'heure en heure, et que nous voulions connaître les variations de jour en jour, on prendra la moyenne des observations horaires pour chaque jour, et la différence entre les moyennes des jours successifs donne la variation par jour.

Si nous voulons trouver la variation moyenne d'heure en heure, nous prendrons *la moyenne des observations faites à la même heure à des jours différents*, ce qui donne la variation horaire et *élimine la variation journalière*.

La première conclusion du général Sabine, en ce qui concerne les variations séculaires, est qu'il y a une période de dix ans pour les grandes perturbations de la déclinaison (1).

Les années 1843 et 1848 ont été respectivement des périodes de *minimum* et de *maximum* de perturbation à Toronto et à Hobarton.

Cette période de dix ans « ne paraît liée à aucune des divisions du temps qui nous sont familières et qui dépendent des positions relatives du soleil, de la terre et de son satellite ».

Toutefois, Schwabé a fait la remarquable découverte

(1) *Philosophical Transactions*, 1856, p. 361.

que cette période de dix ans concorde absolument, non seulement par la durée, mais aussi par la position de ses *maxima* et *minima*, avec une période qu'il a découverte dans la fréquence et la grandeur des taches solaires.

Des moyennes mensuelles, prises pendant plusieurs années, ont montré qu'il y a pour les perturbations une période annuelle correspondant à la position apparente du soleil sur l'écliptique.

Dans les stations australes, la déclinaison marche vers l'est de mai à septembre, et vers l'ouest les autres mois de l'année. C'est l'inverse dans les stations du nord.

A Dublin, la force totale atteint un *maximum* en juin et un *minimum* en février. Dans l'hémisphère sud (Hobarton), c'est l'inverse qui est observé.

#### INCLINAISON

A Kew, l'inclinaison est au-dessous de la moyenne en mai, juin, juillet et août, au-dessus pendant le reste de l'année. A Hobarton, l'inclinaison sud est au-dessous de la moyenne de juin à octobre inclusivement, au-dessus le reste de l'année (1).

#### INÉGALITÉS DIURNES

Les observations horaires ont mis en évidence une autre période coïncidant avec la période de rotation de la terre autour de son axe.

Le D<sup>r</sup> Lloyd, parlant des inégalités diurnes à Dublin, en décrit ainsi les caractères généraux :

« 1<sup>o</sup> La force vers l'est diminue depuis sept ou huit heures du matin, et le pôle nord de l'aimant se meut *vers*

(1) Lloyd, *Treatise on Magnetism*.

*l'ouest* jusque vers une heure après midi, heure à laquelle la force vers l'est atteint un *minimum*.

» 2° Passé une heure, la force vers l'est croît, et le pôle nord de l'aimant revient *vers l'est*. Ce mouvement vers l'est continue jusque vers dix heures du soir, heure à laquelle la force vers l'est atteint un maximum.

» 3° Il y a une deuxième oscillation, semblable mais plus petite, pendant la nuit et de grand matin; la force vers l'est diminue et le pôle nord de l'aimant se meut lentement vers l'ouest pendant quelques heures avant et après minuit, après quoi il revient à l'est jusqu'à sept heures du matin, heure à laquelle la force vers l'est atteint un maximum.

» 4° En été, le mouvement vers l'ouest de la nuit disparaît, et le mouvement vers l'est de l'après-midi se continue, quoique plus lentement, pendant toute la nuit. En hiver, d'autre part, le mouvement vers l'est du matin disparaît, et l'aimant reste presque à l'état de repos de deux heures du matin à huit heures du matin.

« 5° Des faits précédents, il résulte que l'écart le plus grand est : en été, celui du mouvement vers l'ouest de sept heures du matin à une heure du soir; en hiver, celui du mouvement vers l'est de une heure à dix heures du soir. »

#### INÉGALITÉS DIURNES LUNAIRES

On a aussi découvert une période correspondant au jour lunaire.

Le général Sabine (1) dit :

« La variation de chacun des trois éléments constitue une double progression durant chaque jour lunaire ; la

(1) *Phil. Trans.*, 1856, p. 505.

déclinaison a deux maxima vers l'est et deux maxima vers l'ouest, dans l'intervalle de deux passages successifs de la lune au méridien astronomique : l'inclinaison et la force totale ont chacune dans ce même intervalle deux maxima et deux minima dus à l'action de la lune, la variation passant quatre fois par zéro pendant un jour lunaire, dans chaque cas.

» Les maxima vers l'est de la déviation horizontale de l'extrémité de l'aimant, qui est tournée vers le nord, concordent avec les passages supérieur et inférieur de la lune au méridien ; les maxima vers l'ouest correspondent à la sixième et à la dix-huitième heure lunaire. Les maxima d'accroissement de la force magnétique dus à l'action de la lune tombent vers la troisième et la seizième, les minima vers la neuvième et la vingtième heure lunaire. »

On voit que les variations des éléments magnétiques dépendent principalement des positions relatives du soleil et de la lune par rapport à la terre. Quant à décider si la plus grande partie de cet effet est due à une action magnétique directe, ou bien, par voie indirecte, à l'échauffement et au refroidissement de la croûte terrestre, c'est ce que nous ne sommes pas en mesure de faire avec une certitude absolue.

#### EFFET DES TACHES SOLAIRES

En 1859, une tempête magnétique, sans précédent par sa grandeur, dura du 28 août au 7 septembre. Le professeur Balfour Stewart (1) a fait remarquer qu'elle coïncidait avec la période du maximum d'activité d'une des plus grandes taches solaires que l'on ait jamais observées.

(1) *Phil. Trans.*, 1861, p. 423.



## AURORES BORÉALES

On a remarqué que l'apparition de certaines sortes d'aurores boréales coïncidait avec certaines périodes de perturbation, mais on ne peut pas dire que les meilleures observations que l'on possède à ce jour, celles faites à Point-Barrow (1) en 1852-3-4, aient établi aucune relation définie.

## OBSERVATIONS DE BROUN

Le 15 décembre 1875, M. J.-A. Broun, membre de la Société Royale, lui communiquait un mémoire (2) sur « les variations de la moyenne journalière de la force horizontale du magnétisme terrestre produites par la rotation du soleil et les révolutions synodique et tropique de la lune ». En voici un extrait :

« Les variations de la moyenne journalière de la force horizontale dans les années 1844 et 1845 montrent plusieurs oscillations bien marquées, ayant une période de 20 à 30 jours, et une amplitude qui atteint dans quelques cas plus d'un millième de la force magnétique totale. Ces oscillations ont été d'abord attribuées à l'action de la lune; ensuite on jugea plus probable qu'elles étaient dues à la rotation du soleil sur son axe. La disparition de ces oscillations au milieu de séries bien caractérisées, leurs différences d'amplitude et de période, ne peuvent s'expliquer que dans l'hypothèse où l'action du soleil ne serait pas continue, mais périodique et par à-coups.

» L'auteur a été dernièrement conduit à croire que ces différences dans les oscillations sont dues aux actions simul-

(1) *Phil. Trans.*, 1857, p. 497.

(2) *Proc. Roy. Soc.*, xxiv, 1875-76, p. 231.

tanées du soleil et de la lune ; d'après cela, il a déduit les variations moyennes correspondant aux trois périodes de 26, — 29,5 et 27,3 jours qui sont les durées respectives de la révolution du soleil d'après les observations magnétiques, de la révolution synodique et de la révolution tropique de la lune. Il trouve qu'en combinant ces trois séries de variations, on représente très exactement toutes les variations de la moyenne journalière de la force horizontale du magnétisme terrestre pour chaque année. Il en résulterait que la rotation du soleil et les différentes positions de la lune relativement au soleil et au plan de l'équateur (ou de l'écliptique) produisent toutes les différences d'amplitude et d'époque, aussi bien que la disparition complète de l'oscillation.

» Des cas de diminution considérable et soudaine de la force magnétique terrestre, qui se sont présentés en 1844 et 1845, ont été examinés ; et on a montré que ces perturbations se produisent à des intervalles de vingt-six jours ou à des intervalles multiples de vingt-six jours : dans un cas, le phénomène s'est reproduit cinq fois de suite exactement à vingt-six jours d'intervalle.

» Cette période est celle de la rotation du soleil *relativement à la terre* : il semble donc résulter de là que la terre a sur le soleil, ou, plus probablement, sur quelque sorte de radiation émanée du soleil, une certaine action qui détermine ces changements du magnétisme terrestre.

» On a reconnu aussi que ces variations soudaines sont plus fréquentes lorsque la lune est à une distance considérable de l'équateur et de l'écliptique ; il paraîtrait donc que notre satellite agit aussi sur la cause des grandes perturbations du magnétisme terrestre. »

## APPENDICE AU CHAPITRE XVI

### OBSERVATIONS SUR LE MAGNÉTISME TERRESTRE

Les annuaires de l'observatoire de Montsouris (année 1880, p. 149) donnent un tableau des observations faites depuis 1550 pour la déclinaison et depuis 1671 pour l'inclinaison. Les résultats jusqu'en 1791 sont extraits de l'ouvrage *Sur la déclinaison et les variations de l'aiguille aimantée*, par M. Cassini, directeur de l'observatoire de Paris, Paris 1791. L'auteur fait précéder ses tableaux d'un relevé d'observations faites en dehors de l'observatoire de Paris et antérieurement à sa fondation.

« La série d'observations faites à l'Observatoire pendant une période de plus de deux siècles, mais qui présentent malheureusement plusieurs lacunes, peut être divisée en cinq parties : la première comprenant les observations faites par Picard, depuis 1667 jusqu'en 1683 ; la deuxième, les observations faites par De la Hire, père et fils, depuis 1683 jusqu'en 1719 ; la troisième, les observations faites par Maraldi, depuis 1719 jusqu'en 1744 ; la quatrième, les observations faites depuis 1744 jusqu'en 1791, par De Fouchy et Cassini ; la cinquième, les observations faites par Arago, Bouvard et autres, jusqu'au transfert des instruments magnétiques à l'observatoire de Montsouris.

» Les observations de Picard sont très précieuses en ce qu'elles fixent l'époque où la déclinaison parut nulle. En effet, dans son ouvrage *De la mesure de la Terre (Histoire académique, vol. VII, p. 165)*, Picard, rapportant que, vers la fin de l'été 1673, il avait trouvé la déclinaison de l'aiguille aimantée de  $1^{\circ} 30'$  vers le nord-ouest, ajoute que cette même aiguille n'avait à Paris aucune déclinaison sensible en l'année 1666, et qu'en 1664 elle déclinait vers l'est de  $0^{\circ} 30'$ . »

La table suivante montre que de 1790 à 1835 la déclinaison a passé par un maximum qui paraît devoir être entre 1812 et 1819, vers 1814.

GORDON. Électricité.

I. - 27

Depuis lors elle diminue assez régulièrement d'environ 7 à 9 minutes par an en moyenne. De 1849 à 1879, l'inclinaison à Paris diminue en moyenne d'environ 2 minutes par an.

## DÉCLINAISON DE L'AIGUILLE AIMANTÉE

Années.	Déclinaison à Paris.	Années.	Déclinaison à Paris.
1550	8° 0' E.	1819	22° 29' O.
1580	11 30	1835	22 4
1622	6 30	1849 (1)	20 4
1634	4 16	1859 (1)	19 33,4
1664	0 40	1861 (1)	19 15,5
1666	0 0	1863 (2)	19 0,6
1667	0 15 O.	1868 (2)	18 24,0
1670	1 30	1869 (2)	18 16,3
1680	2 40	1871	17 56,7
1689	6 00		A Montsouris.
1700	8 12		
1720	13 0	1873	17° 33' O.
1740	15 30	1874 (1)	17 29,8
1760	18 30	1875 (1)	17 26,2
1773	20 0	1876 (1)	17 19,7
1790	22 0	1877 (1)	17 12,7
1812	22 29	1878 (1)	17 5,8
1814	22 34	1879 (1)	16 56,4

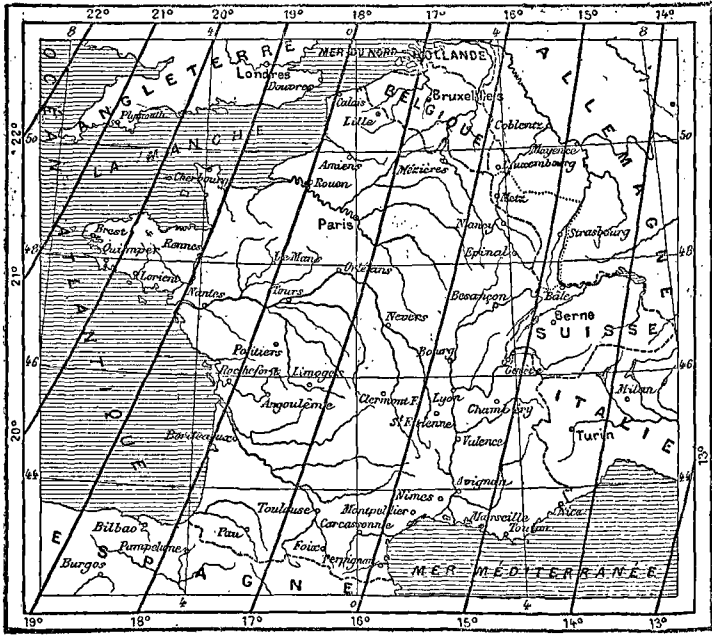
## INCLINAISON DE L'AIGUILLE AIMANTÉE

Années.	Inclinaison à Paris.	Années.	Inclinaison à Paris.
1671	75°	1869 (2)	65° 43',9
1754	72 15'		A Montsouris.
1791	70 52		
1813	68 35,7	1875	65° 37'
1835	67 24	1876 (1)	65 37,4
1846 (1)	66 45	1877 (1)	65 36,7
1859	66 16	1878 (1)	65 33,4
1863	66 0,9	1879 (1)	65 31,8

(1) Observations rapportées au mois de janvier.

(2) Moyennes annuelles.





PL. XIX bis. — Carte de la déclinaison magnétique en France, au 15 juin 1870.

## CARTE DE LA DÉCLINAISON MAGNÉTIQUE EN FRANCE (pl. XIX bis)

Cette carte, qui a paru dans les annuaires de l'observatoire de Montsouris de 1877, 78 et 79, donne les lignes d'égalité de déclinaison magnétique au 15 juin 1876.

Au 15 juin 1875, la déclinaison à Paris était de  $17^{\circ} 21'$  et la diminution annuelle antérieure de  $7',5$ .

Au 15 juin 1876, elle était de  $17^{\circ} 19'$ , soit  $2'$  de diminution ;

En juin 1877	—	17 10	—	9	—
— 1878	—	17 1	—	9	—
— 1879	—	16 56	—	5	—

Il faut donc diminuer de 23 minutes environ les déclinaisons fournies par la carte, pour avoir sensiblement la situation au 15 juin 1879.

## FORCE HORIZONTALE

L'intensité horizontale à Paris a été déterminée avec beaucoup de soin par MM. Cornu et Baille, en avril 1870 (1). Ils l'ont trouvée de 0,1920.

En janvier 1876 elle était de 0,19324, et la moyenne de 1876-77 était de 0,19335.

## FORCE TOTALE

L'intensité totale peut se déduire de l'intensité horizontale en divisant cette dernière par le cosinus de l'angle d'inclinaison.

En avril 1870, l'inclinaison était de  $65^{\circ} 35'$ , et, par suite, la force totale, d'après MM. Cornu et Baille, de 0,4645.

En janvier 1876, elle était de.....	0,46621
La moyenne de 1876-1877 était.....	0,46577
(l'inclinaison moyenne étant $65^{\circ} 35',2$ ).	
En janvier 1879.....	0,46485
En septembre 1879.....	0,46536

(1) *Comptes rendus*, vol. LXX, p. 1342; 1870.

## MOYENNES MENSUELLES AUX HEURES D'OBSERVATION

A Montsouris, de la déclinaison, de l'inclinaison et de la force magnétique totale, pendant le mois de janvier 1879.

	6 h. m.	9 h. m.	Midi.	3 h. s.	6 h. s.
Déclinaison.....	16°54',7	16°55',1	16°59',9	16°57',9	16°56',4
Inclinaison.....	65°31',7	65°31',9	65°32',0	65°31',5	65°31',7
Force totale.....	0,46480	0,46479	0,46478	0,46486	0,46485

CHANGEMENTS HORAIRE MOYENS DE LA DÉCLINAISON en 1875-1876.												
Heures.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Sept.
h.	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
6 matin.	-2,8	-1,6	-1,2	-1,9	-2,1	-3,2	-4,3	-5,4	-5,2	-5,8	-4,5	-3,1
7	-4,2	-2,7	-1,8	-3,3	-2,9	-4,6	-5,5	-4,8	-5,2	-5,6	-5,1	-4,3
8	-3,9	-2,6	-2,1	-3,3	-2,9	-4,4	-5,2	-3,2	-4,1	-4,3	-4,4	-3,9
9	-2,0	-1,0	-1,2	-2,1	-1,0	-2,5	-3,1	-0,8	-2,0	-2,1	-2,1	-2,1
10	+0,8	+1,0	+0,4	-0,1	+1,0	+0,5	+0,1	+1,9	+0,8	+1,2	+1,0	+0,7
11	+3,5	+2,8	+2,1	+1,9	+2,9	+3,6	+3,6	+4,4	+3,8	+3,2	+4,2	+3,3
Midi....	+5,2	+4,0	+2,9	+3,3	+4,3	+5,8	+6,1	+6,0	+6,0	+5,9	+6,4	+4,9
1 soir..	+5,4	+4,0	+2,7	+3,7	+4,7	+6,5	+7,2	+6,5	+7,2	+7,3	+7,1	+5,0
2	+4,5	+3,2	+2,4	+3,5	+4,2	+5,8	+6,7	+6,0	+7,0	+7,1	+6,2	+4,2
3	+3,1	+1,8	+1,5	+2,7	+3,1	+4,4	+5,4	+5,1	+5,8	+6,2	+4,5	+2,7
4	+1,8	+0,8	+0,8	+1,9	+2,0	+2,9	+3,8	+3,9	+4,1	+4,9	+2,7	+1,5
5	+0,9	+0,3	+0,1	+1,3	+1,1	+1,8	+2,6	+2,9	+2,8	+3,5	+1,3	+0,7
6	+0,1	-0,2	0,0	+0,6	+0,4	+0,8	+1,6	+2,2	+1,8	+2,3	+0,5	+0,3

Le signe - indique que la déclinaison est moindre que la moyenne.  
Le signe + indique que la déclinaison est plus forte que la moyenne.

J. R.



## CHAPITRE XVII

### COURANTS TERRESTRES

Les observations magnétiques se compliquent de l'existence de certains courants électriques qui circulent dans la terre (1).

M. C. V. Walker a fait une série de recherches sur ces courants, et en a communiqué les résultats à la Société Royale, en 1861 et 1862 (2). Voici comment il les résume :

» 1° Il y a, à tout moment, des courants électriques circulant dans le sol, dans des directions définies.

» 2° Leur direction ne dépend pas de causes locales.

» 3° Il n'y a pas de différence apparente, sauf dans l'intensité, entre les courants observés pendant les grandes perturbations magnétiques et ceux des périodes ordinaires de calme.

» 4° Les directions les plus fréquentes des courants de terre sont à peu près le nord-est et le sud-ouest (3).

» 5° Il n'y a pas de différence marquée de fréquence, de durée ou d'intensité, entre les courants allant au nord-est ou au sud-ouest.

» 6° Durant les périodes de calme au moins, il y a des courants définis, moins fréquents, partant de certains lieux dans les quadrants sud-est et nord-ouest respectivement.

(1) Voir chapitre XIX : « Action des courants sur les aimants. »

(2) *Proc. Roy. Soc.*, XI, 1860-1862, p. 581.

(3) Ces courants tendraient à placer les aimants sud-est et nord-ouest respectivement

» 7° La direction du courant dans une partie d'un plan à la surface de la terre (pour la partie sud-est de l'Angleterre tout au moins) coïncide avec la direction du courant dans une autre partie du plan ; si la direction change en un point, elle change en tous les points du plan.

» 8° Il n'y a pas de relation constante entre l'intensité du courant en un point du plan et celle en un autre point ; l'intensité dépend des conditions météorologiques locales, et varie de temps en temps.

» 9° L'intensité d'un courant de longueur donnée, circulant dans une direction donnée, n'est pas nécessairement la même que celle d'un courant de même longueur circulant dans le prolongement du premier ; la valeur relative de ces intensités dépend de la nature physique du sol qui sépare les points d'observation respectifs ; elle est assez constante.

» 10° Les courants qui ont servi de fondement à cette étude sont des courants dérivés de courants terrestres proprement dits et véritables ; ni en tout ni en partie appréciables, ils n'ont été recueillis dans l'atmosphère ; ni en tout ni en partie appréciable, ils ne sont dus à la polarisation des plaques de terre par le passage préalable de courants terrestres ou de courants télégraphiques énergiques ; ils ne sont pas dus non plus à des forces électromotrices résidant dans les plaques de terre elles-mêmes.

» 11° Les courants de terre en question (ou du moins les courants puissants qui se manifestent toujours au moment des grandes perturbations magnétiques) exercent sur les magnétomètres une action *directe*, exactement comme des courants artificiels renfermés dans un fil métallique exercent une action directe sur un aimant. »

## TROISIÈME PARTIE

ÉLECTRICITÉ VOLTAÏQUE ET ÉLECTRO-MAGNÉTISME

OU.

ÉLECTRO-CINÉTIQUE

---

### CHAPITRE XVIII

#### LA PILE VOLTAÏQUE

Nous avons dit que si un conducteur isolé est chargé d'une manière quelconque, on trouve au bout d'un temps très court que tous ses points sont au même potentiel. Supposons que nous prenions deux conducteurs et que nous les chargions à des potentiels différents. Si maintenant nous les relions par un fil, nous trouvons qu'au bout d'une très petite fraction de seconde le potentiel de l'un a diminué, celui de l'autre a augmenté, jusqu'à ce qu'ils soient arrivés tous deux au même potentiel.

Celui dont le potentiel a diminué a perdu une certaine quantité d'électricité, tandis que celui dont le potentiel a augmenté en a gagné une certaine quantité. Or, comme il n'est entré ni sorti d'électricité dans le système, le gain d'électricité de l'un doit être égal à la perte de l'autre, et

nous sommes en droit de dire que l'électricité s'est transportée de l'un sur l'autre en suivant le fil.

Ce flux d'électricité le long du fil est appelé un « courant électrique », et se produit toutes les fois qu'un fil ou un autre conducteur sert à relier deux conducteurs dont les potentiels sont différents. Quand on relie deux conducteurs isolés et chargés, le flux qui se produit jusqu'à ce que les potentiels soient égaux ne dure que très peu de temps, les potentiels se rapprochant très rapidement de l'égalité. Mais si, au lieu d'isoler les conducteurs chargés, nous les relierons à une machine qui, au prix d'une dépense de travail, maintienne constamment leurs potentiels différents, le courant électrique continue de s'écouler le long du fil de communication tant que la machine est en action.

La pile voltaïque est une machine de ce genre. Voici un aperçu du principe sur lequel elle est fondée.

Si deux métaux sont placés l'un près de l'autre, mais sans qu'il y ait contact entre eux, dans un liquide qui exerce une action chimique plus énergique sur l'un que sur l'autre, les métaux se chargent de façon que celui qui est le moins attaqué se trouve à un potentiel plus élevé que celui qui est le plus attaqué. La différence de potentiel produite ne dépend que de la nature des métaux et du liquide, et non des dimensions ou de la position des plaques métalliques.

Aussitôt que la différence de potentiel a atteint sa valeur constante, l'action chimique cesse.

Mais si les métaux sont reliés par un fil métallique extérieur au liquide, la différence de potentiel commence à diminuer, et un courant électrique traverse le fil. Aussitôt que la différence de potentiel descend au-dessous du maximum correspondant aux deux métaux et au liquide, l'action chimique recommence et rétablit le maximum; ainsi, si

aucune cause perturbatrice n'intervient, le courant continue jusqu'à ce que le métal le plus attaqué soit entièrement dissous.

Cette manière de voir explique très bien les faits. Il n'est cependant pas encore certain que ce soit la véritable explication, et on donne aussi la suivante. Au contact de deux métaux, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un fil métallique, on observe une différence de potentiel. Si les deux métaux, toujours réunis, sont plongés en partie dans un liquide qui agit plus sur l'un que sur l'autre, l'action chimique égalise les potentiels et, en agissant ainsi, détermine un flux d'électricité le long du fil de communication. Dès l'instant où l'égalisation des potentiels a commencé, la différence se rétablit aux points de contact des métaux, et, de la sorte, si aucune cause perturbatrice n'intervient, un courant continu d'électricité s'établit jusqu'à ce que le métal le plus attaqué soit entièrement dissous.

A mon sens, ce dernier point de vue est appuyé par plus de preuves que le premier ; il sera discuté plus complètement au chapitre XLIII, *Électricité de contact* (1).

Quand deux métaux sont disposés dans un liquide comme on vient de le décrire et qu'ils sont en communication métallique, celui qui, s'il était seul, serait le plus attaqué, protège entièrement l'autre ; cette disposition est appelée un *circuit voltaïque* ou un élément voltaïque.

(1) SIÈGE DE LA FORCE ÉLECTRO-MOTRICE. — En vertu du principe de la conservation de la force, la force électro-motrice doit résulter de la transformation d'un travail équivalent à celui qu'elle engendre. Son siège doit donc être au point de circuit où il y a consommation de matière. L'origine de cette force est attribuée par les uns au contact de deux métaux hétérogènes ; par les autres, à l'action chimique du liquide sur les métaux. Mais, dans les deux hypothèses, il ne peut y avoir courant qu'autant qu'il y a consommation de métal, et on peut déduire la force électro-motrice de la mesure de l'action chimique.

Dans ce qui suit, nous appellerons pôle positif de la pile la partie, non plongée dans le liquide, du métal le moins attaqué, et pôle négatif la partie correspondante de l'autre métal. Si l'on porte le liquide de l'élément au potentiel de la terre, la plaque qui est au potentiel le plus élevé sera chargée positivement; celle au potentiel le plus bas sera chargée négativement, et la convention précédente est d'accord avec nos définitions de la première partie du livre.

Dans presque toutes les formes pratiques d'éléments voltaïques, le métal qui forme le pôle négatif est le zinc; celui qui forme le pôle positif varie.

La forme la plus simple d'élément voltaïque consiste en une plaque de cuivre et une plaque de zinc (fig. 64) plongées partiellement dans de l'acide sulfurique étendu (1), qui agit sur le zinc et non sur le cuivre. Mais avec une pareille disposition le courant ne dure que fort peu de temps et cesse ensuite. Évidemment une cause perturbatrice est en jeu. En examinant le cuivre, on voit qu'il est entièrement couvert de petites bulles; si on les recueille et si on les analyse, on reconnaît qu'elles sont formées de gaz hydrogène pur.

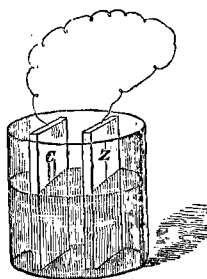


FIG. 64

Si un morceau de zinc seul se dissout dans l'acide sulfu-

(1) A moins qu'on ne dise le contraire, par « acide sulfurique étendu » on entend un mélange de 7 parties (en volume) d'eau pour 1 d'acide à la densité de 1,845. En faisant le mélange, on doit avoir soin de mesurer d'abord l'eau et d'y ajouter l'acide : il est très dangereux d'ajouter l'eau à l'acide.

rique étendu, l'eau est décomposée, l'oxygène se combine au zinc, et l'hydrogène est mis en liberté (1).

Quand la décomposition a lieu dans un élément voltaïque, l'hydrogène est mis en liberté, non à la surface du zinc, mais à celle du cuivre.

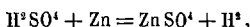
Lorsque le cuivre est couvert d'hydrogène, l'effet résultant est qu'il n'y a plus de différence de potentiel et que le courant s'arrête (2).

## ZINC AMALGAMÉ

Nous avons supposé jusqu'ici que tous les métaux employés étaient chimiquement purs. Mais le zinc ordinaire du commerce, dont on fait les plaques des piles, n'est pas pur, et contient beaucoup de parcelles de fer et d'autres métaux. Si du zinc ordinaire est mis dans l'acide, chacune de ces parcelles de fer forme avec le zinc qui l'entoure un petit élément indépendant dont le circuit est toujours fermé, que le circuit principal soit ouvert ou fermé. Les courants produits dans ces petits éléments ne profitent en rien au courant principal, tandis qu'ils usent le zinc très rapidement.

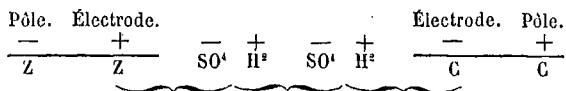
Le prix du zinc chimiquement pur empêche de s'en

(1) L'action est représentée par l'équation chimique suivante :



qui exprime que 1 atome de zinc se substitue à 2 atomes d'hydrogène, en transformant l'acide sulfurique en sulfate de zinc. — Miller, *Elements of Chemistry*, vol. II, p. 50.

(2) En regardant l'hydrogène comme *électro-positif* et le radical  $SO^4$  comme *électro-négatif*, on peut figurer l'action comme il suit, les parenthèses indiquant l'arrangement moléculaire qu'elle produit :



J. R.

servir; aussi emploie-t-on un autre procédé qui, adopté d'abord comme expédient, a été reconnu aussi efficace à tous égards que l'emploi du zinc pur.

Il consiste à couvrir le zinc de mercure, ce que l'on fait en plongeant pendant quelques minutes le zinc dans l'acide sulfurique ou chlorhydrique étendu, de façon à nettoyer chimiquement sa surface, et ensuite en versant dessus du mercure. Le mercure se combine aussitôt avec la surface du zinc, qui apparaît tout entière brillante comme de l'argent. Le zinc ainsi « amalgamé » n'est pas attaqué par l'acide sulfurique étendu, à moins qu'il ne fasse partie d'un circuit galvanique fermé. On ne connaît pas exactement l'action du mercure. Il agit probablement en recouvrant le zinc et les parcelles de fer d'une couche d'un seul et même métal.

#### VIS D'ATTACHE (ou bornes-vis)

Les vis d'attache sont des vis de pression destinées à attacher les fils de communication à un appareil quelconque.

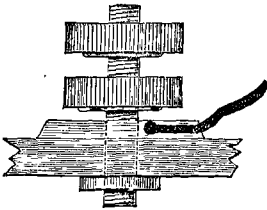


FIG. 65.

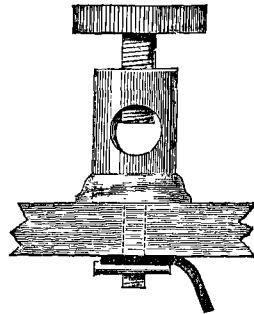


FIG. 66.

On en fait de bien des formes, mais les plus communément employées sont représentées aux figures 65 et 66. Dans la



figure 66, le fil passe dans le trou, et la vis, en tournant, le serre. Cette forme est très commode pour tous les appareils ordinaires. Dans la forme de la figure 65, le fil est recourbé autour de la vis et serré; c'est cette forme que l'on emploie pour les appareils de mesure: elle donne peut-être un meilleur contact. Cette forme est souvent munie d'un autre écrou, pour permettre d'attacher un second fil sans déranger le premier (bornes à contre-écrou).

#### PILES CONSTANTES

Pour faire un élément de pile constant, il est nécessaire d'avoir un moyen de débarrasser de l'hydrogène la plaque positive ou plaque de cuivre.

#### ÉLÉMENT DE SMÉE (fig. 67)

Dans l'élément de Smée, dont la figure 67 est une section, les plaques sont en zinc et en argent platiné, c'est-à-dire en argent dont la surface est couverte d'un dépôt grenu de platine pulvérulent. Comme ce dépôt présente une multitude de pointes, l'hydrogène s'en détache plus aisément que d'une surface lisse. L'argent étant bien plus cher que le zinc, on met généralement la lame d'argent entre deux plaques de zinc, de façon à utiliser les deux côtés de la plaque d'argent et à obtenir une plus grande surface. Car si la différence de potentiel est indépendante des dimensions des plaques, nous montrerons qu'il n'en est pas de même de la quantité d'électricité produite.

#### ÉLÉMENT AU BICHROMATE DE POTASSE (fig. 68)

Dans cet élément, les plaques sont faites de charbon et de zinc, et le liquide est de l'acide sulfurique étendu et sa-

turé (1) de bichromate de potasse. L'action du bichromate de potasse est d'empêcher entièrement l'hydrogène d'arriver aux plaques de charbon (2). Comme cet élément ne donne pas d'odeur, on l'emploie beaucoup pour travailler sur la table du laboratoire, quand on a besoin d'un courant

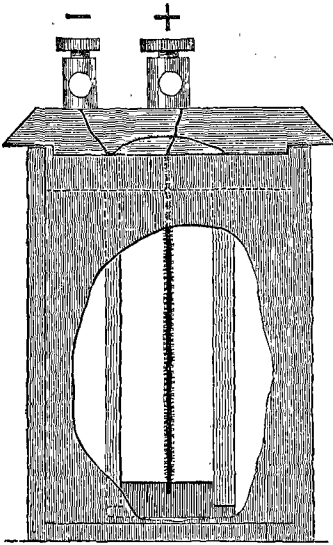


FIG. 67.

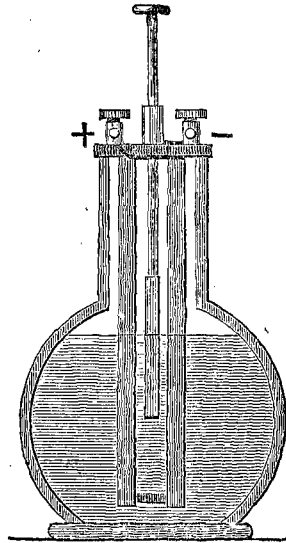
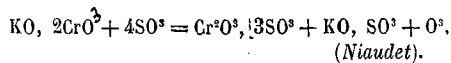


FIG. 68.

d'énergie moyenne et de courte durée. On lui donne généralement la forme de flacon, dont on voit la section sur la figure 68. Une bouteille de verre à panse sphérique et à goulot cylindrique reçoit le liquide. Le charbon, qui, bien

(1) Environ 210 grammes de bichromate saturent un litre d'eau. On dissout le bichromate dans l'eau bouillante, et on ajoute l'acide après refroidissement. Quand la solution est refroidie de nouveau, elle est prête à servir.

(2) Voici la réaction chimique :



qu'on ne l'appelle pas un métal, est un excellent conducteur, provient des dépôts qui se forment dans le col des cornues pendant la fabrication du gaz d'éclairage. Comme il est très dur, on ne peut guère l'amener à sa forme qu'en l'usant; on a de la peine à le couper. L'élément en contient deux plaques, allant du fond au haut du flacon, où elles sont fixées à un morceau d'ébonite formant couvercle.

Une plaque de zinc, n'ayant que la moitié de la longueur des plaques de charbon, est fixée à une tige à coulisse, de façon que, tout en restant toujours entre les charbons, elle peut être mise dans la panse ou dans le goulot du flacon. Celui-ci n'est rempli que jusqu'au bas du goulot, de sorte que l'on peut retirer le zinc entièrement en dehors du liquide quand on ne se sert pas de la pile.

Au couvercle d'ébonite sont fixées deux vis d'attache reliées, par des bandes métalliques, l'une à la tige à coulisse qui porte le zinc et l'autre aux plaques de charbon.

#### ÉLÉMENTS A DEUX LIQUIDES

Jusqu'à présent nous n'avons décrit que des éléments à un seul liquide. Dans tous ces éléments, les composés formés par l'hydrogène reviennent sur la plaque de zinc et ralentissent son attaque. C'est pour obvier à cet inconvénient que l'on a fait des éléments à deux liquides. Les deux principaux types sont ceux de Grove et de Daniell. Le dernier est employé lorsque l'on veut un courant constant d'intensité modérée capable de durer des jours, des semaines ou des mois. Le premier sert, quand on veut, pour quelques heures, un courant très énergique.

#### ÉLÉMENT DE GROVE (fig. 69)

Dans l'élément de Grove, les métaux employés sont le  
GORDON. *Électricité.*

zinc et le platine ; les liquides, de l'acide nitrique fort et de l'acide sulfurique étendu. Un vase fait de terre *poreuse* peu épaisse est rempli d'acide nitrique et contient la plaque de platine. Ce vase est placé à l'intérieur d'un autre vase, généralement en ébonite, contenant le zinc et l'acide sulfurique étendu. Le vase de terre poreuse, quand il est hu-

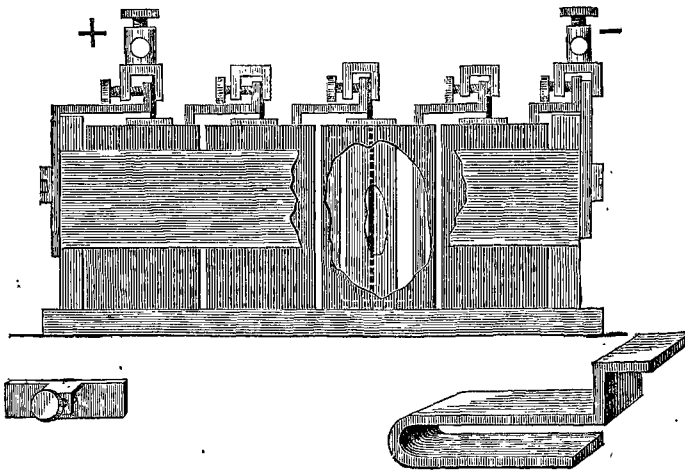


FIG. 69.

mide, laisse à l'électricité un libre passage, tandis qu'il empêche presque entièrement le mélange des liquides. Sur la figure 69, qui montre la disposition des plaques, on a représenté plusieurs éléments reliés ensemble, mais, pour l'instant, le lecteur est prié de borner son attention à un seul. Dans cet élément, l'hydrogène, quel que soit l'endroit où il se dégage, ne peut se former qu'au milieu de l'acide sulfurique, et il doit traverser l'acide nitrique pour atteindre le platine ; ou même, s'il n'est mis en liberté que sur le platine, il s'y trouve encore en contact avec l'acide nitrique.

L'hydrogène et l'acide nitrique se combinent aussitôt, formant des acides nitreux et de l'eau qui restent tous deux en solution dans l'acide libre (1).

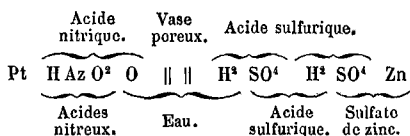
On voit au-dessous de la figure 69 une des plaques de zinc et une des vis de serrage servant à maintenir le platine serré contre le zinc.

La pile de Grove est la seule combinaison voltaïque dont on fasse usage pour la production de la lumière électrique ou pour les autres applications exigeant une grande force.

## ÉLÉMENT DE BUNSEN (2)

L'élément de Bunsen est de construction semblable à celui de Grove, à cela près que la plaque plongée dans l'acide nitrique est en charbon au lieu de platine. L'impossibilité de couper le charbon en feuilles minces a obligé à faire les vases plus grands. Ils sont généralement circulaires. Cet élément n'est pas aussi puissant que celui de Grove et,

(1) L'action chimique peut être représentée par la formule suivante. L'arrangement des molécules, avant la réaction, est représenté par les parenthèses supérieures; après la réaction, par les parenthèses inférieures.



On voit que le platine n'intervient pas dans l'action chimique. — Miller, *Elements of Chemistry*, vol. I, p. 479.

Comme il a figuré 2 molécules d'acide sulfurique, le docteur Miller paraît avoir été d'avis que l'action qui s'exerce entre le zinc et l'acide sulfurique est distincte de celle qui s'exerce entre les acides sulfurique et nitrique.

(2) Les éléments de Grove et de Bunsen donnent tous deux des fumées nitreuses qui sont malsaines et détériorent les instruments. Aussi ne doit-on pas les mettre dans le laboratoire de physique, mais sous un hangar ou dans une cave séparée, qu'on relie au laboratoire par des fils de cuivre isolés.

quoique les premiers frais soient bien moindres, son emploi est incommode et plus dispendieux.

ÉLÉMENT DANIELL (fig. 70, 71, 72, 73)

Dans cet élément, les métaux employés sont le zinc et le cuivre. Le premier est ordinairement plongé dans l'acide sulfurique étendu ; le second, dans une solution saturée de sulfate de cuivre. Une forme très commode d'élément est représentée sur les figures 70 et 71. Le zinc, en forme de tige,

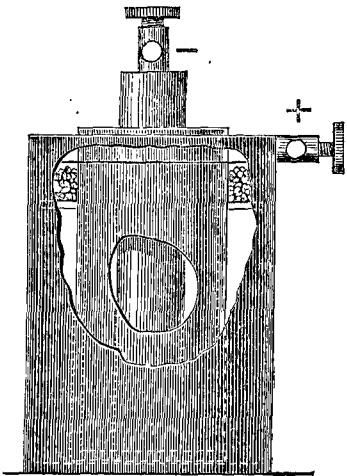


FIG. 70.

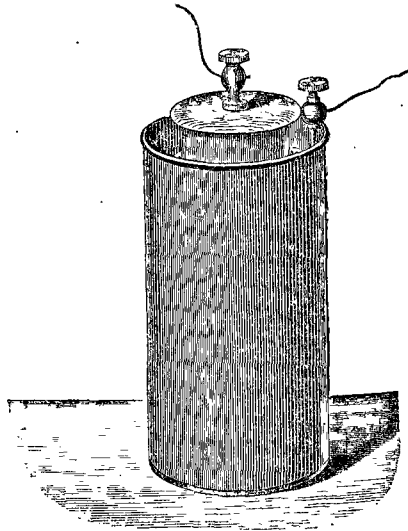


FIG. 71.

est placé à l'intérieur du vase poreux, et le vase extérieur est en cuivre et fait l'office de l'autre plaque.

A l'intérieur du vase de cuivre et près du haut, se trouve une tablette de cuivre percée de nombreux trous : elle sert à tenir en place le vase poreux, et l'on y dépose un certain nombre de cristaux de sulfate de cuivre. Le vase est rempli

d'une solution saturée du même sel, c'est-à-dire d'eau tenant en dissolution la quantité la plus grande de sulfate de cuivre qu'elle puisse prendre.

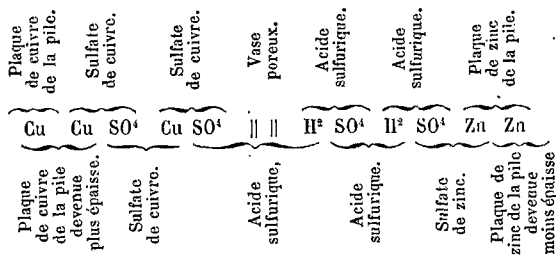
Dans le vase intérieur, on met une tige de zinc, et, suivant l'usage auquel on destine la pile, de l'acide sulfurique étendu, de l'eau et du sel ou de l'eau pure ; cette dernière disposition diminue beaucoup l'énergie de la pile, mais augmente sa constance.

Dans l'élément d'après lequel a été dessinée la figure 71, le cylindre de cuivre a 15 centimètres de haut et 7<sup>c</sup>,5 de diamètre.

Quand le circuit est fermé, l'hydrogène, qu'il vienne du zinc vers le cuivre à travers le vase poreux, ou qu'il soit mis en liberté sur le cuivre, rencontre la solution de sulfate de cuivre, et, lui enlevant 1 atome de soufre et 4 atomes d'oxygène, forme de l'acide sulfurique, et met en liberté du cuivre métallique qui se dépose sur la plaque de cuivre. En même temps il se forme du sulfate de zinc dans le vase à acide sulfurique.

Ainsi, pendant que la pile travaille, l'épaisseur de la plaque de zinc diminue, et celle de la plaque de cuivre augmente (1).

(1) L'équation chimique suivante représente le changement qui se produit : les parenthèses au-dessus de la ligne représentent l'arrangement moléculaire avant la réaction ; celles du dessous, l'arrangement après la réaction.



(Miller, *Elements of Chemistry*, vol. I, p. 477).

En regardant l'équation mise en note, on voit que pour chaque molécule de cuivre déposée sur la plaque, il se détruit une molécule de sulfate de cuivre, et la solution s'affaiblit. Aussitôt alors, une partie du sulfate de cuivre qui est sur la tablette se dissout; la partie du liquide qui l'a dissoute devient plus dense que le reste, tombe au fond, et une nouvelle portion de solution affaiblie vient en contact avec le

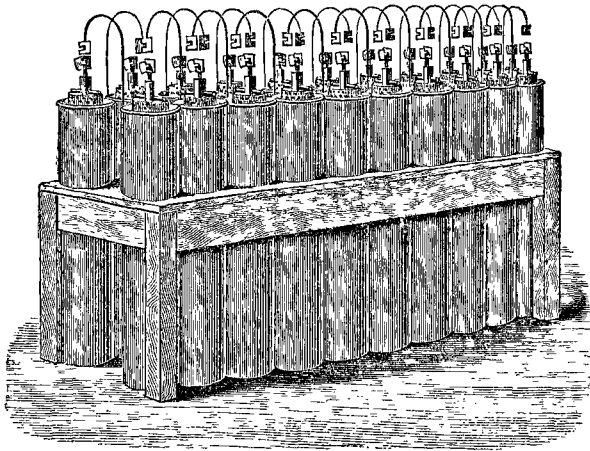


FIG. 72.

sulfate de cuivre solide : et cette circulation continue jusqu'à ce que le liquide soit de nouveau saturé.

La puissance de cet élément diminue régulièrement jusqu'à ce que l'acide étendu soit saturé de sulfate de zinc : alors il reste constant pendant très longtemps. Aussi, quand on attache plus de prix à la constance qu'à la force de la pile, a-t-on l'habitude de saturer la solution de sulfate de zinc, avant de commencer à travailler.

Les figures 72 et 73 sont dessinées d'après les modèles



originaux de la pile de Daniell, conservés à King's College, où il fut professeur de physique de 1831 à 1845.

Les vases de cuivre représentés sur la figure 72 ont 50 centimètres de haut et 9 centimètres de diamètre.

La figure 73 montre une disposition adoptée pour renouveler constamment la solution acide, de façon à maintenir

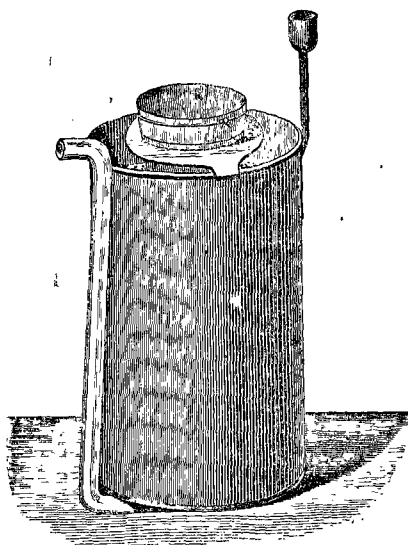


FIG. 73.

sa force constante. L'acide frais arrivait goutte à goutte par le haut de l'appareil, tandis que l'acide déjà employé s'écoulait par le tube de verre placé à gauche. Ce vase a 15 centimètres de haut et 7,5 de diamètre. Le vase poreux est fait de parchemin; on ne voit pas le zinc. A droite est une coupe à mercure, tenant lieu de vis d'attache.

On emploie bien d'autres formes de l'élément Daniell : les diverses modifications ont été introduites en vue d'em-

pêcher le mélange qui se produit à travers les parois du vase poreux, et de diminuer la résistance qu'un pareil vase oppose aux actions électrique et chimique.

PILES DE DENSITÉ — ÉLÉMENT A AUGÉ DE THOMSON  
(fig. 74, 75)

Les modifications de l'élément Daniell ont pris en général la forme de piles de « densité », c'est-à-dire de piles où les plaques sont placées horizontalement, et où les liquides sont maintenus séparés en grande partie, sinon entièrement, par leur différence de densité. Naturellement, le liquide le plus dense est placé au fond. La meilleure forme, et celle qu'on peut prendre pour type des autres, est l'élément à auge de Sir W. Thomson.

La description suivante est tirée de l'*Electricity* du professeur Clerk Maxwell, art. 277, vol. I, p. 327.

« Dans toutes les formes de l'élément Daniell, le résultat

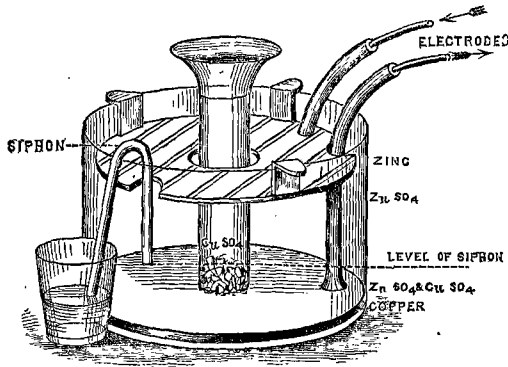


FIG. 74.

final est que le sulfate de cuivre parvient jusqu'au zinc, ce qui détériore la pile. Pour retarder indéfiniment ce ré-

sultat, Sir W. Thomsom (1) a construit un élément Daniell de la forme suivante : Dans chaque élément, la plaque de cuivre est placée horizontalement au fond, et on verse par-dessus une solution saturée de sulfate de zinc. Le zinc est en forme de gril, et placé horizontalement près de la surface de la solution. Un tube de verre est placé verticalement dans la solution, son extrémité inférieure juste au-dessus de la plaque de cuivre. On verse dans ce tube des cristaux de sulfate de cuivre; en se dissolvant dans le liquide, ils

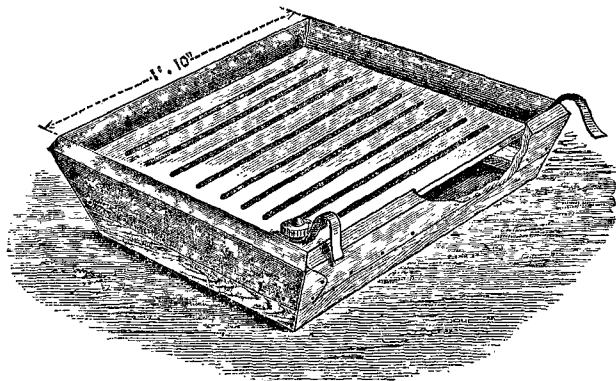


FIG. 75.

forment une solution de densité plus grande que celle du sulfate de zinc seul, et qui, par suite, ne peut arriver au zinc que par diffusion. Pour retarder ce phénomène de diffusion, un siphon, formé d'un tube de verre rempli par une mèche de coton, est placé, l'un des bouts à mi-distance du zinc et du cuivre, l'autre bout dans un vase extérieur à l'élément, de sorte que le liquide est aspiré lentement à peu près vers le milieu de sa hauteur. Pour le remplacer, on ajoute par

(1) *Proc. Roy. Soc.*, XIX, 1870-71, p. 253.

le haut, quand il en est besoin, de l'eau ou une solution faible de sulfate de zinc. De cette manière, la plus grande partie du sulfate de cuivre qui s'élève à travers le liquide par diffusion, est enlevée par le siphon avant d'atteindre le zinc, et le zinc est entouré d'un liquide à peu près pur de sulfate de cuivre et animé dans l'élément d'un mouvement très lent de haut en bas, qui retarde encore le mouvement de bas en haut du sulfate de cuivre. Pendant le travail de la pile, le cuivre se dépose sur la plaque de cuivre, et  $\text{SO}^4$  se dirige lentement à travers le liquide vers le zinc, avec lequel il se combine en formant du sulfate de zinc. Ainsi, le liquide du fond devient moins dense, par le dépôt du cuivre, et celui du haut devient plus dense par l'addition de zinc. Pour empêcher que cette action ne change l'ordre de densité des couches et ne produise dans le vase de l'instabilité et des courants visibles, on doit avoir soin de maintenir le tube bien garni de cristaux de sulfate de cuivre, et d'alimenter la pile par le dessus avec une solution de sulfate de zinc assez étendue pour être plus légère que toute autre couche de liquide qui se trouve dans l'élément. »

La figure 74 représente un modèle de démonstration, et la figure 75 est dessinée d'après le modèle d'élément généralement employé. L'auge, dans la figure 75, a 55 centimètres de côté.

#### ÉLÉMENT LECLANCHÉ (fig. 76)

L'usage de cet élément a pris une grande extension dans la télégraphie. Il consiste en zinc et charbon séparés par un vase poreux : le zinc est entouré d'une solution de sel ammoniac, et le charbon d'un mélange d'oxyde de noir de manganèse et de charbon en poudre. Le vase qui contient

cette poudre est rempli d'eau. Cet élément a peu de puissance, mais, pour un travail discontinu, il conserve son

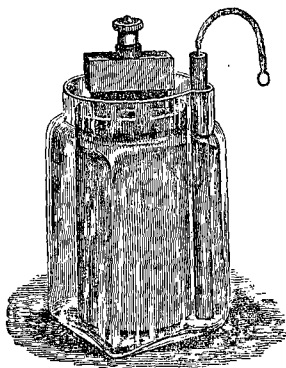


FIG. 76.

activité pendant plusieurs années, sans exiger d'autre soin que de remplir les vases d'eau de temps en temps (1).

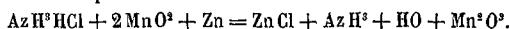
#### ÉLÉMENT AU BICHIROMATE A DEUX LIQUIDES

Dans cet élément, comme dans la forme à un seul liquide, on emploie du zinc et du charbon. Mais le charbon est placé dans un vase poreux et entouré d'une solution saturée de bichromate de potasse dans l'eau seulement; tandis que le zinc est placé dans le vase extérieur, au milieu d'acide sulfurique faible (environ 20 d'eau pour 1 d'acide). Cette pile est d'un usage étendu en télégraphie.

#### ÉLÉMENT AU CHLORURE D'ARGENT (fig. 77, 78)

Voici la description que donne M. Warren de la Rue (2)

(1) L'action chimique est la suivante :



(2) *Proc. Roy. Soc.*, XXIII, 1874-75, p. 356; et *Phil. Trans.*, 1877, vol. CLXIX, p. 155. — Voir aussi *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, vol. XIII, p. 433 (1878).

de sa grande pile constante à chlorure d'argent, dont le nombre d'éléments a atteint successivement 1080 en 1874, 3240 en 1875, 8040 en 1877, puis 11 000 et enfin aujourd'hui (1880) 25400.

Tout d'abord la pile était composée d'éléments en forme de tubes à fond plat fermés avec des bouchons de caoutchouc vulcanisé percés d'un trou excentrique pour laisser passer une baguette de zinc amalgamé : au fond du tube était déposé du chlorure d'argent en poudre, sur lequel on versait une dissolution de sel marin, renfermant 25 grammes de chlorure de sodium par litre d'eau. Un fil d'argent aplati, communiquant avec le chlorure d'argent en poudre, passait entre le bouchon et la paroi du tube et était couvert d'une feuille mince de gutta-percha, pour le protéger contre l'action du soufre contenu dans le caoutchouc vulcanisé du bouchon. La communication était établie entre les éléments consécutifs en coiffant la tige de zinc d'un élément d'un bout de tube de caoutchouc, dans lequel le fil d'argent de l'élément suivant était serré contre le zinc. Un cylindre de parchemin végétal entourait le fil d'argent pour l'empêcher de toucher le zinc. La fermeture des tubes par un bouchon empêche l'évaporation de l'eau.

Avec 1080 éléments ainsi construits, la distance explosive (1) dans l'air entre des électrodes de cuivre, terminées l'une en pointe et l'autre en surface plane, était de 0,096 à 0<sup>mm</sup>,1. La plus grande distance que le courant de la pile traversait, d'une façon continue, entre les électrodes, dans le vide résiduel obtenu avec l'acide carbonique, était de 30<sup>e</sup>,48.

L'amalgamation du zinc a l'avantage d'empêcher l'adhé-

(1) Voir ch. xxxiv.

rence énergique de l'oxychlorure de zinc qui se forme dans la pile, mais elle a l'inconvénient grave d'amalgamer peu à peu, et finalement de couper le fil d'argent (1); il est préférable de ne pas amalgamer le zinc quand la pile doit être en action pendant une ou plusieurs années. Pour diminuer la résistance, on a employé du chlorure d'argent fondu en forme de cylindre, et la solution de sel marin a été remplacée par une solution de chlorhydrate d'ammoniaque. Enfin des bouchons de paraffine ont été substitués aux bouchons de caoutchouc, qui faisaient souvent fendre les tubes. La figure 77 représente une pile de 20 éléments sous la dernière forme adoptée. On a dessiné à part les

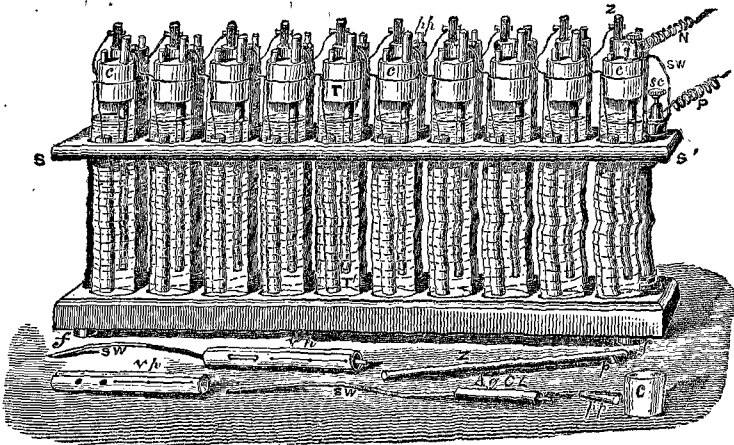


FIG. 77.

différentes parties dont elle se compose : la tige de zinc Z, le cylindre de chlorure d'argent AgCl, fondu sur le fil d'argent applati SW, le cylindre de parchemin végétal Vp

(1) On peut remplacer l'argent par le platine, mais ce serait très dispendieux.

ouvert aux deux bouts, le même en place autour du cylindre de chlorure d'argent, enfin le bouchon en paraffine *c*, percé de deux trous par l'un desquels passe la tige de zinc et dont l'autre sert à l'introduction des liquides. Le parchemin a pour but d'empêcher le contact du zinc et du chlorure : il est enroulé plusieurs fois sur un moule pour former un cylindre; puis collé sur le bord par un vernis à la gomme laque et serré par un fil pour empêcher qu'il se déroule.

Les vases sont des tubes de verre de 14 centimètres de hauteur et 2<sup>o</sup>,8 de diamètre; les fils d'argent sont des lames de 20<sup>o</sup>,32 de longueur, de 1<sup>mm</sup>,27 de largeur et de 0<sup>mm</sup>,23 d'épaisseur, pesant chacune 0<sup>gr</sup>,88. Les baguettes de chlorure d'argent fondu ont 5<sup>o</sup>,4 de long, 7<sup>mm</sup>,6 de diamètre, et pèsent 12<sup>gr</sup>,97. Les tiges de zinc ont 15<sup>o</sup>,24 de long, 5<sup>mm</sup>,6 de diamètre, et sont percées, à la partie supérieure, d'un trou de 2<sup>mm</sup>,5 de diamètre, dans lequel le fil d'argent de l'élément voisin est introduit et serré par une goupille.

Le liquide employé est une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque, renfermant 23 grammes de sel par litre d'eau. Les vases peuvent être clos sans craindre un dégagement d'hydrogène, en soudant le bouchon de paraffine à l'aide d'un fer chaud, le long de la paroi du verre et autour de la tige.

Les vases d'une série de 20 éléments sont groupés dans une sorte de râtelier à éprouvettes SS' porté par 4 pieds d'ébonite *f*, de 1<sup>o</sup>,2 de hauteur.

Les fils N et P, recouverts de gutta-percha, permettent de relier chaque série avec la suivante : le fil P est attaché à la vis *sc*, isolée sur de l'ébonite.

La figure 78 représente une pile de 1200 éléments dans



une armoire, posée sur un des pieds en ébonite E, dont les dimensions intérieures sont 1<sup>m</sup>,409 de hauteur, 1<sup>m</sup>,067 de largeur et 0<sup>m</sup>,4317 de profondeur.

La pile fonctionne d'autant mieux qu'on l'emploie plus

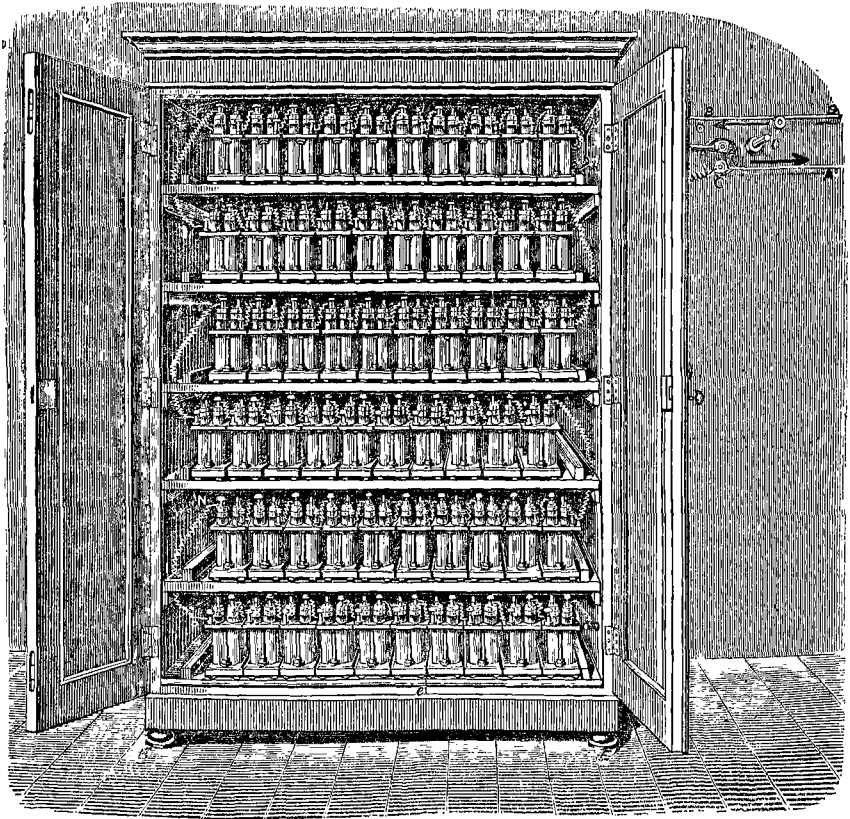


FIG. 78.

fréquemment; quand elle reste longtemps en repos, il se forme une couche très adhérente d'oxychlorure de zinc qui augmente beaucoup la résistance de chaque élément;

mais cet inconvénient est négligeable quand il s'agit d'étudier les distances explosives ou de faire des expériences avec des tubes à gaz raréfiés.

L'intensité du courant est remarquablement constante : la force électro-motrice moyenne de l'élément est 1,03 volt.

La résistance intérieure dépend de la distance du zinc au chlorure d'argent, et surtout de l'état du chlorure, suivant qu'il est en poudre ou en baguettes fondues. La résistance des éléments à chlorure en poudre est d'environ 15 ohms; elle est seulement de 5 ohms quand le chlorure est fondu. Toutefois cette résistance augmente graduellement et d'une manière continue à cause du dépôt adhérent d'oxychlorure qui se forme sur le zinc (1). Quand ce dépôt diminue beaucoup l'intensité du courant dans un court circuit, on remet facilement la pile en état en grattant les tiges de zinc (2).

En remplaçant le chlorure d'argent par du bromure d'argent, la force électro-motrice est de 0<sup>volt</sup>,908; avec l'iode d'argent elle est de 0<sup>volt</sup>,758. En accouplant en série 3 éléments au chlorure et 1 au bromure on a une pile dont la force électro-motrice par élément est sensiblement 1 volt.

#### ÉLÉMENT DE POGGENDORFF

La description suivante est empruntée au livre de

(1) Ce dépôt correspond à la formule  $15Z, O, 3Z, Cl^2 + 20H^2O$  : il n'est pas particulier à la pile à chlorure d'argent, il se forme aussi dans toutes les piles où le zinc plonge dans une dissolution d'un chlorure neutre (chlorure de zinc, chlorure de sodium, chlorhydrate d'ammoniaque).

(2) Un moyen très expéditif de remettre la pile en état consiste à introduire dans chaque élément, qui renferme 55 centimètres cub s de liquide, 1 centimètre cube d'une dissolution d'acide chlorhydrique de densité égale à 1,16.

M. Niaudet sur les piles (1). Je n'ai, par moi-même, aucune expérience pratique de cette pile.

La forme de l'élément est la même que celle d'un Bunsen. Une tige de charbon est placée dans le vase poreux, un cylindre de zinc dans le vase extérieur. Dans ce vase est un mélange de 12 parties en poids d'acide sulfurique et de 1 partie d'eau.

Dans le vase intérieur est un mélange de :

En poids	{	100 parties d'eau,
		12 — de bichromate de potasse,
		25 — d'acide sulfurique.

On dit que cette pile a une force électromotrice très grande, supérieure à celle d'un Grove, et double d'un Daniell (2).

#### ÉLÉMENT DE BYRNE

Le docteur Byrne, de Brooklyn (États-Unis d'Amérique), a inventé une pile dont les métaux sont le platine et le zinc, et la solution la même que celle de la pile au bichromate (p. 432). Elle est reliée à une soufflerie à chalumeau, et on force de l'air dans le liquide tout le temps que la pile fonctionne, ce qui enlève l'hydrogène. M. Ladd, qui a décrit cette pile (3), dit que la quantité d'électricité produite est très grande.

J'ai maintenant décrit, je crois, les principaux types de piles d'un emploi commun. Mais il y a un nombre immense d'autres éléments, différant par divers détails de ceux

(1) Niaudet, *Traité élémentaire de la pile électrique*; 2<sup>e</sup> édition, p. 201. (Baudry, Paris, 1880).

(2) Voir la table ci-après.

(3) *Report Brit. Assoc.*, Dublin, 1878, p. 448.

GORDON. Électricité.

décrits. On trouvera ces renseignements dans les ouvrages de télégraphie et dans le livre de M. Niaudet, déjà cité plus haut (p. 449).

#### ÉLÉMENT ÉTALON DE LATIMER CLARK

Le 19 juin 1873 (1), M. Latimer Clark fit à la Société Royale une communication relative à un « élément étalon », c'est-à-dire un élément dont la force électromotrice est toujours constante. On a rencontré de grandes difficultés pour établir une unité pratique de force électromotrice, parce qu'il n'y a pas seulement des différences dans la force électromotrice de différents éléments de même construction, mais parce que la force électromotrice d'un même élément varie aussi d'un jour à l'autre.

Avec « l'élément étalon », tant qu'on ne l'emploie pas à produire un courant, la différence de potentiel des pôles reste absolument constante. La différence la plus grande que l'on ait observée, pendant une période de plusieurs mois, au cours d'une série de comparaisons faites entre différents modèles de cet élément, n'excédait pas  $1/1000$  de la force électromotrice totale, et même il paraît que cette différence pouvait être attribuée à une différence de température accidentelle.

#### TEMPÉRATURE

On prend pour étalon la force électromotrice de l'élément à  $15^{\circ},5$  C.

On a reconnu que cette force diminue quand la température s'élève, et que dans un intervalle de 10 degrés au-dessus et au-dessous de  $15^{\circ},5$ , le taux de la variation est d'environ 0,6 pour 100 pour chaque degré centigrade.

(1) *Phil. Trans.*, 1874, p. 1.

## CONSTRUCTION

« Dans cette pile, on emploie, comme élément négatif, du mercure pur, que l'on couvre d'une pâte obtenue en faisant bouillir du sulfate de mercure dans une solution complètement saturée de sulfate de zinc; l'élément positif est constitué par du zinc purifié par distillation et reposant sur la pâte.

« La meilleure manière de construire cet élément est de dissoudre du sulfate de zinc dans l'eau distillée bouillante, jusqu'à saturation. Après refroidissement, l'on décante la solution de dessus les cristaux, et on la mêle à du sulfate de mercure pur, de façon à obtenir une pâte épaisse, que l'on fait ensuite bouillir pour chasser l'air. Cette pâte est versée sur du mercure que l'on a chauffé préalablement dans un vase de verre convenable; un morceau de zinc pur est alors suspendu dans la pâte; il est bon de fermer hermétiquement le vase avec de la cire de paraffine fondue. Le contact avec le mercure est établi par un fil de platine qui descend dans un tube de verre soudé à l'intérieur du vase et qui plonge au-dessous de la surface du mercure; ou, mieux encore, par un petit tube de verre soufflé sur le côté du vase et s'ouvrant près du fond. Le sulfate mercurieux ( $\text{Hg}^2\text{SO}^4$ ) peut être obtenu dans le commerce (1); on peut d'ailleurs le préparer en dissolvant un excès de mercure dans de l'acide sulfurique chaud, à une température inférieure au point d'ébullition; le sel, qui est une poudre blanche presque insoluble, doit être lavé à l'eau distillée: on doit avoir soin de l'obtenir bien exempt de sulfate mer-

(1) M. Clark se l'est procuré chez MM. Hopkins et Williams, 5, New Cavendish street.

curique (bisulfate), dont on reconnaît la présence à ce que le mélange tourne au jaune par une addition d'eau. Il est essentiel de laver soigneusement le sel, la présence d'acide libre ou de bisulfate produisant un changement considérable dans la force électro-motrice de l'élément. »

#### PILES DE PLUSIEURS ÉLÉMENTS

Nous avons dit que, quand le circuit est ouvert (c'est-à-dire quand les pôles ne sont pas reliés), les potentiels des pôles diffèrent d'une quantité qui est à peu près constante pour chaque espèce d'élément. Souvent on a besoin d'une différence de potentiel plus grande que celle que peut donner un seul élément. On l'obtient en réunissant un certain nombre d'éléments en *série*, c'est-à-dire en reliant le pôle positif de l'un au pôle négatif du suivant, et ainsi de suite : plusieurs *éléments* ainsi réunis forment ce que l'on appelle une *pile voltaïque*. La figure 69 représente une pile de 4 éléments Grove : on voit que le zinc de chaque élément est prolongé latéralement jusqu'à l'élément suivant, contre le platine duquel il est serré. La seule raison pour laquelle on a choisi les plaques de zinc de préférence à celles de platine, pour les prolonger ainsi, est, d'une part, la cherté de ce dernier métal, et, d'autre part, cette considération que, vu l'inaltérabilité du platine, il suffit de donner aux plaques de ce métal l'épaisseur d'une feuille de papier à lettres, et qu'alors, naturellement, elles ne sont pas très rigides.

Ainsi, les pôles sont reliés deux à deux, sauf un de chacun des éléments extrêmes. Ces deux pôles libres sont appelés les « pôles de la pile ».

Leur différence de potentiel est égale à autant de fois la différence de potentiel des pôles d'un seul élément qu'il

y a d'éléments dans la pile. Ainsi, dans une pile de 4 éléments, si l'on suppose la différence de potentiel des pôles d'un même élément représentée par 10, cette différence entre les pôles de la pile sera représentée par 40; par 50 s'il y a 5 éléments, et ainsi de suite.

Supposons, en effet, que le pôle négatif du premier élément (celui de droite sur la figure 69) soit mis à la terre; son potentiel est zéro. Le potentiel du pôle positif sera alors 10. Mais le pôle positif du premier élément est en communication métallique avec le pôle négatif du second, et, par suite, leurs potentiels sont égaux (1) : le potentiel du pôle négatif du deuxième élément est donc 10. Mais la différence de potentiel commune étant 10, le pôle positif du deuxième élément est au potentiel 20. Celui-ci est en communication métallique avec le pôle négatif du troisième élément; le potentiel du pôle positif de cet élément sera donc 30, celui du pôle positif du quatrième élément sera 40 : la différence de potentiel d'une pile de 4 éléments est donc 40, ou 4 fois la différence entre les pôles de chaque élément (2).

(1) Si nous admettons que la différence de potentiel s'établit au contact des métaux, nous devons regarder comme égaux les potentiels des deux métaux dans un même élément, et la démonstration subsiste.

(2) DE L'ENTRETIEN D'UNE PILE DE GROVE. — Lorsque l'on se sert souvent d'une pile de Grove, il convient de prendre des dispositions spéciales pour la maintenir en bon état et en faciliter le montage et le démontage. L'auteur a adopté avec succès les dispositions suivantes :

Les zincs sont conservés dans un grand « plat » de terre, plein d'eau fortement chargée de soude commune. Les vis de serrage sont dans un pot plein de la même solution, les vases poreux dans une grande terrine pleine d'eau pure.

Pour commencer à monter la pile, on retire de l'eau autant de vases poreux que l'on en a besoin, et on les met à égoutter le fond en l'air. Les vases d'ébonite sont remplis à peu près à moitié d'acide sulfurique étendu; les zincs sont retirés de la soude, et le côté qui doit être serré contre le platine

## EFFETS DU COURANT ÉLECTRIQUE

## EFFETS CALORIFIQUES

Le courant électrique chauffe les fils qu'il traverse. La quantité de chaleur dépend de la longueur, de la grosseur et de la nature du fil, et de l'intensité du courant (voy. chap. XLII).

## EFFETS CHIMIQUES

Le courant électrique, en traversant certaines dissolutions de substances chimiques composées, les décompose

est plongé quelques instants (sans le rincrer) dans l'acide étendu, puis dans le mercure, et frotté avec une vieille brosse à dents.

On obtient ainsi une surface métallique propre. Les surfaces des deux vis de serrage *extrêmes* sont traitées de même. Les zincs sont alors mis dans les vases d'ébonite, les vases poreux remplis d'acide nitrique fort et placés à l'intérieur des zincs. Les platines sont mis en place, serrés comme sur la figure 69, et les vases d'ébonite achevés de remplir avec de l'acide sulfurique étendu. La pile est alors prête à travailler. Elle ne doit pas être placée dans le laboratoire, mais dans une chambre de piles spéciale, les fumées étant à la fois malsaines et susceptibles de détériorer les instruments.

Quand on démonte la pile, on jette d'abord les vis dans leur pot; ensuite les platines sont lavés sous un robinet et placés dans leur boîte, sans les essuyer. Les vases poreux sont vidés dans une bombonne garnie d'un large entonnoir, et mis dans la terrine à eau. Enfin, les zincs sont mis dans la soude. On laisse l'acide sulfurique dans les vases d'ébonite.

Comme toutes les opérations de démontage peuvent être faites d'une seule main, on gagne beaucoup de temps à travailler des deux mains, sur deux éléments à la fois. Un opérateur habile doit pouvoir monter en six minutes environ une pile de 10 éléments de Grove, et la démonter en une minute et demie.

Il n'y a pas d'économie à adopter de petits éléments, car avec eux les acides ne peuvent guère servir qu'une fois, tandis que dans les grands éléments ils peuvent être employés quatre et cinq fois. Les vases de 1<sup>m</sup>,13 avec des platines de 15 centimètres sur 7<sup>m</sup>,5 présentent les dimensions les plus avantageuses.

Des zincs neufs demandent à être amalgamés tous les jours pendant cinq ou six jours, puis une fois par quinzaine, jusqu'à ce qu'ils soient usés. S'il est possible, on persuadera au fabricant de ne mettre dessus aucune espèce de peinture.



en leurs éléments constitutants. Ces actions seront étudiées sous le titre de l'*Électrolyse* (voy. chap. xxxviii).

#### EFFETS MAGNÉTIQUES

On traitera dans le chapitre suivant des effets magnétiques du courant.

#### SIGNE CONVENTIONNEL

Pour éviter de répéter le dessin de la pile, on emploie dans les diagrammes le signe conventionnel figure 79; les lignes fines représentent les zincs, et les lignes épaisses les autres plaques; leur nombre est celui des éléments.



FIG. 79.

#### FORCE ÉLECTROMOTRICE DE DIVERS ÉLÉMENTS

La table suivante est donnée par M. Niaudet (1), pour la comparaison des forces électro-motrices des différents éléments décrits dans son livre. Le volt est l'unité usuelle de force électro-motrice (voy. chap. xx). J'ai réduit en volumes les mesures d'acide sulfurique, exprimées en partie en poids.

(1) *Pile électrique*; 2<sup>e</sup> édition, p. 256.

## FORCES ELECTROMOTRICES

Daniell.	Zinc amalgamé	Acide sulfurique 7 1/2 pour 1.	Solution saturée de sulfate de cuivre.	Cuivre.	Volts. 1,079
»	»	Acide sulfurique 22 pour 1.	»	»	0,978
»	»	»	Azotate de cuivre saturé	»	1,000
»	»	»	Sulfate de cuivre.	»	0,909
»	»	Sulfate de zinc.	»	»	0,955
»	»	1 p. sel marin, 4 p. eau.	»	»	1,060
Grove.	»	Acide sulfurique 7 1/2 pour 1.	Acide nitrique (fumant).	Platine.	1,956
»	»	Eau salée.	Acide nitrique densité 1,33.	»	1,904
»	»	Acide sulfurique 22 pour 1.	»	»	1,810
»	»	Sulfate de zinc.	»	»	1,672
Bunsen.	»	Acide sulfurique étendu.	Acide nitrique.	Charbon.	1,734
Callan.	»	»	»	Fonte.	1,700
Poggendorff.	»	»	Mélange de bichromate.	Charbon.	1,796 2,028
Marié-Davy.	»	Acide sulfurique 22 pour 1.	Pâte de sulfate de mercure.	»	1,524
»	»	Acide sulfurique étendu.	»	»	1,33
Leclanché.	»	Solution de sel ammoniac.	Bioxyde de manganèse.	»	1,481
De la Rue.	Zinc.	Chlorure d'argent.	»	Argent.	1,059
Becquerel.	Zinc amalgamé	Sulfate de zinc.	Sulfate de plomb.	Plomb.	0,55
Niaudet.	»	Sel marin.	Chlorure de chaux.	Charbon.	1,65
Duchemin.	»	»	Perchlorure de fer.	Plomb.	1,541
»	Platine.	Acide sulfurique étendu.	Acide sulfurique étendu.	Platine.	1,79
Planté.	Plomb.	»	»	Plomb.	2,5
Pile étalon de Latimer Clark.	Zinc amalgamé	Sulfate de zinc.	Pâte de sulfate de mercure.	Mercure.	1,457
Vase poreux.					

## APPENDICE AU CHAPITRE XVIII

### AUTRES FORMES DE L'ÉLÉMENT DANIELL

#### 1. — MODÈLE ORDINAIRE

La forme de l'élément Daniell la plus répandue, au moins en France, est celle de la figure 80. Le vase en verre extérieur contient l'eau, dans laquelle plonge un cylindre de zinc, Z : le vase de porcelaine poreuse, placé à l'intérieur du zinc, renferme la solution de sul-

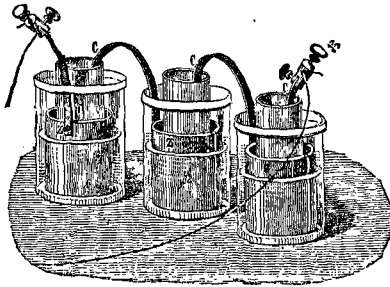


Fig. 80.

fate de cuivre, dans laquelle plonge une lame de cuivre. Quelques cristaux de sulfate de cuivre placés au fond du vase maintiennent la solution saturée. La disposition de la figure 70 est cependant préférable ; car il y a toujours avantage à augmenter la surface de la plaque dépolarisante, c'est-à-dire la plaque formant le pôle positif. L'hydrogène se répartit sur un plus grand nombre de points, ce qui diminue son action et facilite sa recombinaison avec l'oxygène de l'air.

## 2. — ÉLÉMENT DANIELL ÉTALON

A la réunion de la Société des ingénieurs des télégraphes, tenue à Londres le 28 avril 1880 (1), M. Kempe a donné la description d'un élément Daniell étalon, spécialement disposé pour les essais électriques habituels des fils télégraphiques. Le vase extérieur est divisé en deux compartiments : celui de droite renferme, quand l'élément n'est pas en service, le vase poreux contenant la plaque de cuivre et des cristaux de sulfate de cuivre. Le compartiment de gauche est à moitié rempli d'une dissolution demi-saturée de sulfate de zinc. La plaque de zinc est fixée contre une des parois de ce dernier, et son extrémité inférieure affleure la dissolution. Au fond du vase, et juste au-dessous de la plaque de zinc, est ménagée une petite rainure dans laquelle on couche un bâton de zinc. Quand on veut se servir de l'élément, on enlève du compartiment de droite le vase poreux et son contenu pour les porter dans celui de gauche. Le liquide, dont le niveau s'élève par le déplacement, vient baigner la plaque de zinc, et l'élément est prêt à servir. Quand on a fini, on replace le vase poreux dans le compartiment de droite, et le sulfate de cuivre qui a passé dans la solution de zinc est réduit par le bâton de zinc placé au bas et sur lequel le cuivre se dépose. De cette façon la solution de sulfate de zinc reste pure de traces de cuivre.

## 3. — PILE REYNIER

Le 28 juin 1880 (2), M. E. Reynier a présenté à l'Académie des sciences de Paris une pile hydro-électrique comparable, comme énergie, aux couples à acide nitrique, dont elle n'a pas les inconvénients.

Le zinc plonge dans une dissolution de soude caustique ; l'électrode négative, qui est en cuivre, est dépolarisée par une dissolution de sulfate de cuivre, séparée de la liqueur alcaline par une cloison perméable. Le couple ainsi constitué est constant ; sa force électromotrice varie de 1<sup>volt</sup>,3 à 1<sup>volt</sup>,5, selon la concentration des liqueurs.

Les solutions de soude et de sulfate de cuivre ont une conductibilité médiocre : *on diminue leur résistance par l'addition de sels convenablement choisis* (3). D'autre part, on réduit notablement la

(1) *Journal of the Society of Telegraph Engineers*, vol. IX, p. 226. London, Spon, 1880.

(2) *Comptes rendus*, vol. XC, 1880, p. 1550.

(3) Par exemple, en ajoutant à la solution de soude du sulfate de fer et du perchlorure de fer.

résistance de la cloison poreuse en adoptant pour sa fabrication du papier parcheminé. On superpose plusieurs feuilles de ce papier pour modérer sa perméabilité, et on donne aux vases poreux la forme de prismes rectangulaires aplatis, afin de pouvoir donner aux électrodes des surfaces efficaces relativement grandes.

Ces vases prismatiques sont obtenus, sans collage ni couture, par le procédé suivant : au milieu de la feuille de papier parcheminé, on trace la base du prisme : de chacun des côtés de ce polygone, et à



FIG. 81.

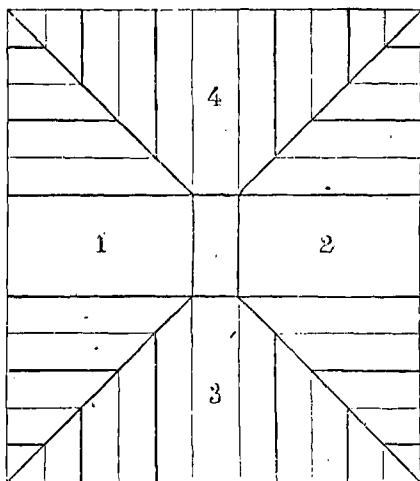


FIG. 82.

une distance égale à la hauteur du vase, on mène des parallèles dont l'ensemble forme un polygone plus grand que l'on découpe. On forme ensuite le vase en plissant les portions placées en dehors du développement géométrique du prisme. Ces plis sont d'ailleurs appliqués et agrafés sur celles des faces des vases qui doivent être peu ou point perméables.

La figure 81 représente en perspective le vase poreux rectangulaire; la figure 82 le montre développé sur le plan de sa base, les plis creux étant indiqués par des traits forts et les plis saillants par des traits fins.

Ce procédé est applicable aux vases prismatiques de base quelconque. La figure 83 montre un vase octogonal obtenu au moyen du développement tracé figure 84.

Le zinc (fig. 85) et le cuivre (fig. 86) de la pile sont découpés sans peine dans les feuilles laminées du commerce; les queues sont relevées dans le morceau, ce qui offre le double avantage d'éviter une



FIG. 83.

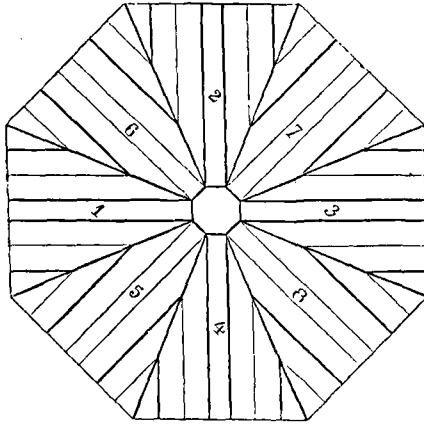


FIG. 84.

soudure et de donner passage à la circulation des liquides. Le cuivre est placé à l'extérieur, comme on le voit dans le dessin d'ensemble (fig. 87)..

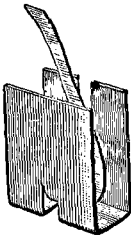


FIG. 85.

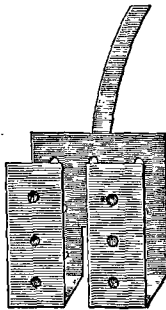


FIG. 86.

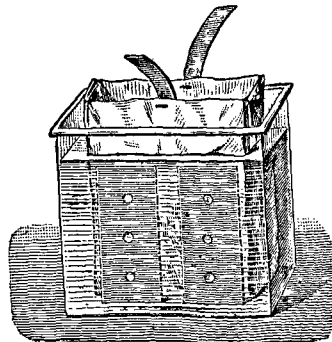


FIG. 87.

La force électromotrice du couple à l'origine est de  $1^{\text{volt}},47$ ; elle descend jusqu'à  $1^{\text{volt}},35$  après une longue fermeture en court circuit.

La résistance est seulement de  $0^{\text{ohm}},075$  pour un modèle de  $0^{\text{m}},20$  de hauteur et 3 litres de capacité.

Le zinc n'est pas amalgamé ; néanmoins il n'est pas attaqué en circuit ouvert par la liqueur alcaline qui le baigne.

Le tableau suivant permet de comparer la nouvelle pile aux couples en usage pour les moteurs électriques et l'éclairage électrique.

	Constantes.	
	E en volts.	R en ohms.
Couple Bunsen, modèle ordinaire rond, hauteur $0^{\text{m}},20$ .	1,80	0,24
Couple Bunsen, modèle Ruhmkorff, hauteur $0^{\text{m}},20$ ...	1,80	0,06
Couple Daniell, grand modèle rond, hauteur $0^{\text{m}},20$ ...	1,06	2,80
Couple horizontal de Thomson, électrodes de 12 d. m. q.	1,06	0,20
Couple cylindrique de Carré, hauteur $0^{\text{m}},60$ .....	1,06	0,12
Couple Reynier, modèle rectangulaire, hauteur $0^{\text{m}},60$ .	1,35	0,075

Cette pile n'émet pas de produits volatils ; par suite, on doit pouvoir régénérer les produits, en faisant traverser les liquides épurés par une quantité d'électricité un peu supérieure à celle qui a été dégagée par la pile. M. Reynier se propose de résoudre économiquement la question par l'emploi de machines magnéto-électriques.

## AUTRES FORMES DE LA PILE DE DENSITÉ

### 1. — ÉLÉMENT MINOTTO

Le vase poreux du Daniell est remplacé par du sable siliceux ou mieux de la sciure de bois. Au fond du vase en verre on place un disque rond de cuivre, auquel est attaché un fil de cuivre recouvert de gutta-percha, qui s'élève verticalement et sert de rhéophore. Sur le cuivre on place des cristaux de sulfate de cuivre, puis, au-dessus, une couche de sable ou de sciure qu'on sépare quelquefois du sulfate par de la toile ou du papier buvard. Enfin, le zinc, sous forme d'un disque assez épais, bombé quelquefois en dessous pour faciliter le dégagement des bulles d'hydrogène, repose sur le sable ou la sciure que l'on imbibe d'eau.

Cette pile est très constante, mais très résistante. Elle est en usage dans l'Inde anglaise ; on s'en sert aussi beaucoup pour les essais des câbles électriques en cours d'immersion.

## 2. — ÉLÉMENT CALLAUD

Cet élément est très répandu dans le service télégraphique français. La figure 88 en représente le petit modèle. Dans un vase en verre de 15 centimètres de hauteur et 11 de diamètre, est placé, à la partie supérieure, un cylindre de zinc de 4,5 de haut et 9 de diamètre ; il est supporté par trois crochets de cuivre rivés qui appuient sur le

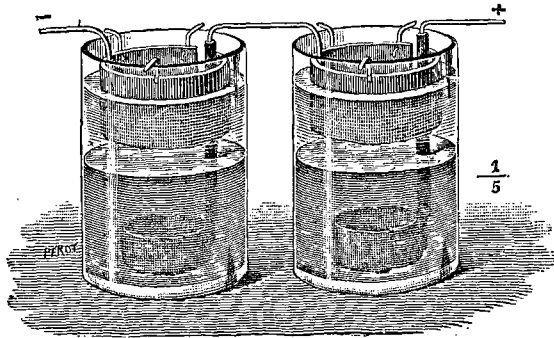


FIG. 88.

bord du verre. L'électrode de cuivre est formée d'une bande mince de 2,4 de haut, en forme d'une spirale simple de 4 centimètres de diamètre ; elle est placée au fond et au centre du vase ; une tige de cuivre, rivée à ce ruban, s'élève verticalement jusqu'au-dessus du bord du verre ; elle est recourbée deux fois et soudée au zinc de l'élément suivant. Dans sa partie verticale qui traverse le liquide, cette tige est recouverte d'une enveloppe de gutta-percha : sans cette précaution, la tige de cuivre se couperait souvent à la ligne de séparation des deux liquides. On place des cristaux de sulfate de cuivre au fond du vase, que l'on achève de remplir avec l'eau pure. La solution de sulfate de cuivre reste au fond en vertu de sa densité.

Le grand modèle, qui est surtout en usage dans les centres télégraphiques importants, a les dimensions suivantes :

	Hauteur.
Vase de verre.....	20 centimètres.
— zinc.....	7 —
— cuivre.....	3 —

Pour diminuer la résistance, on double aujourd'hui la surface des



électrodes. La bande de zinc a une longueur de 47 centimètres ; elle est roulée en spirale ; le cuivre a la même disposition.

Dans la pile des télégraphes italiens, les crochets de cuivre qui supportent le zinc sont supprimés, et le zinc repose sur le rebord intérieur formé par un rétrécissement du vase en verre vers le milieu de sa hauteur.

Il existe encore d'autres formes de piles à densité, telles que l'élément Meidinger ordinaire ou à ballon, usité dans le service télégraphique allemand, etc. On en trouvera la description dans les traités spéciaux.

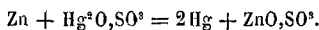
#### ÉLÉMENT MARIÉ-DAVY

Cet élément, où le sel dépolarisateur est le sulfate d'oxydure de mercure, a été un moment très employé dans le service télégraphique français : il l'est encore, quoique à un moindre degré, concurremment avec les éléments Callaud et Leclanché.

La forme de l'élément est semblable à celle de l'élément Daniell décrit page 457, mais le vase poreux contient une électrode de charbon de cornue entourée d'une pâte liquide de sulfate d'oxydure de mercure. Ce charbon, qui forme l'électrode négative, est revêtu, à sa partie supérieure, d'un dépôt électro-chimique de cuivre, ou d'une calotte de plomb fondu dans un moule, sur lequel est soudée une lame de cuivre reliée au zinc de l'élément suivant.

La tête du charbon est trempée dans un bain de paraffine, pour en boucher les pores ; de telle sorte qu'aucun liquide ne puisse s'élever par capillarité et venir attaquer la calotte de cuivre ou de plomb.

L'action chimique est analogue à celle de la pile Daniell :



#### ÉLÉMENT LECLANCHÉ PERFECTIONNÉ

Le peroxyde de manganèse qui fournit le meilleur résultat est celui connu dans le commerce sous le nom de manganèse aiguillé. Il est simplement concassé en grains grossiers et mêlé, à volume à peu près égal, à du charbon de cornue concassé de la même manière, afin d'augmenter la surface de l'électrode dépolarisante.

Pour diminuer aussi la résistance du mélange dépolarisant et éviter l'emploi de diaphragmes poreux, M. Leclanché soumet le mélange à des pressions considérables, en y ajoutant une matière capable d'en souder ensemble les parties constituantes. On a alors un pôle dépolarisateur de la forme que l'on désire, formant une masse solide, ho-

mogène, résistant au choc, et d'une conductibilité presque métallique. Le mélange se compose de 40 pour 100 de peroxyde de manganèse, 55 pour 100 de charbon de cornue et 5 pour 100 de résine gomme-laque. Le mélange étant bien intime, on l'introduit dans un moule en acier, pouvant supporter une pression de 300 atmosphères et que l'on chauffe à 100 degrés; puis on le soumet à la presse hydraulique, et on lui donne la forme de plaques que l'on accole à une lame de charbon de cornue de 1/2 décimètre de surface. Quand la pile est usée, il suffit de changer la plaque dépolarisante accolée au charbon.

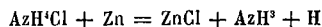
L'adjonction de 3 ou 4 pour 100 de bisulfate de potasse dans l'intérieur de l'aggloméré contribue à diminuer sa résistance en servant de dissolvant aux oxychlorures qui se déposent à la longue dans les pores de l'aggloméré et en diminuent la conductibilité. La force électromotrice de ce nouvel élément serait de 1<sup>dan</sup>,5.

#### ÉLÉMENT AU CHLORURE DE CHAUX

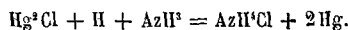
Cet élément, imaginé par M. Niaudet (1), a pour électrodes une lame de zinc baignant dans une solution de sel marin et une plaque de charbon entourée de fragments de charbon et de chlorure de chaux. Il se forme des chlorures de zinc et de calcium, sels solubles et bons conducteurs. Le chlorure de chaux est maintenu par un vase poreux qui est bien bouché, en sorte que l'odeur est peu sensible. La force du couple est de 1<sup>volt</sup>,6; la résistance, 5 ohms.

#### ÉLÉMENT AU CALOMEL (2)

Le liquide excitateur est le chlorhydrate d'ammoniaque, et le sel dépolarisateur, du calomel. L'auteur, M. Héraud, s'est proposé de faire régénérer le liquide excitateur par les réactions qui se font dans le sel dépolarisateur. On a en effet :



et



Il se forme aussi de l'oxychlorure de zinc, mais on l'empêche de se déposer sur le zinc en ajoutant à la solution du sel ammoniac 1/10<sup>e</sup> de son volume d'ammoniaque liquide.

Sa force est de 1<sup>dan</sup>,45 et tombe à 1,07 au bout de six mois. Résistance = 0<sup>ohm</sup>,8.

(1) *Comptes rendus*, vol. LXXXIX, p. 703 (1879).

(2) *Comptes rendus*, vol. LXXXVIII, p. 124 (1879).

## ÉLÉMENT CLARK ET MUIRHEAD

Il ne diffère en réalité de l'élément Leclanché que par le platinage de l'électrode de charbon et des fragments de charbon qui sont mélangés au bioxyde de manganèse. Ce platinage a pour objet de diminuer la polarisation de l'élément.

Les dispositions suivantes ont pour but de diminuer la résistance. Le zinc en forme de cylindre creux est placé au centre, dans un vase non poreux, mais percé d'un grand nombre de trous, et le mélange dépolarisateur est disposé tout à l'entour dans le vase extérieur.

Sa force électro-motrice est de 1<sup>volt</sup>,6 et sa résistance de 0<sup>ohm</sup>,5.

Sa force diminue moins rapidement que celle de l'élément Leclanché, quand on le met dans un circuit fermé de faible résistance (100 ohms).

## ÉLÉMENT A BICHROMATE DE POTASSE ET A MERCURE, DE M. FULLER.

Il se compose d'un vase extérieur en verre, contenant une dissolution de bichromate de potasse (1 de bichromate, 3 d'acide sulfurique et 9 d'eau) dans laquelle plonge une plaque de charbon de 15 centimètres de long sur 5 de large, pourvue d'une tête métallique sur laquelle est montée un bouton.

A l'intérieur se trouve le vase poreux au fond duquel on place une couche de mercure (30 grammes environ). Le zinc a la forme d'un bâton cylindrique, terminé par un pied qui baigne dans le mercure. Le reste du vase poreux est rempli d'eau. L'addition du mercure dans le vase poreux maintient le zinc toujours amalgamé et augmente la constance de la pile, tout en diminuant sa résistance,

Cette pile, employée au « General Post Office » de Londres et sur plusieurs railways, a une force électromotrice d'environ 2 volts, et la résistance du modèle de 1 litre de capacité est de 1 ohm environ. Elle paraît convenir aux circuits où le travail est très actif, et aux circuits fermés.

## ÉLÉMENT AU BICHROMATE DE POTASSE DE M. CLORIS BAUDET

Pour entretenir la solution de bichromate constamment saturée, l'inventeur dispose des deux côtés du vase poreux dans lequel plonge le zinc, deux autres petits vases poreux faisant corps avec le premier, dont un, percé de trous, est rempli de cristaux de bichromate de potasse, l'autre est rempli d'acide sulfurique. Le tout est plongé dans un vase en verre ou en grès, qui contient la solution de bichromate

CORBON. *Électricité.*

1. — 30

et le charbon. Le liquide du vase poreux contenant le zinc est de l'eau acidulée. A mesure que la solution s'épuise, le bichromate se dissout successivement sous l'influence d'un excès d'acide sulfurique, qui a filtré à travers le vase qui le contient, et la solution dépolarisante est ainsi constamment renouvelée.

La force électro-motrice de cet élément atteint 2 volts; sa résistance intérieure, de  $0^{\text{ohm}},22$  au début, va jusqu'à  $0^{\text{ohm}},3$  après quelque temps de service.

J. R.

## CHAPITRE XIX

### ACTION DES COURANTS SUR LES AIMANTS — COMMUTATEURS GALVANOMÈTRES

#### ACTION SUR LES AIMANTS

Considérons une aiguille de boussole suspendue, soit sur un pivot, soit à un fil, et approchons un conducteur rectiligne, parallèle à l'aiguille et au-dessus d'elle (fig. 89). Envoyons un courant à travers ce fil conducteur. *L'aiguille sera déviée, c'est-à-dire qu'elle prendra une position fai-*

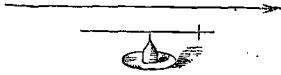


Fig. 89.

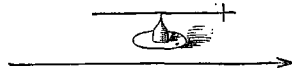


Fig. 90.

*sant un certain angle avec le fil, angle qui croîtra si l'intensité du courant augmente.* Si l'on renverse le sens du courant, c'est-à-dire si l'on retourne la pile de manière à présenter aux extrémités du conducteur les pôles opposés, le sens de la déviation sera renversé. Si le sens du courant reste le même, mais que le fil soit placé au-dessous de l'aiguille (fig. 90) au lieu d'être au-dessus, la déviation sera renversée. Si le sens du courant est renversé *et* que le fil soit placé au-dessous de l'aiguille, la déviation sera renversée deux fois, c'est-à-dire restera la même.

Si maintenant le fil est enroulé autour de l'aiguille (fig. 91), la déviation produite par l'action de la partie

inférieure du fil s'exercera dans le même sens que celle due à l'action de la partie supérieure, car le fil est au-dessous de l'aiguille et le courant a une direction opposée. L'action des deux parties sur l'aiguille sera donc plus grande que l'action individuelle de chacune d'elles. On peut enrouler le fil un certain nombre de fois (fig. 92) et l'effet sera toujours d'augmenter la déviation.

Un courant d'un sens déterminé dévie toujours l'extré-

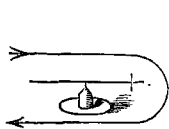


Fig. 91.

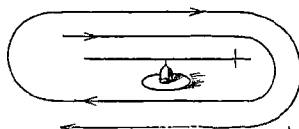


Fig. 92.

mité marquée de l'aiguille dans la même direction. Nous allons définir cette direction.

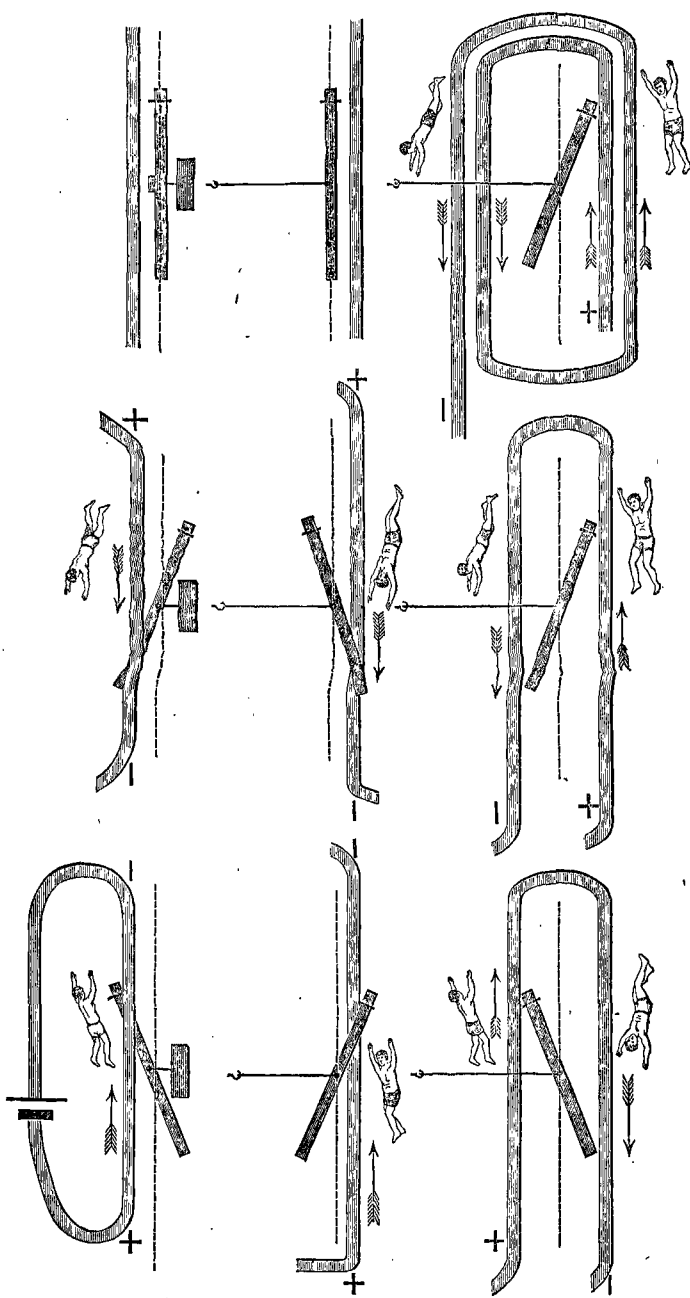
Supposons que le courant marche du pôle positif de la pile à son pôle négatif.

L'expérience montre que si l'on imagine un petit bonhomme nageant dans le sens du courant avec sa face toujours tournée vers l'aiguille, l'extrémité de l'aiguille qui vise le nord est toujours déviée du côté de la main gauche.

L'inspection des diagrammes (pl. XX) éclaircira mieux cette définition que toute explication.

#### COMMULATEURS

Nous avons supposé jusqu'ici, que pour changer le sens d'un courant, on détachait les fils de communication et on retournait la pile. Dans la pratique, on évite cette manœuvre par l'emploi d'un instrument appelé *commutateur*. On en construit de plusieurs formes. Nous allons, pour le moment, décrire seulement les plus simples, nous réserver



Pl. XX. — Actions des courants sur les aimants.





vant de parler des autres à propos des expériences où l'on en fait usage.

La forme la plus simple (fig. 93, 94) consiste en quatre quadrants épais en laiton, vissés sur un socle d'ébonite, très près les uns des autres, mais sans se toucher. Sur les lignes de division sont percés quatre trous, chacun d'eux se composant de deux trous à peu près demi-circulaires vis-à-vis l'un de l'autre. Dans ces trous, on peut introduire des chevilles ou bouchons en laiton. Lorsqu'une cheville est introduite entre deux quelconques des quadrants, un courant électrique peut passer de l'un à l'autre à travers la cheville.

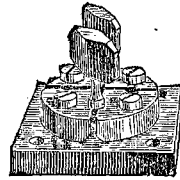


FIG. 93. — Élévation.

On emploie deux chevilles, et toutes deux sont placées

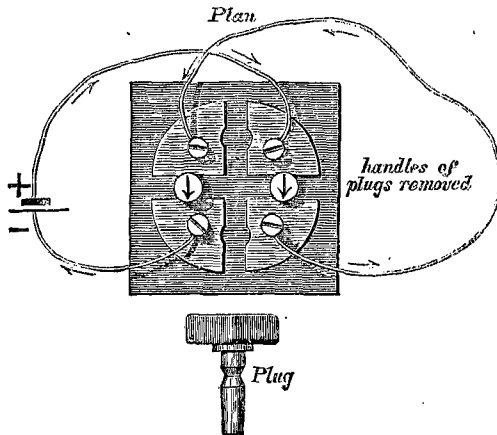


FIG. 94. — Plug = cheville. Handles of plugs removed = les têtes des chevilles enlevées.

sur l'un ou l'autre des deux diamètres du cercle formé par les quadrants. Les deux fils de pile sont attachés à deux

quadrants diagonalement opposés. Les deux bouts du fil à travers lequel on veut envoyer le courant sont attachés aux deux autres quadrants.

Si les chevilles sont placées comme dans la figure 94, le lecteur qui veut suivre la marche du courant verra qu'il s'écoule dans la direction de la flèche ; tandis que si les chevilles sont placées dans les autres trous, le courant

FIG. 95.

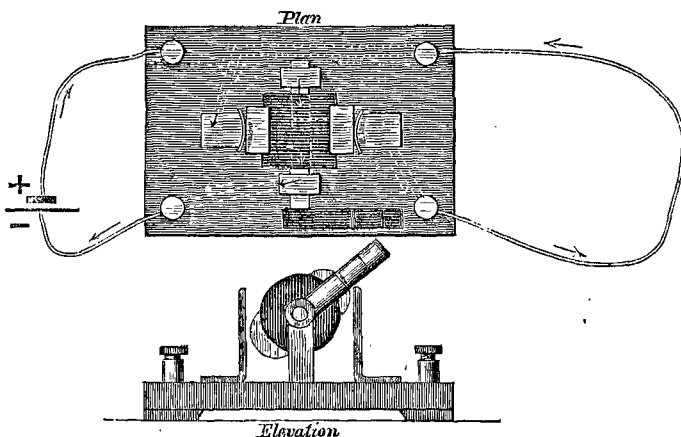


FIG. 96.

s'écoule dans la direction opposée. Si l'on enlève l'une des chevilles, le courant cesse aussitôt.

La forme suivante (fig. 95, 96), quoique plus compliquée, est d'un usage plus sûr, et, en s'en servant, on se rappelle plus facilement la direction dans laquelle marche le courant.

Sur un socle d'acajou se trouve un rouleau d'ivoire supporté par deux montants de laiton. L'axe de ce rouleau est en laiton, mais se compose de deux parties qui ne se rejoin-

gnent pas au milieu. Aux extrémités opposées d'un diamètre du rouleau et sur sa circonférence sont fixées des lames de laiton, reliées respectivement aux deux extrémités de l'axe par des tiges de laiton traversant l'intérieur du rouleau. Des fils de communication partant des supports passent sous le socle et aboutissent à deux vis d'attache situées sur l'un des côtés du socle. Si maintenant les fils de pile sont attachés à ces bornes-vis, les lames de laiton fixées sur le rouleau seront respectivement en communication métallique avec les pôles de la pile. Une des extrémités de l'axe est munie d'une manette d'ivoire, permettant de faire tourner le rouleau d'un demi-tour ; elle est dirigée parallèlement à la ligne qui joint les lames métalliques ; en sorte que lorsque la manette est verticale, l'une d'elles se trouve directement au-dessus de l'autre. Deux ressorts de laiton fixés sur le socle, de chaque côté du rouleau sur lequel ils appuyent, sont reliés par des fils passant sous le socle à deux autres vis de serrage situées sur l'autre côté du socle. A ces dernières sont attachées les extrémités du fil à travers lequel on doit envoyer le courant. On voit que lorsque la manette est verticale ou à peu près, comme dans la figure en élévation, aucun courant ne peut passer ; mais lorsqu'elle est horizontale, comme dans la figure en plan, les lames métalliques du rouleau pressent contre les ressorts, et le courant passe dans le sens de la flèche. Si l'on tourne maintenant la manette de façon qu'elle soit encore suivant l'horizontale, mais dans la direction opposée, chaque lame métallique frottera contre le ressort opposé à celui qu'elle touchait tout à l'heure, et le courant passera en sens contraire. Le lecteur fera bien de dessiner lui-même en plan la marche du courant, s'il veut comprendre le mécanisme de l'instrument mieux que par toute explication.

Ce commutateur est particulièrement commode dans toutes les expériences où l'on a à observer des déviations alternatives, car on peut disposer les fils de pile de telle sorte que le point lumineux (1), ou l'extrémité marquée de l'aiguille, se déplace toujours dans la direction indiquée par la position de la manette. Mais il ne convient pas aux expériences où l'on veut une rupture brusquée de contact.

#### CLEFS A RESSORT (fig. 97, 98)

Quand on veut qu'un contact soit brusquement établi ou rompu, on emploie des « clefs à ressort ». Ce sont, soit de

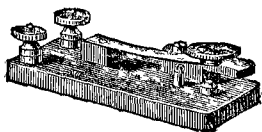


FIG. 97.

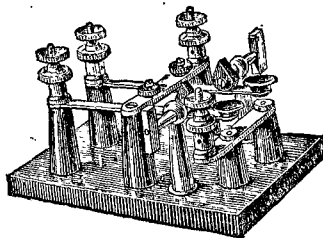
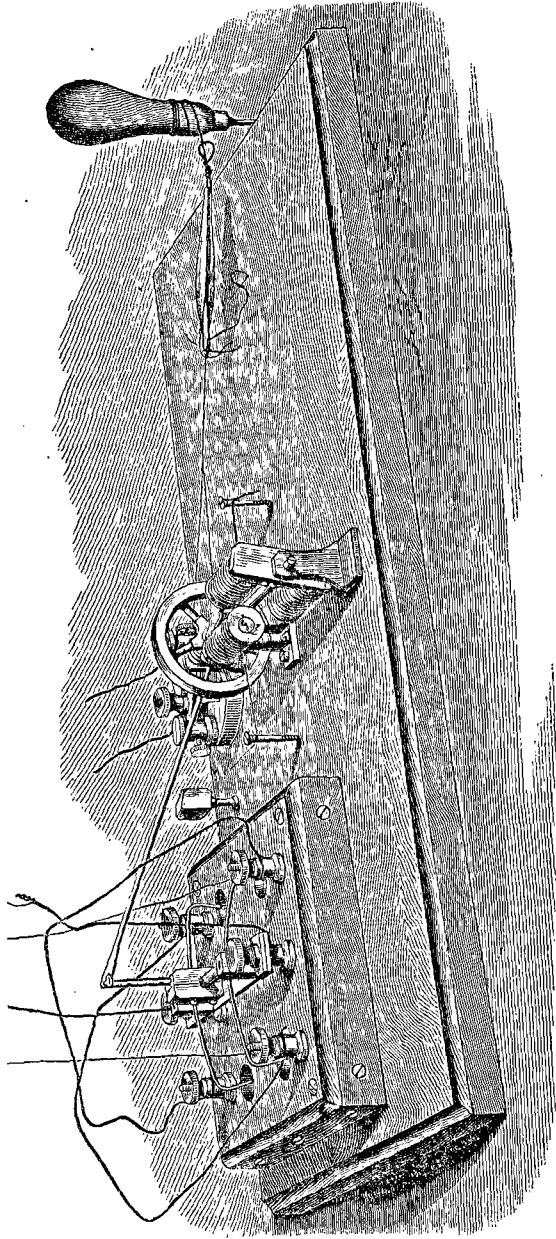


FIG. 98.

simples clefs de contact, comme dans la figure 97, soit des clefs à inversion avec doubles ressorts, comme dans la figure 98. Dans la clef à inversion, les contacts sont disposés de telle sorte que, si l'on abaisse un des ressorts, le courant marche dans une direction, tandis que si l'on abaisse l'autre, il marche dans la direction contraire. Les deux clefs sont munies d'un moyen de maintenir les ressorts sur contact quand c'est nécessaire.

(1) Voy. plus loin les galvanomètres à réflexion.





Pl. XXI. — Commutateur rapide.

## COMMUTATEUR RAPIDE (pl. XXI)

Dans certaines expériences, il faut pouvoir inverser rapidement les courants.

On emploie dans ce but l'appareil représenté planche XXI. Un châssis d'ébonite supportant deux fils métalliques de la forme  $\boxed{a}$   $b$  oscille au-dessus d'un plateau d'ébonite, près des angles duquel sont creusés quatre trous contenant du mercure. Les fils de pile sont reliés respectivement aux deux fils oscillants. Les trous sont joints en diagonale, et chaque paire est reliée à l'un des bouts du fil dans lequel on veut envoyer le courant. A l'examen de la planche, on voit que lorsque les extrémités  $b$  plongent dans les coupes, le courant s'écoule dans une direction, et qu'il s'écoule dans l'autre direction quand les extrémités  $a$  plongent à leur tour. Les oscillations sont produites par une tige menée par une manivelle qui est sur l'axe d'une petite machine électro-magnétique (1). La vitesse est réglée par un frein à frottement, consistant en un ruban de soie qui passe sur une poulie montée sur l'axe et qui est attaché à une bande de caoutchouc que l'on peut tendre en tournant une poignée. Cet appareil est très commode pour les courants qui ont un potentiel élevé, et peut donner facilement trente inversions par seconde. C'est la « machine à inversion secondaire » dont l'auteur s'est servi dans ses expériences sur la capacité inductive spécifique (vol. I, page 178).

On emploie beaucoup d'autres formes de commutateurs rapides pour différents objets.

(1) Voy. chap. XL.

## GALVANOMÈTRES

Nous avons parlé de la différence d'intensité des courants produits par diverses piles; nous allons exposer quelques-unes des méthodes dont on fait usage pour cette mesure.

L'instrument le plus ordinairement employé pour mesurer des courants s'appelle un « galvanomètre ».

D'une façon générale, les galvanomètres peuvent être partagés en deux catégories :

- 1° Ceux employés à la mesure des forts courants ;
- 2° Ceux qui servent à déceler l'existence de faibles courants.

Les instruments de la seconde catégorie ont une grande importance, car nous verrons que la plupart des mesures de résistance s'obtiennent par un équilibre de courants; en sorte que quand cet équilibre est atteint, il ne passe plus de courant; et par conséquent il importe de pouvoir reconnaître l'existence du courant même le plus faible.

## GALVANOMÈTRE DES TANGENTES

En tête de la première catégorie nous avons le galvanomètre des tangentes.

Dans sa forme la plus simple, il se compose d'un grand anneau vertical de fil de cuivre, au centre duquel se trouve une petite aiguille de boussole. Quand on se sert de l'instrument, on le tourne dans une position telle que le plan de l'anneau coïncide avec celui du méridien magnétique, et alors l'aiguille est dans le plan de l'anneau. Lorsqu'un courant électrique passe dans l'anneau, il dévie l'aiguille (page 467). Cela posé, quand l'anneau est grand et l'aiguille petite, on peut, dans le calcul, négliger la différence



des distances des diverses parties de l'aiguille à l'anneau, c'est-à-dire qu'on peut considérer la force agissant sur chaque partie de l'aiguille comme égale à celle qui agit sur le centre de l'anneau.

La force  $f$  qu'un courant d'intensité donnée, passant dans un arc de cercle, exerce sur un pôle magnétique d'intensité  $m$  situé au centre du cercle, est égale à l'intensité du pôle multipliée par l'intensité du courant, multipliée par la longueur de l'arc et divisée par le carré du rayon ou de la distance du fil à l'aimant :

$$f = \frac{lmC}{a^2},$$

$l$  étant la longueur de l'arc et  $a$  le rayon.

Lorsque l'arc forme un anneau complet, la force est

$$\frac{2\pi aCm}{a^2} = \frac{2\pi}{a} Cm. \quad (1)$$

Dès que le courant passe, un couple (2), dont le bras est la longueur de l'aiguille de boussole et dont les forces sont proportionnelles à l'intensité du courant, commence à agir sur l'aiguille.

Soit BOA (fig. 99) l'aiguille, soient  $2l$  sa longueur et  $m$  l'intensité de son pôle; l'action exercée par une certaine force magnétique sera égale à  $m$  fois cette force. Lorsque le courant commence à agir, on a un couple dont le moment est  $2lmC \frac{2\pi}{a}$ , c'est-à-dire proportionnel au produit de la longueur de l'aiguille par l'intensité du courant. Dans le calcul, on ne considère habituellement qu'une moitié de l'aiguille; le moment du couple agissant sur

(1) Car la circonférence d'un cercle est égale à  $2\pi$  fois son rayon.

(2) Voy. vol. I, p. 282.

chaque moitié de l'aiguille est alors  $lmC \frac{2\pi}{a}$  ou la moitié du couple total.

L'aiguille commence à se mouvoir et dévie d'un certain

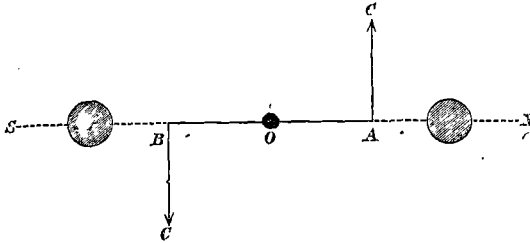


FIG. 99.

angle, soit de 5 degrés, 10 degrés ou 50 degrés. Appelons  $\delta$  degrés cette déviation : le même calcul s'appliquera alors à toutes les expériences, et il suffira, dans le résultat final, de substituer à  $\delta$  le nombre de degrés observé dans chaque expérience.

Quand l'aiguille a pris cette déviation, le moment du couple que le courant exerce est alors moindre qu'auparavant, car la direction de sa force, qui est perpendiculaire au méridien, rencontre le méridien en un point  $b$  (fig. 100).

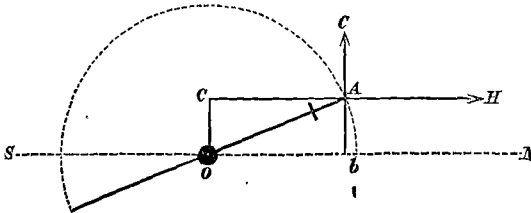


FIG. 100.

Le bras du couple n'est plus égal à OA, mais seulement

à  $Ob$ , et le moment du couple est  $\frac{2\pi}{a} mC.Ob$ , c'est-à-dire proportionnel au produit de l'intensité du courant par  $Ob$ .

Mais, l'aiguille étant déviée, la force horizontale de la terre; que nous appellerons  $H$ , agit dans une direction parallèle au méridien, tendant à ramener l'aiguille en arrière dans le plan du méridien. Elle forme aussi un couple tendant à faire tourner l'aiguille en sens contraire de l'action du courant. Sa force est  $Hm$ , et son bras est évidemment égal à la longueur  $Oc$ , c'est-à-dire à  $Ab$ ; son moment est donc  $Hm.Ab$ , ou proportionnel au produit de la force horizontale de la terre par la longueur  $Ab$ .

Lorsque les moments qui tendent à faire tourner l'aiguille en sens contraire seront égaux, l'aiguille restera au repos; en d'autres termes, lorsque l'aiguille est au repos, les deux couples sont égaux, et l'on a :

$$\frac{2\pi}{a} CmOb = HmAb,$$

ce qui donne :

$$\frac{2\pi}{a} C = H \frac{Ab}{Ob},$$

c'est-à-dire que l'intensité du courant est proportionnelle au produit de la force horizontale de la terre par le rapport de  $Ab$  à  $Ob$ .

On voit que le résultat est indépendant de la longueur de l'aiguille et de l'intensité du pôle, car ces quantités disparaissent dans les deux membres de l'équation. On sait d'ailleurs par la trigonométrie que le rapport de  $Ab$  à  $Ob$  dépend seulement de l'angle  $\delta$  que l'aiguille fait avec le méridien, et nullement de la longueur de l'aiguille ou de toute autre chose.

Ce rapport est appelé la tangente de  $\delta$ , et on l'écrit toujours  $\text{tang } \delta$ . On trouve dans les livres de tables mathématiques les valeurs de  $\text{tang } \delta$ , calculées pour chaque valeur de  $\delta$ , de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ .

Nous avons finalement pour l'intensité du courant :

$$C = H \text{ tang } \delta \frac{a}{2\pi},$$

c'est-à-dire que l'intensité de courant est égale à la composante horizontale du magnétisme terrestre, multipliée par la tangente de l'angle de déviation, multipliée par une constante que l'on détermine en mesurant l'anneau du galvanomètre.

Alors, pour trouver l'intensité d'un courant, on cherche sur une carte magnétique la valeur de l'intensité du magnétisme terrestre au lieu de l'expérience. On envoie le courant à travers le galvanomètre, on observe l'angle de déviation, on prend, dans une table des tangentes, le nombre correspondant à cet angle, et, multipliant les deux nombres l'un par l'autre ( $H \text{ tang } \delta$ ) et par la constante  $\frac{a}{2\pi}$ , on a l'intensité du courant (1).

La forme la plus simple du galvanomètre est celle d'un anneau unique ; mais elle ne se prête pas à des expériences de précision, partie parce qu'on n'est pas sûr que l'anneau reste parfaitement plan et rigide, partie à cause de la proportion comparativement élevée de l'action irrégulière des

(1) ACTION D'UN COURANT CIRCULAIRE SUR UNE AIGUILLE AIMANTÉE A SON CENTRE (fig. 101) — *Cas général*. — Considérons une aiguille aimantée susceptible de se mouvoir seulement dans un plan horizontal.

Soient  $\theta$  l'angle du plan de l'anneau avec la verticale,  $\alpha$  l'angle horizontal dont on doit faire tourner l'aiguille pour l'amener du méridien magnétique dans le plan de l'anneau.

Soient  $C$  l'intensité du courant,  $H$  la composante horizontale de la force

fil de communication par rapport à l'action régulière de l'anneau.

terrestre,  $a$  le rayon de l'anneau,  $\delta$  l'angle de l'aiguille avec le méridien lorsqu'elle est au repos par l'effet des actions réunies de la terre et du courant.

Le couple qui tend à ramener l'aiguille au zéro est

$$H \sin \delta \, lm.$$

Le couple qui tend à la dévier est

$$\begin{aligned} & \frac{2\pi}{a} C \cos \theta \cos (\text{angle de l'anneau et de l'aiguille}) \, lm. \\ & = \frac{2\pi}{a} C \cos \theta \cos (\delta \pm \alpha) \, lm \end{aligned}$$

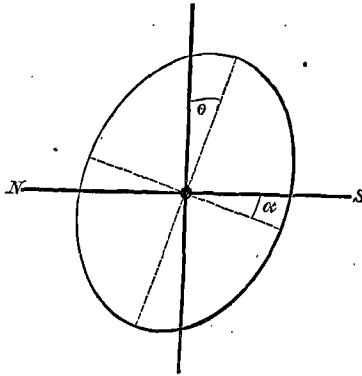


FIG. 101.

(le signe de  $\alpha$  dépendant de l'action du courant)

$$= \frac{2\pi}{a} C \cos \theta \left\{ \cos \delta \cos \alpha \mp \sin \delta \sin \alpha \right\} \, lm,$$

d'où

$$C = H \frac{\sin \delta}{\cos \theta \left\{ \cos \delta \cos \alpha \mp \sin \delta \sin \alpha \right\}} \cdot \frac{a}{2\pi}$$

Cas particuliers :

1. Anneau horizontal

$$\theta = \frac{\pi}{2}; \quad \text{alors} \quad \cos \theta = 0$$

et

$$C = \infty \text{ sauf si } \delta = 0,$$

La forme suivante est préférable (fig. 102) :

On fait usage de deux anneaux, un de chaque côté de l'aiguille, disposés de telle sorte que le centre de l'aiguille

c'est-à-dire qu'il faudrait un courant d'une intensité infinie pour produire une déviation.

2. Anneau vertical.

$$\theta = 0, \quad \text{alors} \quad \cos \theta = 1$$

et

$$C = H \frac{\sin \delta}{\cos \delta \cos \alpha \mp \sin \delta \sin \alpha} \cdot \frac{a}{2\pi}$$

3. Anneau vertical, et dans le méridien magnétique (galvanomètre des tangentes)

$$\theta = 0, \quad \alpha = 0;$$

alors,

$$\cos \theta = 1, \quad \cos \alpha = 1, \quad \sin \alpha = 0,$$

et

$$C = H \frac{\sin \delta}{\cos \delta} \frac{a}{2\pi} = H \tan \delta \frac{a}{2\pi}.$$

4. Anneau dans un plan passant par la direction nord-sud, mais non vertical.

$$\alpha = 0, \quad \text{alors} \quad \cos \alpha = 1 \quad \sin \alpha = 0$$

et

$$C = H \frac{\sin \delta}{\cos \theta \cos \delta} \frac{a}{2\pi} = H \frac{\tan \delta}{\cos \theta} \frac{a}{2\pi}.$$

On a construit, pour la mesure des courants très forts, un galvanomètre dont l'anneau peut tourner autour d'un axe horizontal, de manière à mesurer un angle  $\theta$  avec la verticale : on l'appelle galvanomètre des cosinus. La formule précédente s'y applique. Avec un courant donné, la déviation peut être rendue aussi petite que l'on veut en augmentant l'angle  $\theta$ .

5. Anneau vertical; passant par la direction est-ouest.

$$\alpha = \frac{\pi}{2}, \quad \theta = 0;$$

alors

$$\cos \alpha = 0, \quad \sin \alpha = 1, \quad \cos \theta = 1,$$

et

$$C = H \frac{\sin \delta}{\sin \delta} \frac{a}{2\pi}.$$

Mais, dans ce cas, l'aiguille ne dévie pas, car C agit dans la même direc-

coïncide avec le centre de leur axe commun (la ligne qui joint leurs centres), et que cette ligne, quand l'instrument est réglé, soit perpendiculaire au méridien magnétique, c'est-à-dire soit dans la direction E. et O. Les anneaux sont en bois, et les fils sont enroulés sur eux. La figure 103 représente la section d'un anneau. Un anneau massif de

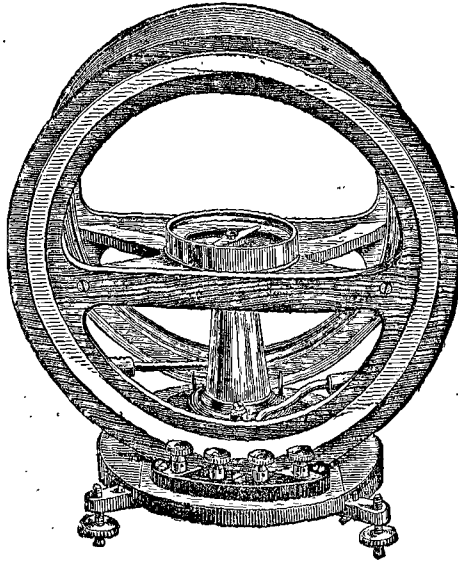


FIG. 102.

cuivre est encastré dans une rainure ménagée à l'extérieur : on s'en sert seulement pour des expériences peu rigou-

tion que H; on a par conséquent :

$$\delta = 0 \quad \text{et} \quad \sin \delta = 0,$$

et alors

$$C = H \frac{0}{0};$$

C est donc indéterminé; en d'autres termes, quand l'anneau est dans cette position, l'aiguille ne donne aucune indication sur l'intensité du courant.

reuses avec des courants très puissants. Les anneaux placés de chaque côté sont reliés de telle sorte que le courant les traverse tous deux dans la même direction. L'intérieur de chaque anneau de bois présente une surface conique telle que, si on la prolongeait, le sommet du cône serait au centre de l'aiguille. Sur ces surfaces on enroule trois bo-

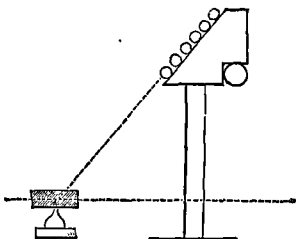


FIG. 103.

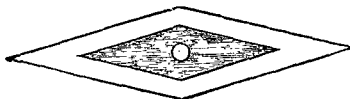


FIG. 104.

bines de fil, ayant respectivement 3, 9 et 27 tours ; ces fils de cuivre sont évidemment recouverts de soie ou de coton, afin que le courant suive chaque tour en entier au lieu de passer transversalement d'un fil à l'autre. Chaque tour produit son effet propre sur l'aimant, et de cette façon, avec un courant dont l'effet sur un anneau simple serait l'unité, on produira sur l'aiguille un effet égal à 3, 9 ou 27, ou une combinaison quelconque des sommes ou des différences de ces nombres.

S'il y a  $n$  tours, l'équation fournie par le galvanomètre des tangentes sera :

$$C = H \tan \delta \frac{a}{2n\pi}.$$

Les fils sont enroulés sur une surface conique, parce qu'avec cette disposition chaque tour est vu de l'aiguille sous le même angle, ce qui élimine l'erreur tenant à ce que l'aiguille n'est pas infiniment courte.



L'aiguille dont on se sert est courte et pointue, avec une pièce d'agate formant le sommet de la cavité par laquelle elle repose sur le pivot; et, afin de pouvoir employer un cercle divisé de grandes dimensions, on la prolonge par une aiguille légère en aluminium (fig. 104).

On s'arrange de façon que les pointes de l'aiguille d'aluminium soient autant que possible sur la ligne d'aimantation. On peut corriger néanmoins une erreur dans cet arrangement, en prenant des lectures alternatives avec le courant passant dans des directions opposées; une des lectures donnera en trop ce que l'autre donne en moins, et la moyenne fournira la vraie valeur.

Prenons, comme exemple, un cas extrême, et supposons que l'angle de l'axe magnétique de l'aiguille et de la ligne joignant les pointes soit de 1 degré; supposons également que le courant fasse dévier de 30 degrés l'axe magnétique (fig. 105). On lira alors 29° avec le courant dans une certaine direction, et 31° quand il passera dans la direction contraire. La moyenne sera 30°, c'est-à-dire la vraie déviation; et l'on voit que, pour effectuer cette détermination, il n'est pas nécessaire de connaître l'angle de la direction des pointes indicatrices avec l'axe magnétique de l'aiguille.

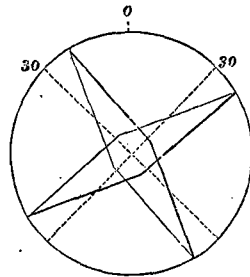


FIG. 105.

On peut néanmoins obtenir facilement, si l'on veut, la valeur de cet angle, car il est évidemment égal à la différence des deux lectures. (Comparez vol. I, p. 379.)

L'instrument repose sur trois vis calantes : sa base et le pilier qui le supporte sont réunis par un pivot, qui permet

de faire tourner le pilier de manière à placer les cercles parallèlement au méridien magnétique.

#### GALVANOMÈTRES SENSIBLES — AIGUILLES ASTATIQUES

Sous la dénomination de *galvanomètres sensibles*, on comprend tous les galvanomètres servant à révéler ou à mesurer de faibles courants. L'*aiguille astatique* est une disposition en usage dans la plupart des galvanomètres de cette espèce, pour diminuer l'action du couple terrestre tout en augmentant un peu le couple exercé par le courant.

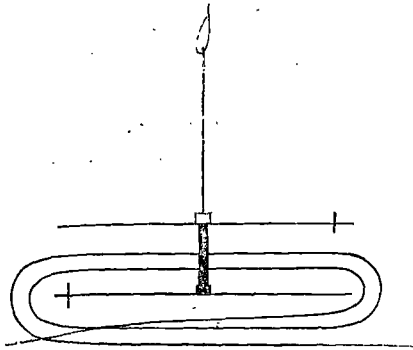


Fig. 106.

L'aiguille astatique se compose de deux aimants, ayant à peu près, mais pas tout à fait, la même intensité; ils sont reliés par une tige rigide avec leurs pôles similaires dans des directions opposées. Le système ne repose pas sur un pivot, il est suspendu par un fil de soie. Le bout marqué de l'aimant le plus fort se dirigera vers le nord; mais si le système est dévié par une cause quelconque, le couple, tendant à le ramener dans le méridien magnétique, sera seulement la différence des couples que la terre exerce respectivement sur les deux aimants. La bobine de fil que

le courant traverse est percée d'une ouverture pratiquée près du centre du côté supérieur; la tige, qui rend les deux aimants solidaires, traverse cette ouverture. Un des aimants est ainsi suspendu dans l'intérieur de la bobine et l'autre juste au-dessus d'elle (fig. 106). En se reportant à la planche XX, on voit que les actions exercées par le haut et le bas de la bobine, sur l'aiguille inférieure, sont dans la même direction; et de plus, bien que leurs actions sur l'aiguille supérieure soient dans des directions opposées, celle du haut de la bobine, qui est plus voisine et par suite plus puissante, agit dans la même direction que les actions exercées sur l'aiguille inférieure.

Dans les galvanomètres sensibles, le courant fait un grand nombre de tours, plusieurs milliers souvent, autour de l'aiguille. Le fil est enroulé sur un cadre plat, de la forme indiquée dans la figure 107. Un petit tube  $\alpha$  est fixé

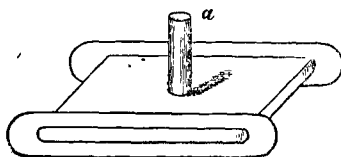


FIG. 107.

à ce cadre, afin de laisser une ouverture pour le passage de l'axe des aimants. L'indicateur, qui parcourt les divisions d'un cercle, est évidemment fixé sur l'aiguille supérieure qui est visible. La figure 108 montre la forme ordinaire d'un galvanomètre astatique.

Nous voyons qu'il consiste en une aiguille astatique suspendue dans une bobine de fil, qui, suivant l'usage auquel l'instrument est destiné, se compose de quelques tours de gros fil ou d'un grand nombre de tours de fil fin.

L'aiguille est suspendue par un fil de cocon attaché à un support de laiton. Un trou pratiqué au sommet de la cage de verre laisse passer le haut d'une pièce susceptible de glisser verticalement : c'est à cette pièce, et non pas directement au support fixe, qu'on attache l'extrémité supérieure du fil de suspension. Cette disposition permet d'abaisser les aiguilles, de façon à les faire reposer sur les tours de fil ; on évite ainsi d'exercer des efforts sur la

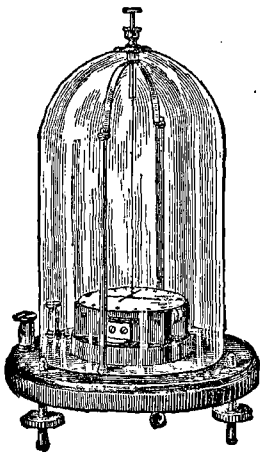


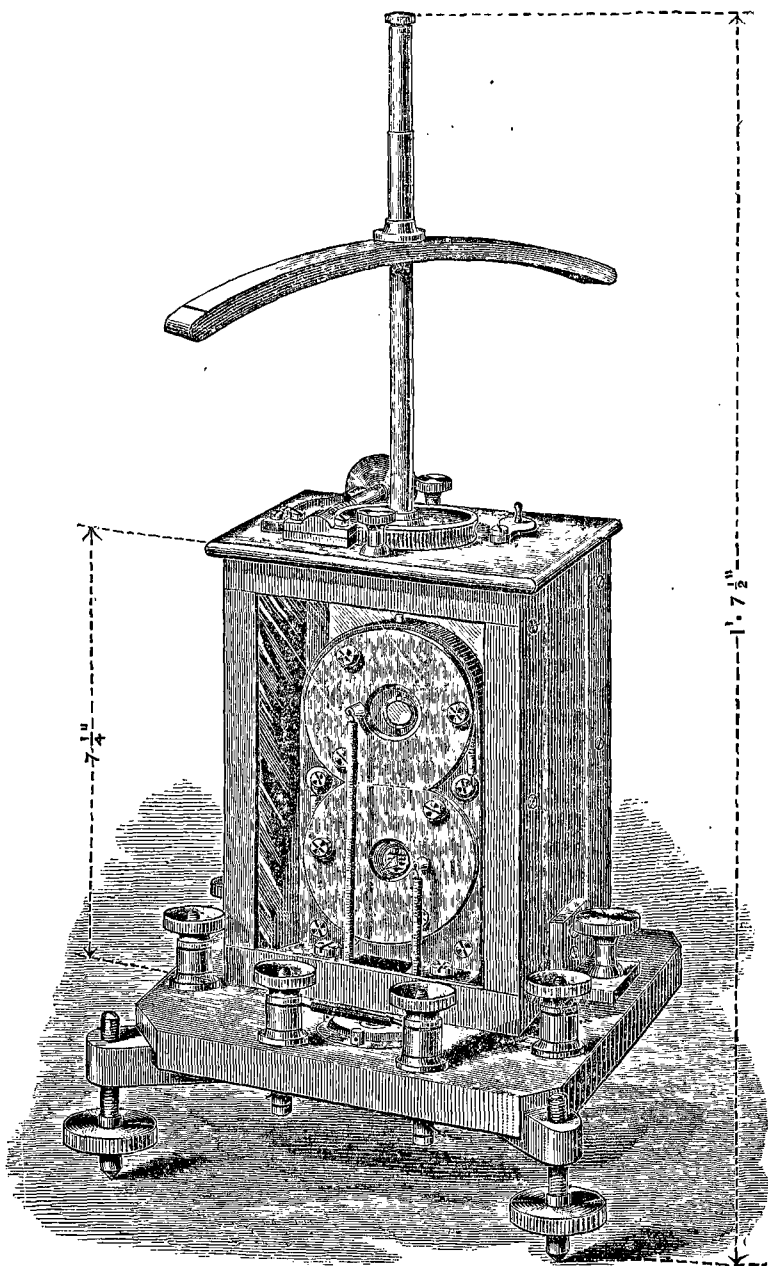
FIG. 108.

suspension quand on transporte l'instrument. Un cercle divisé, tracé sur un carton, est fixé sur la bobine ; le cercle et la bobine peuvent tourner de 30 à 40 degrés sur un pivot, de façon à pouvoir placer le zéro de la graduation et le plan des fils dans le méridien de l'aiguille. On fixe quelquefois à l'aiguille un miroir semblable à celui qui a été décrit à propos de l'électromètre à réflexion, ce qui permet de se servir du galvanomètre avec une lampe et une échelle. Cette

disposition est particulièrement en usage pour les expériences de démonstration.

A l'aide d'une lampe à chaux, l'auteur a pu rendre les mouvements d'une très petite aiguille visible à 500 personnes à la fois. Un disque lumineux de 15 centimètres de diamètre était projeté sur un écran, et une déviation de 1 à 2 degrés le déplaçait de plusieurs décimètres. L'aiguille avait environ 5 centimètres de long, et le miroir 6 millimètres de diamètre. Mais quand on veut un galvanomètre à miroir





Pl. XXII. — Galvanomètre à réflexion de Thomson. [Dimensions en pieds (') et pouces (").]

pour des expériences de précision, on emploie toujours une des formes de sir W. Thomson.

GALVANOMÈTRES A RÉFLEXION, DE SIR W. THOMSON  
(pl. XXII)

Le principe optique de ces galvanomètres est exactement le même que celui de l'électromètre à réflexion (vol. I, p. 58). Ces galvanomètres sont quelquefois astatiques, quelquefois pas. Le miroir a habituellement un diamètre inférieur à 6 millimètres, et est très mince. Dans la forme non astatique (fig. 109), l'aimant, ou mieux les aimants, car il y en a généralement plusieurs, sont collés derrière le miroir, et ont habituellement 3 millimètres environ de longueur. L'ensemble du système des aimants et du miroir ne pèse pas 6 centigr. 1/2. Le but de ces aimants multipliés est d'obtenir le maximum d'aimantation avec le minimum de poids (1). Le miroir et l'aimant sont suspendus par un simple fil de cocon, au centre d'une bobine circulaire de fil, laquelle est renfermée dans un cylindre de laiton. La face antérieure de ce cylindre est fermée par une glace, la face postérieure par une plaque de laiton; au centre de cette plaque se trouve un petit disque de verre, à travers lequel on peut voir le miroir. Le cylindre est supporté horizontalement par un trépied, dont chacune des branches est munie d'une vis calante, qui

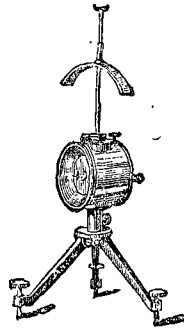


FIG. 109.

(1) C'est ce qu'on recherche, parce que plus l'aiguille est fortement aimantée, plus elle reviendra rapidement à sa position du repos, après qu'elle aura été mise en oscillation.

permet d'ajuster l'instrument de façon qu'on voie le miroir osciller nettement.

Pour éviter d'avoir à placer toujours l'appareil dans le méridien magnétique, un grand aimant courbe, faiblement aimanté, est supporté horizontalement par une tige verticale fixée au sommet de la cage.

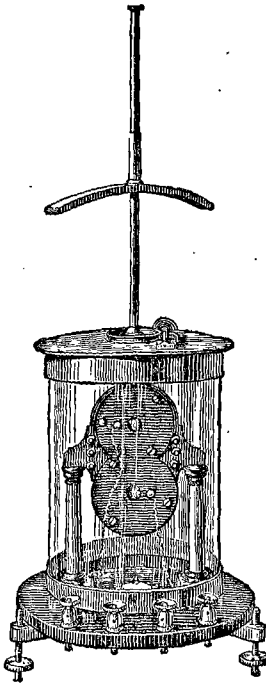


Fig. 410.

On peut faire tourner l'aimant avec la main autour de cette tige, sur laquelle il glisse à frottement un peu dur : par sa force directrice, cet aimant constitue un méridien magnétique artificiel dans la direction voulue. On obtient un réglage de précision en faisant mouvoir la tige elle-même au moyen d'une vis tangente. L'aimant directeur peut aussi glisser sur la tige dans le sens vertical, de façon à agir avec plus ou moins de force sur l'aimant suspendu (1).

L'arrangement de l'échelle et de la lampe (fig. 13, vol. I, p. 58) est exactement le même

(1) Quand les pôles de l'aimant *directeur* sont disposés comme ceux de l'aimant terrestre, c'est-à-dire le pôle boréal ou non marqué tourné vers le nord, sa force directrice s'ajoute à celle de la terre, et la sensibilité de l'appareil diminue. En faisant tourner alors cet aimant de 180 degrés, on oppose sa force directrice à celle de la terre : pour avoir le maximum de sensibilité, on l'abaisse ensuite le long de sa tige, jusqu'à ce que les deux actions se neutralisent; puis on le soulève un peu, afin de conserver une petite force directrice qui ramène l'aimant au zéro dans le méridien magnétique.

J. R.



que celui usité dans l'électromètre déjà décrit, excepté qu'au lieu d'une grande ouverture traversée par une ligne sombre, on emploie généralement une fente étroite, donnant une ligne verticale de lumière brillante. Ce galvanomètre est construit quelquefois avec un fil gros et court, d'autres fois avec un long fil fin.

Dans la forme astatique (fig. 110 et pl. XXII), que l'on emploie seulement dans les galvanomètres à long fil, chaque aiguille est entourée séparément d'une bobine de fil. Le courant doit alors passer en sens contraire dans les deux bobines. Les bobines sont quelquefois renfermées dans un cylindre vertical de verre, comme dans la figure 110, et quelquefois dans une cage carrée de verre, comme dans la planche XXII. Comme avec cette disposition le système de l'aimant et du miroir est nécessairement un peu plus lourd, on le munit quelquefois d'une plaque d'aluminium en forme de girouette, pour amortir ses vibrations. Les autres détails sont semblables à ceux du galvanomètre à trépied.

#### GALVANOMÈTRE MARIN (fig. 111)

Cet instrument est employé à bord des navires, pour l'immersion des câbles télégraphiques. Son aiguille, au lieu d'être suspendue, est supportée par un fil tendu en haut et en bas. Un grand aimant permanent est fixé près de l'aiguille dans la cage, de telle sorte que le méridien a une direction sensiblement constante par rapport à la cage. Le réglage de précision s'effectue à l'aide de deux aimants mobiles tournant vers l'aiguille leurs pôles opposés, et reliés par une roue dentée

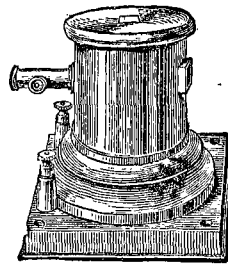


FIG. 111.

(fig. 112). Lorsque les pôles sont équidistants de l'aiguille, ils ne produisent aucun effet; mais en tournant la roue à droite ou à gauche, l'un ou l'autre devient prépondérant. Ces aimants sont contenus dans un tube horizontal, que l'on voit à la gauche de la figure 111. A l'exception de la

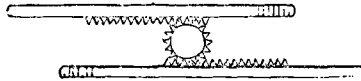


Fig. 112.

petite fenêtre à travers laquelle on observe le miroir, la cage de l'instrument est entièrement en fer, ce qui détruit presque complètement les effets des forces magnétiques extérieures.

#### GALVANOMÈTRE BALISTIQUE

Lorsqu'une certaine quantité d'électricité se décharge instantanément à travers un galvanomètre, on peut calculer cette quantité, connaissant les écarts extrêmes de la première oscillation de l'aiguille.

On démontre mathématiquement que la quantité d'électricité qui passe est, si l'air n'oppose pas de résistance au mouvement de l'aiguille, proportionnelle au sinus de la moitié de l'angle d'oscillation (1).

Afin de diminuer la résistance de l'air autant que possible, on emploie un *galvanomètre balistique*.

La différence entre un galvanomètre balistique et un galvanomètre ordinaire consiste en ceci : dans le galvanomètre ordinaire, on se propose de ramener l'aiguille au repos aussi vite que possible; dans le galvanomètre balistique, où l'écart extrême de l'aiguille est la quantité qu'il

(1) Maxwell, *Electricity*, 748, vol. II, p. 346.

s'agit d'observer, il importe d'arrêter ou d'« amortir » l'oscillation aussi peu que possible.

Les professeurs Ayrton et Perry ont imaginé de donner à l'instrument la forme suivante (1) :

On prend un des galvanomètres réflecteurs à grande résistance d'Elliott, dont les aiguilles sont enlevées et remplacées par la disposition qui suit :

On prépare quarante petits aimants de longueurs variables, et, après les avoir aimantés à saturation, on construit avec eux deux petites sphères, dans chacune desquelles tous les aimants sont dirigés dans le même sens. Les sphères sont complétées par des segments taillés dans une petite balle creuse de plomb. On les réunit toutes les deux par une tige rigide, de manière à former une combinaison astatique, que l'on suspend à la façon habituelle.

Avec cet arrangement, on obtient une grande sensibilité, et l'air n'oppose qu'une très petite résistance au mouvement des aiguilles. On a constaté que le rapport de la première oscillation à la seconde oscillation était seulement de 1,1695; nombre suffisamment voisin de l'unité pour qu'on puisse, par une correction simple, tenir compte de l'effet d'amortissement de l'air.

#### GALVANOMÈTRE DIFFÉRENTIEL

Pour comparer l'intensité de deux courants, on emploie quelquefois des galvanomètres formés de deux bobines parfaitement égales de fil de cuivre que le courant traverse dans des directions opposées. Lorsque les deux courants sont égaux, l'aiguille ne dévie pas. Un instrument de ce genre s'appelle un « galvanomètre différentiel ».

(1) *Report of the British Association*, Dublin, 1878, p. 487, et *Phil Mag.*, 1879, I, p. 277.

## APPENDICE AU CHAPITRE XIX

### COMMUTATEUR CARRÉ

Avec ce petit appareil très simple, dû à M. Bourseul (1), l'établissement des communications se fait d'un seul coup et très sûrement par l'emploi d'une seule cheville. Les lignes de séparation des quatre blocs de laiton sont les diagonales d'un carré. La partie de la cheville qui doit être enfoncée dans le trou central se compose de deux prismes triangulaires en laiton A, B, séparés par de l'ébonite E. Les arêtes

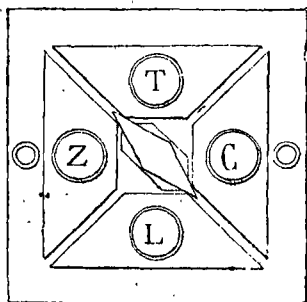


FIG. 113.

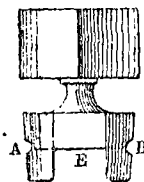


FIG. 114.

de ces prismes, pénétrant entre les blocs, établissent un très bon contact. Il suffit d'enfoncer la cheville suivant l'une ou l'autre des diagonales pour envoyer le courant, dans un sens ou dans l'autre, à travers le circuit dont les extrémités aboutissent en L et T. La figure est à l'échelle 1/2.

### ÉLECTRO-DIAPASON INTERRUPTEUR

C'est un diapason dont le mouvement vibratoire est entretenu à l'aide d'électro-aimants, de façon à maintenir un régime vibratoire

(1) *Annales télégraphiques*, 3<sup>e</sup> série, vol. VI, p. 18.

permanent. Il peut être employé pour interrompre des courants à intervalles réguliers et très rapprochés.

Voici la disposition imaginée par M. Mercadier et décrite par lui dans les *Annales télégraphiques* (3<sup>e</sup> série, vol. I, 1874, p. 51) :

D et D' (fig. 115) sont les deux branches d'un diapason en acier portant deux styles S et S' fixés avec des vis. Le style S, destiné à enregistrer les vibrations du diapason, peut être, suivant les cas, un fil d'acier ou un triangle aigu en clinquant; le style S', qui sert à inter-

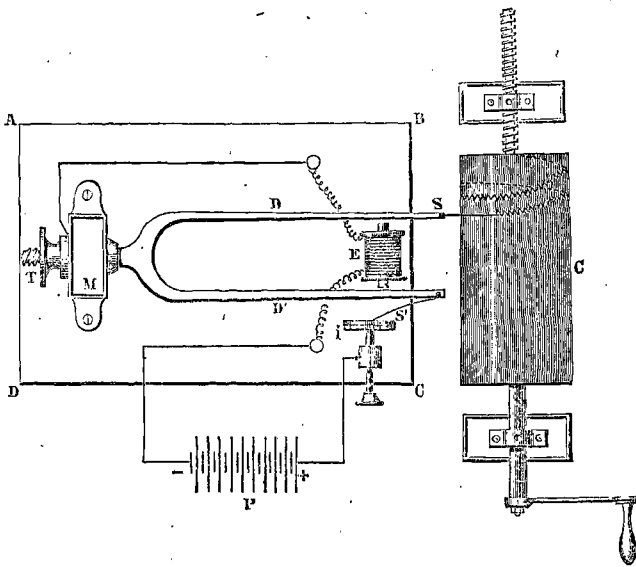


FIG. 115.

rompre un courant, est un fil de platine ou d'acier de 2 à 5/10 de millimètre de diamètre.

T est la tige taraudée du diapason fixée à un montant en bois M, solidement vissé sur une planchette ABCD.

E est un électro-aimant, fixé aussi à la planchette, et dont la bobine peut avoir une résistance de 10 à 20 Ohms. L'un des bouts du fil de la bobine communique avec la tige du diapason; l'autre, avec un des pôles, négatif par exemple, d'une pile P. Les extrémités du noyau de l'électro-aimant sont à 2 ou 3 millimètres du diapason.

i est une plaque en platine ou en acier soudée à une vis dont

l'écrou fixe est relié à l'autre pôle de la pile : c'est la *plaque* interruptrice.

Quand on met cette plaque en contact avec  $S'$ , le courant de la pile passe dans l'électro-aimant, qui attire aussitôt les branches du diapason et par suite  $S'$ ; le courant est interrompu et ne se rétablit que lorsque les branches du diapason ont effectué une « période », c'est-à-dire une vibration complète (aller et retour). L'appareil fonctionne donc comme un « trembleur » électrique.

Plaçons en face du diapason un cylindre  $C$  (fig. 115), recouvert de papier enfumé, et animé, à l'aide d'une vis et d'une manivelle ou d'un moteur quelconque, d'un mouvement hélicoïdal, perpendiculaire à la longueur du diapason. Si, pendant ce mouvement, on appuie légèrement sur le papier la pointe du style  $S$ , le diapason étant mis en vibration, celle-ci décrira sur le papier une sinusoïde. La figure 116 représente les positions extrêmes de la branche  $D$ , du style  $S$ , et un fragment de sinusoïde *ceda...* agrandis.

Les points tels que  $c$  et  $d$  correspondent à une *période*; les points

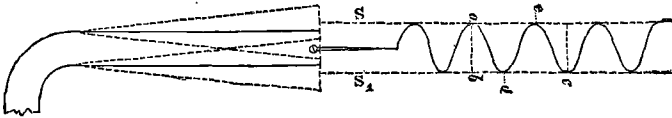


FIG. 116.

tels que  $d$  et  $a$  correspondent à une *vibration*. L'*amplitude* est la distance entre  $S$  et  $S_1$  ou entre  $a$  et  $b$ . Si l'on compte le nombre des sommets  $c, d, \dots$  situés d'un même côté de la sinusoïde pendant une seconde, on a le nombre de *périodes* dans une seconde; le nombre total des sommets  $c, e, d, a, \dots$  correspond au nombre de *vibrations* par seconde.

On voit ainsi comment on peut aisément enregistrer les vibrations de l'instrument et évaluer des fractions plus ou moins grandes d'une seconde.

Pour conserver ce tracé graphique, il n'y a qu'à fendre le papier enfumé suivant une génératrice du cylindre et à le plonger dans une dissolution de gomme laque dans l'alcool. Le tracé est recouvert d'une pellicule de gomme aque qui le préserve contre tout frottement.

Le mouvement vibratoire ainsi obtenu jouit des propriétés suivantes :

1° Il est *continu* tant que la pile qui l'entretient a une énergie

suffisante, pourvu qu'on change de temps en temps le point de contact du style  $S'$  et de la plaque  $I$ ;

2° Il est très régulier. L'entretien électrique n'altère pas l'isochronisme des périodes, et le nombre des vibrations est très sensiblement le même que celui qui correspond au diapason vibrant à la

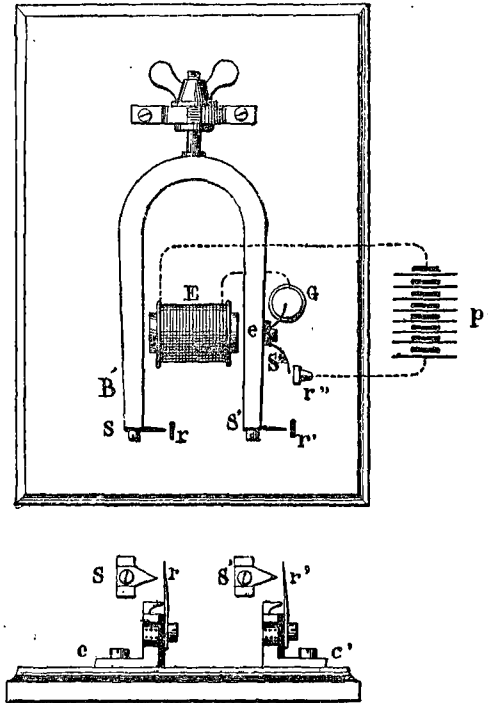


FIG. 117.

façon ordinaire. Lorsque l'amplitude des vibrations à l'extrémité du diapason ne varie pas de plus de 2 à 3 millimètres (1 à 3 millimètres, par exemple), la durée de la période ne varie pas de  $\frac{1}{1000}$  si l'on opère à des températures peu différentes.

On a construit des diapasons donnant ainsi de 30 à 1000 périodes par seconde.

Comme les deux branches d'un diapason vibrent et marchent simul-

tanément vers leur position d'équilibre ou de repos et s'en éloignent simultanément, on peut faire de cet instrument un *distributeur* de courants d'une régularité parfaite (*Annales télégraphiques*, 3<sup>e</sup> série, vol. V, 1878, p. 290).

La figure 117 représente une projection horizontale et une partie de la projection verticale d'un instrument disposé à cet effet.

G est un godet contenant du mercure, dans lequel plonge *continuellement* l'extrémité d'un style isolé, en acier, dont l'autre extrémité S'' ferme, quand elle touche le butoir r'', le circuit d'une pile locale p', et produit ainsi l'entretien du mouvement du diapason.

S et S' sont deux styles rigides en argent fixés aux deux branches B, B' du diapason ; à l'état de repos, ils se trouvent à une petite distance de deux ressorts en acier platinés, r, r', fixés à des équerres métalliques, C, C', et reposant sur deux butoirs voisins de leurs extrémités supérieures.

Quand le diapason est en mouvement continu, les styles S et S' viennent *alternativement* presser les ressorts correspondants pendant une demi-période du mouvement ; de sorte que si le diapason effectue, par exemple, 25 vibrations doubles ou périodes par seconde, chaque style touche son ressort 25 fois par seconde, la durée de chaque contact étant d'un peu moins de  $\frac{1}{50}$  de seconde. Pendant ce temps, l'une des pièces C ou C' est mise en communication métallique avec le diapason.

Supposons, par exemple, que les pièces C et C' soient reliées, soit aux pôles d'une même pile dont le milieu est à la terre, soit aux pôles de deux piles différentes, à la terre par leurs autres pôles ; et si la tige du diapason est reliée à une extrémité d'un circuit mis à la terre par son autre extrémité, cet instrument *distribuera* les courants intermittents dans le circuit, sans *confusion possible*.

#### MESURE DES COURANTS

L'étude de l'action des courants sur les aimants s'appelle *l'électromagnétisme* ; celle de l'action des courants sur les courants s'appelle *l'électro-dynamique* ; celle de l'action des courants sur les composés chimiques, *l'électro-chimie*. Ces trois classes d'actions fournissent trois classes d'instruments pour la mesure des courants : les *galvanomètres*, les *électro-dynamomètres* (chap. xxx) et les *voltamètres* (chap. xxxviii).



## GALVANOMÈTRES DES TANGENTES

En calculant l'action d'un courant circulaire de rayon  $a$  et d'intensité  $C$  sur un pôle  $m$ , placé en un point de l'axe, c'est-à-dire de la normale au plan du courant passant par son centre et à une distance  $D$  de ce dernier, on trouve que les composantes perpendiculaires à l'axe se détruisent, et que celles dirigées suivant l'axe ont une somme égale à

$$\frac{2\pi Ca^2}{(a^2 + D^2)^{\frac{3}{2}}} \times m.$$

Si, au lieu d'un pôle unique, on a une aiguille de boussole de moment  $lm$ , et si le cercle considéré est dans le plan du méridien magnétique, cette action donne lieu à un couple qui tend à dévier l'aiguille et dont le moment est

$$\frac{2\pi Ca^2}{(a^2 + D^2)^{\frac{3}{2}}} \times ml \quad \text{ou} \quad \frac{2\pi Ca^2}{\rho^3} \times ml, \quad \text{en posant } \rho^2 = a^2 + D^2.$$

L'aiguille déviant d'un angle  $\delta$ , il y a équilibre entre ce couple et le couple terrestre; cet équilibre est exprimé par

$$\frac{2\pi Ca^2}{\rho^3} m \cos \delta = Hm \sin \delta$$

ou

$$\frac{2\pi Ca^2}{\rho^3} = H \tan \delta;$$

d'où

$$C = \frac{\rho^3}{2\pi a^2} H \tan \delta = \frac{\rho^3 H}{2A} \tan \delta, \quad A \text{ étant la surface } \pi a^2.$$

Cette formule suppose que l'aiguille aimantée est infiniment petite; si elle a une longueur finie, le calcul de l'action conduit à une série dont les termes ne contiennent que les puissances paires de la distance  $l$  des pôles. En se bornant aux termes en  $l^2$ , on a :

$$C = \frac{\rho^3 H}{2A} \tan \delta \left[ 1 - \frac{l^2 (a^2 - 4D^2)}{16\rho^4} (3 - 15 \sin^2 \delta) \right].$$

## BOUSSOLE DE GAUGAIN

Si  $a=2D$ ,  $C$  est proportionnel à  $\tan \delta$ . Le centre de l'aiguille doit

alors se trouver au sommet d'un cône droit dont le cercle de base, qui forme le courant  $a$ , ait un rayon  $a$  double de la hauteur  $D$ .

Dans ce cas,

$$\rho^2 = a^2 + D^2 = \frac{5}{4} a^2 \quad \text{et} \quad C = \frac{aH}{2\pi} \left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \tan \delta = \frac{aH}{4,504} \tan \delta.$$

L'angle  $\varphi$  au sommet du cône sera tel que

$$\tan \frac{\varphi}{2} = 2 \quad \text{ou} \quad \varphi = 126^\circ 56'.$$

M. Gaugain a trouvé cette valeur de  $D$  en étudiant la déviation exercée par un courant dont l'intensité était mesurée par une boussole des sinus, sur une aiguille qu'il plaçait à différentes distances sur l'axe, et déterminant la position pour laquelle il y avait proportionnalité entre la déviation de l'aiguille et l'intensité mesurée par la boussole des sinus.

La figure 102 (p. 485), représente une boussole reposant sur le même principe, mais ayant deux cadres égaux, parallèles et symétriques par rapport à l'aiguille.

#### BOUSSOLE DES TANGENTES ORDINAIRES

Si nous faisons  $D = 0$  ou  $\rho = a$  dans les formules précédentes, on a :

$$C = \frac{aH}{2\pi} \tan \delta \left[ 1 - \frac{3}{16} \frac{l^2}{a^2} + \frac{15}{16} \frac{l^2}{a^2} \sin^2 \delta \right].$$

Ce sera la formule donnant la correction aux boussoles des tangentes ordinaires.

Si on ne fait pas la correction, on a :

$$C = \frac{aH}{2\pi} \tan \delta = \frac{a^3 H}{2A} \tan \delta.$$

Mais il faut avoir soin que l'aiguille soit très petite et les dimensions du cadre très grandes.

En remplaçant  $\pi$  par sa valeur, on a

$$C = \frac{aH}{6,283} \tan \delta.$$

Pour un courant d'intensité donnée, l'angle  $\delta$  fourni par la boussole

de Gaugain est plus petit que l'angle  $\delta$  fourni par une boussole ordinaire de même rayon, car on a :

$$C = \frac{aH}{6,283} \operatorname{tang} \delta = \frac{aH}{4,504} \operatorname{tang} \delta',$$

d'où

$$\frac{\operatorname{tang} \delta}{\operatorname{tang} \delta'} = \frac{6,283}{4,504} = 1,39.$$

Si le cadre d'une boussole des tangentes a  $n$  tours de fil de rayon moyen  $a$ , ou une longueur  $l = n \times 2\pi a$ , on a

$$C = \frac{aH}{2n\pi} \operatorname{tang} \delta = \frac{a^2H}{l} \operatorname{tang} \delta.$$

#### SENSIBILITÉ DE LA BOUSSOLE DES TANGENTES

$\delta$  variant de 0 à 90°,  $\operatorname{tang} \delta$  varie de 0 à l' $\infty$ . Il semble donc qu'avec cet appareil on puisse mesurer toutes les intensités de courant. Mais en discutant la formule, on trouve que la sensibilité a son maximum pour  $\delta = 0$  et qu'elle est nulle pour  $\delta = 90^\circ$ . Il faut donc mesurer de très petits angles, et compenser la petitesse de la déviation par la précision de la mesure : d'où l'emploi du miroir.

#### BOUSSOLE DES SINUS

Quand l'aiguille est déviée, faisons tourner le cadre des tours de fil de façon que l'action du courant soit toujours perpendiculaire à l'aiguille, et soit  $\delta$  l'angle dont le cadre a tourné pour que l'aiguille soit encore dans son plan. On a alors, pour l'équilibre,

$$\frac{2n\pi C}{a} = H \sin \delta,$$

d'où

$$C = \frac{aH}{2n\pi} \sin \delta.$$

$\sin \delta$  ayant sa plus grande valeur pour  $\delta = 90^\circ$ , cette boussole ne peut mesurer des intensités plus grandes que  $\frac{aH}{2n\pi}$ . Sa sensibilité augmente avec  $\delta$ .

Dans les boussoles disposées pour servir à la fois de boussoles des sinus et des tangentes, on a soin d'avoir deux aiguilles différentes,

l'une en forme de double losange ordinaire pour les sinus, l'autre composée d'un aimant très petit, prolongé par un index en aluminium, pour les tangentes.

#### CONSTRUCTION DES GALVANOMÈTRES SENSIBLES

Dans les galvanomètres *sensibles*, les tours de fil sont disposés de manière à occuper les positions dans lesquelles leur action sur l'aimant est la plus grande : on ne laisse autour de l'aimant que l'espace nécessaire pour qu'il puisse osciller librement, et on reserre les spires dans son voisinage. Comme les tours de fil de même rayon ont d'autant moins d'action qu'ils sont plus éloignés du centre, il y aura avantage, pour une longueur de fil donnée, à augmenter l'épaisseur de la bobine au centre, sauf à la diminuer à mesure que l'on

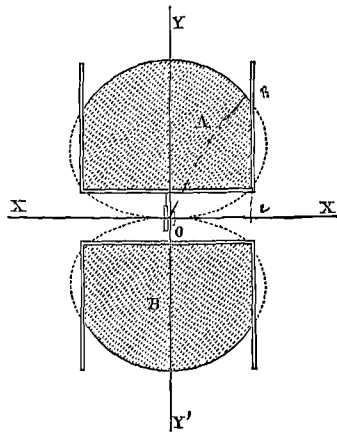


FIG. 118.

s'en écarte. Si  $\rho \sin \theta$  est le rayon d'un tour de fil, et  $\rho \cos \theta$  la distance de son centre au centre de l'aimant,  $l$  la longueur de ce tour, l'action qu'il exerce est proportionnelle à  $\frac{Cl \sin \theta}{\rho^2}$ , ou à  $\frac{Cl}{a^2}$ , en posant  $\rho^2 = a^2 \sin \theta$ .

Si donc la surface sur laquelle le fil est enroulé est une surface de révolution (fig. 118), dont le méridien a pour équation en coordonnées polaires :

$$\rho^2 = a^2 \sin \theta,$$

tous les tours de fil placés suivant les parallèles auront le même effet. L'équation de cette courbe en coordonnées rectilignes, avec  $XX'$  et  $YY'$  comme axes, est

$$a^4 y^2 = (x^2 + y^2)^3.$$

On doit donc enrouler le fil de façon que la surface extérieure de la bobine coïncide avec une surface de ce genre, ce qui donne à l'instrument la forme de la figure, dans laquelle  $AB$  représente la bobine et  $O$  l'aimant mobile sur lequel est collé le petit miroir.

Pour utiliser le mieux possible les positions les plus avantageuses, les premières couches sont formées de fil très fin, et pour ne pas augmenter trop la résistance, on fait croître le diamètre du fil à mesure qu'on s'éloigne de l'aimant.

La soie qui recouvre le fil est imprégnée de paraffine, et la bobine est plongée dans de la paraffine fondue, couche par couche, au fur et à mesure de l'enroulement. La couche extérieure est recouverte de gomme laque pour empêcher l'humidité de pénétrer dans la bobine.

Quand on doit tenir compte de la résistance du galvanomètre, il importe d'employer du fil aussi conducteur que possible; car, pour un cadre donné, l'effet magnétique est proportionnel à la racine carrée de la conductibilité du fil. Il faut donc prendre du cuivre aussi pur que possible; il importe surtout qu'il ne renferme pas de traces de fer ou autre métal magnétique. On doit vérifier le cuivre employé avant son passage à la filière, et examiner s'il agit sur un aimant sensible. La filière d'agate doit être employée de préférence; si les fils sont passés à la filière d'acier, on les plonge pendant quelques heures dans un bain d'acide chlorhydrique à froid, avant de les recouvrir de soie. La matière colorante verte pouvant renfermer des substances magnétiques, on emploie de la soie blanche ou teinte à l'aniline.

Dans les expériences où on se sert des galvanomètres très résistants, comme pour la mesure des courants instantanés, on emploie du fil de maillechort, dont la résistance est plus grande et peu altérée par les variations de température.

Enfin, on prend des précautions spéciales dans les galvanomètres destinés à être traversés par des courants à haut potentiel, pour garantir l'isolement de tours de fil. Ce sont les mêmes que celles en usage dans la construction des bobines d'induction : double couche de soie, etc.

## GALVANOMÈTRES APÉRIODIQUES

On nomme ainsi les appareils disposés de façon à amortir les oscillations de l'aiguille, qui alors se fixe presque du premier coup à sa position d'équilibre. Les galvanomètres de ce genre ont l'aimant enfoncé à peu près complètement dans une grande masse de cuivre qui arrête les oscillations par les courants induits que le mouvement de l'aimant développe dans cette masse. On peut se contenter de placer sur le prolongement de la suspension une plaque d'aluminium, plongeant dans un vase rempli d'eau à une hauteur convenable.

Le miroir doit être très léger : on fixe habituellement au dos quatre petits aimants formés de ressorts de montre.

## GALVANOMÈTRE DIFFÉRENTIEL

Le galvanomètre de la planche XXII est différentiel. Il se compose de deux bobines superposées, comprenant chacune deux cadres, entre lesquels passe la suspension. Les deux circuits sont formés l'un par les cadres de devant, l'autre par ceux de derrière des deux bobines.

Les extrémités des fils de chacun des circuits aboutissent aux quatre vis d'attache dessinées sur la figure. En les numérotant 1, 2, 3, 4 à partir de la droite, le circuit antérieur aboutit en 1, 2, et le circuit postérieur à 3, 4.

Si l'on réunit les bornes 2 et 3 par un gros fil de cuivre, le courant entrant par 1 et sortant par 4 parcourt successivement les quatre cadres de l'appareil, de façon que les actions s'ajoutent ainsi que les résistances.

En réunissant 1, 3 et 2, 4, le courant entrant par les deux premières vis et sortant par les deux dernières, les actions s'ajoutent, mais la résistance n'est plus que le quart de la précédente ; les deux circuits sont alors accouplés parallèlement.

Pour que l'appareil soit bien différentiel, il faut que les deux circuits exercent sur l'aimant des actions égales et contraires et qu'ils aient la même résistance. L'inégalité de résistance se corrige par une petite bobine que l'on place extérieurement de façon à ne pas agir sur l'aimant. Pour avoir des actions égales, on donne au circuit le plus faible quelques tours de fil de plus, que l'on place dans un tube de laiton qui peut glisser dans un tube fixe, placé derrière la bobine supérieure sur le prolongement de l'axe du miroir. En approchant ou éloignant le tube mobile de l'aimant, on arrive à égaliser les deux

actions. La vérification se fait en reliant 1 et 3 ensemble par un gros fil, et reliant respectivement 2 et 4 aux pôles d'une pile, ou encore, en reliant 2 et 3 à l'un des pôles d'une pile et 1 et 4 à l'autre pôle. Les actions doivent se détruire, et on fait mouvoir le tube jusqu'à ce que le galvanomètre soit au zéro.

La dernière disposition est celle pour la mesure des résistances : il suffit d'intercaler la résistance à mesurer entre 1 et le pôle de la pile, et le rhéostat entre 4 et le même pôle, et de faire varier le rhéostat jusqu'à ce que l'équilibre soit établi.

## GALVANOMÈTRE DEPREZ (1)

Le galvanomètre de M. Marcel Deprez, destiné à la mesure de courants énergiques, se compose de dix-huit petites aiguilles parallèles

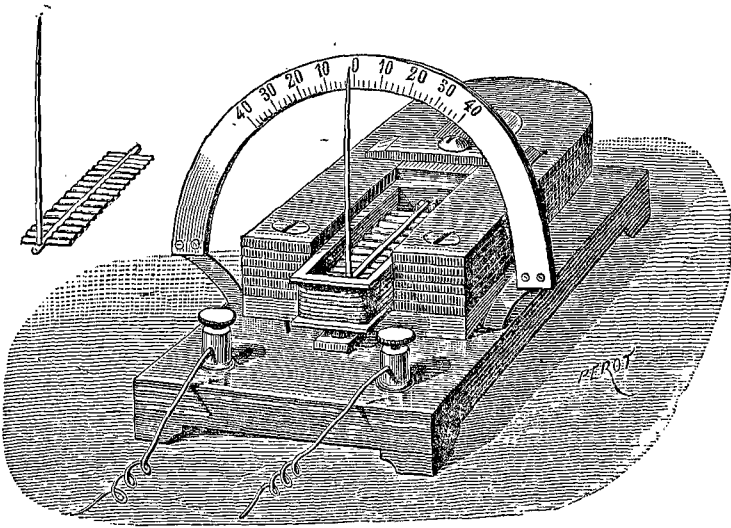


Fig. 119.

en fer doux, montées sur le même axe et placées entre les branches parallèles d'un aimant en fer à cheval très puissant, qui les dirige énergiquement dans son plan. Le fil est enroulé autour d'un petit

(1) *Journal de physique*, vol. IX, p. 229, juillet 1880.

cadre rectangulaire situé entre les aiguilles et les branches de l'aimant. L'instrument est complété par une aiguille indicatrice mobile autour d'un cadran. Dès que le courant passe, l'aiguille saute brusquement à sa position nouvelle d'équilibre et s'y tient sans osciller et en vibrant comme un diapason. Cet instrument montre les variations brusques de l'intensité, en raison de l'instantanéité de ses indications, qui résulte de la légèreté du système mobile et de l'énergie de l'aimant directeur. Mis dans le circuit d'une machine Gramme, il dénote toutes les irrégularités de son mouvement ; quand on fait passer le courant d'une forte pile dans un gros électro-aimant, on suit, sur le galvanomètre, toutes les variations de l'intensité pendant la période d'aimantation.

Cet appareil permet d'évaluer mécaniquement l'intensité, et de peser, pour ainsi dire, le courant. Si, en effet, on produit une déviation déterminée en faisant agir un poids de 10 grammes à une distance donnée de l'axe, le courant produisant la même déviation exerce un effort égal à celui du poids.

#### MESURE DES COURANTS INSTANTANÉS

Quand les courants ont une durée suffisante pour produire sur une aiguille aimantée une déviation permanente, on les compare par cette déviation, laquelle est proportionnelle, à l'intensité, c'est-à-dire à la quantité d'électricité qui passe dans une seconde. Quand leur durée n'est pas suffisante pour obtenir une déviation fixe, on les compare par la quantité d'électricité transportée pendant le temps  $\theta$  qu'ils durent.  $\theta$  étant cette durée,  $C$  l'intensité moyenne, on mesure  $Q = C\theta$  par l'impulsion que le passage brusque de cette quantité imprime à l'aiguille.  $\theta$  étant supposé assez court pour que l'aiguille ne se déplace pas sensiblement pendant ce temps, on applique les formules pendulaires et on trouve :

$$Q = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \frac{H}{K} \frac{t}{\pi},$$

$\alpha$  étant la déviation extrême de la première vibration, ou l'*elongation*,  $H$  la composante horizontale de la terre,  $K$  la *constante* du galvanomètre,  $t$  la durée de la demi-oscillation de l'aiguille, quand elle oscille sous l'action de la terre seulement,  $\pi$  le rapport de la circonférence au diamètre.

Si  $C_1$  est l'intensité du courant qui, dans l'instrument donné, produit l'unité de déviation (45 degrés dans un galvanomètre des tan-



gentes, 90 dans une boussole des sinus, 1 division dans un galvanomètre à réflexion), on a :

$$C_1 = \frac{H}{K},$$

d'où

$$Q = \frac{2C_1 t}{\pi} \sin \frac{1}{2} \alpha.$$

Dans le cas d'un galvanomètre des tangentes,

$$C_1 = \frac{aH}{2n\pi},$$

et alors

$$Q = \frac{a}{\pi^2 n} H t \sin \frac{1}{2} \alpha.$$

Si l'on compare deux décharges avec le même instrument, on a .

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{\sin \frac{1}{2} \alpha}{\sin \frac{1}{2} \alpha'}.$$

Dans les galvanomètres à réflexion, on peut remplacer les sinus par les arcs, et alors

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{\alpha}{\alpha'}.$$

#### MESURE DES COURANTS INSTANTANÉS SUCCESSIFS

Si la quantité d'électricité contenue dans une charge donnée peut être reproduite continuellement dans les mêmes conditions, et qu'on fasse passer à travers le galvanomètre une série de décharges successives, à intervalles réguliers et très courts, on obtient une déviation permanente. Cette déviation fait connaître l'intensité  $C$  du courant ainsi produit : le rapport  $\frac{C}{m}$  de cette intensité au nombre de décharges par seconde donne la quantité d'électricité contenue dans chaque décharge.

#### MESURE DE LA CAPACITÉ ÉLECTRIQUE

On déduit de là un moyen de mesurer la capacité électrique  $S$  d'un conducteur ou condensateur, en le déchargeant à travers un galvanomètre. On a en effet  $Q = SE$ . Si  $R_1$  est la résistance du circuit à

travers lequel la force électromotrice  $E$  produit l'unité de déviation, on a :

$$C_1 = \frac{E}{R_1}.$$

(voy. chap. xx), et par suite,

$$S = \frac{Q}{E} = \frac{2t \sin \frac{1}{2} \alpha}{\pi R_1}.$$

#### RÉSISTANCE DE L'AIR

Dans ces expériences, il est nécessaire d'employer un galvanomètre balistique. On a une correction approchée pour la résistance de l'air, en notant la déviation  $\alpha'$  de l'aiguille, quand elle revient du même côté du zéro, après avoir fait une oscillation complète.  $\alpha + \frac{\alpha - \alpha'}{4}$  est une valeur approchée de l'arc d'impulsion qu'on aurait obtenu, si cet arc n'avait pas été diminué par la résistance de l'air. J. R.

## CHAPITRE XX

### RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE ET UNITÉS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

Il n'existe pas de corps qui soient des conducteurs parfaits de l'électricité; tous offrent une résistance à son passage.

#### LOI DE OHM

La loi de Ohm, qui est le fondement de la mesure électrique moderne, s'énonce ainsi :

*L'intensité du courant, dans un fil métallique ou un autre conducteur, est directement proportionnelle à la différence de potentiel de ses extrémités, et inversement proportionnelle à sa résistance.*

La différence de potentiel des extrémités s'appelle habituellement « la force électromotrice. » L'identité des deux expressions est évidente d'après nos définitions de la page 38 de ce volume. Nous pouvons donc dire que l'intensité de courant est égale à la force électromotrice divisée par la résistance.

Plus brièvement, si  $C$  est l'intensité du courant,  $E$  la force électromotrice, et  $R$  la résistance du circuit, nous avons :

$$C = \frac{E}{R} \quad (1)$$

ou

$$E = CR; \quad (2)$$

c'est-à-dire que la force électromotrice est égale au produit du courant par la résistance, ou

$$R = \frac{E}{C}; \quad (3)$$

c'est-à-dire que la résistance est égale à la force électromotrice divisée par le courant.

#### MESURE ÉLECTRO-STATIQUE DE COURANT ET DE RÉSISTANCE

Si l'on a deux conducteurs à des potentiels différents et qu'on les réunisse par un fil métallique, il se développera un flux d'électricité ou un courant le long du fil; et s'il passe dans chaque seconde l'unité électro-statique de quantité, telle qu'elle a été définie à la page 83 de ce volume, on dit que l'intensité du courant (en mesure électro-statique) est égale à l'unité.

Appelons maintenant  $Q$  la quantité d'électricité qui a été définie à la page 83, transportée par un courant  $C$  dans un temps  $t$ . Alors  $Q$  est égal au produit de l'intensité du courant par le temps pendant lequel on laisse le courant passer, c'est-à-dire

$$Q = Ct. \quad (4)$$

De même, la quantité d'eau qui s'écoule par un robinet est égale au produit de l'intensité du courant par le temps pendant lequel on laisse le robinet ouvert.

En vertu de la loi de Ohm, l'unité de résistance électrique, en mesure électro-statique, est une résistance telle que, avec une différence de potentiel représentée par un certain nombre d'unités électro-statiques, la quantité d'électricité qui traversera cette résistance dans une seconde sera représentée par le même nombre d'unités électro-statiques

d'intensité; car l'équation (3) montre que si R est égal à l'unité, on a  $E = C$ .

Des équations (1) et (4) on tire aussi :

$$Q = \frac{Et}{R} \quad (5)$$

ou

$$R = \frac{Et}{Q}; \quad (6)$$

d'où, la résistance d'un conducteur, exprimée en mesure électro-statique, est égale au temps nécessaire pour le passage d'une unité d'électricité à travers cette résistance, lorsqu'on maintient entre ses extrémités une différence de potentiel égale à l'unité; et

$$\text{résistance} = \frac{\text{temps} \times \text{force électromotrice}}{\text{quantité}} \quad (4).$$

#### MESURES ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

Avant d'étudier la mesure électro-magnétique de résistance, il est nécessaire d'examiner les mesures électro-magnétiques de quantité et de potentiel.

#### MESURE ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE COURANT.

Dans la description du galvanomètre des tangentes, on a vu que l'intensité du courant, mesurée par le galvanomètre des tangentes, est donnée par l'équation suivante :

$$C = H \operatorname{tang} \delta \frac{1}{2n\pi}.$$

On obtient l'unité d'intensité de courant en posant  $C = 1$  dans cette équation; en d'autres termes, l'unité d'intensité

(1) Everett, *Unités et constantes physiques*, p. 130.

de courant est l'intensité du courant qui donnera une déviation  $\delta$ , telle que

$$\text{tang } \delta = \frac{2n\pi}{aH}.$$

*Problème.* — Supposons que la valeur moyenne de la force horizontale de la terre soit actuellement à Greenwich de 0,1794, quelle déviation produirait l'unité de courant dans un galvanomètre des tangentes formé d'un simple anneau de 50 centimètres de diamètre ?

Nous avons :

$$n = 1, \quad \pi = 3,1416, \quad H = 0,1794, \quad a = 25 \text{ centimètres.}$$

d'où

$$\text{tang } \delta = \frac{2 \times 3,1416}{25 \times 0,1794},$$

ce qui correspond à un angle de déviation

$$\delta = 54^{\circ} 6'.$$

#### MESURE ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE QUANTITÉ

La quantité  $Q$ , qu'un courant transporte dans un temps donné, est le produit du courant par le temps pendant lequel il passe.

L'unité électro-magnétique de quantité est la quantité d'électricité que l'unité de courant transporte dans l'unité de temps, c'est-à-dire dans une seconde.

#### MESURE ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE POTENTIEL, OU DE FORCE ÉLECTROMOTRICE

Le travail développé par une force électromotrice  $E$ , en poussant une quantité d'électricité  $Q$  à travers un conducteur, est  $EQ$ ; ou : le travail est égal au produit de la quantité d'électricité par la force électromotrice.

L'unité de force électromotrice est la force qu'il faut maintenir aux extrémités d'un circuit pour que l'unité de quantité d'électricité développe une unité de travail en passant dans le circuit.

#### MESURE ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE RÉSISTANCE

A l'aide de la loi de Ohm, nous pouvons définir maintenant l'unité électro-magnétique de résistance.

L'unité de résistance est le quotient d'une force électromotrice par un courant numériquement égal à cette force; car, nous avons  $R = \frac{E}{C}$ , et  $R = 1$  quand  $E = C$ .

On dit alors qu'un fil a une résistance d'une unité, quand une force électromotrice, agissant le long de ce conducteur, produit un courant d'une valeur numérique égale à la sienne.

Quand nous en serons à la théorie des dimensions, nous démontrerons que cette résistance est une vitesse; c'est-à-dire que le rapport de force électromotrice à courant est le rapport d'une longueur à un temps.

#### MESURE ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE CAPACITÉ

Le condensateur de capacité égale à l'unité est celui qui prend l'unité de potentiel quand on le charge avec l'unité de quantité; ou, en d'autres termes, c'est le condensateur dont le potentiel est toujours égal à sa charge, quand ces deux grandeurs sont exprimées en mesure électro-magnétique.

#### UNITÉS PRATIQUES. — WEBER, VOLT, OHM (1)

Comme les grandeurs de quelques-unes de ces unités ne

(1) Everett, *Unités et constantes physiques*, p. 137.

sont pas commodes, on emploie dans la pratique des multiples décimaux ou des sous-multiples de ces unités.

QUANTITÉ. — WEBER

L'unité pratique de quantité s'appelle le *weber*; elle est égale à  $\frac{1}{10^8}$  de l'unité absolue électro-magnétique de quantité.

$$1 \text{ weber} = \frac{1}{10^8} \text{ unité de quantité C. G. S.}$$

FORCE ELECTRO-MOTRICE. — VOLT.

L'unité pratique de force électro-motrice s'appelle le *volt*, et est égale à 100 millions d'unités absolues de potentiel.

$$1 \text{ volt} = 10^8 \text{ unités C. G. S.}$$

La force électromotrice de l'élément étalon de Latimer Clark (1) à 15°,5 est de 1,457 volt.

RÉSISTANCE. — OHM

L'unité pratique de résistance s'appelle le *ohm* ou *unité B. A.*; elle est égale à 1000 millions d'unités électro-magnétiques absolues.

$$1 \text{ ohm} = 10^9 \text{ unités C. G. S.}$$

COURANT

L'unité pratique de courant est égale à  $\frac{1}{10}$  de l'unité C. G. S.

CAPACITÉ. — MICROFARAD

L'unité pratique de capacité s'appelle le *microfarad*;

(1) Vol. I, p. 450.



elle est égale à 1 millième de billionième de l'unité absolue électro-magnétique.

$$1 \text{ microfarad} = 10^{-15} \text{ unités C. G. S.}$$

Un condensateur d'une capacité de 1 microfarad contiendrait environ 300 feuilles circulaires d'étain, séparées

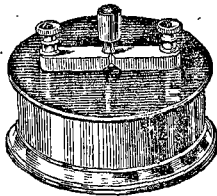


Fig. 120.

par des lames de mica, et serait contenu dans une boîte (fig. 120) de 8 centimètres de hauteur et de 16 centimètres de diamètre (1).

Un farad vaut 1 million de microfarads.

#### RELATIONS ENTRE LES UNITÉS PRATIQUES

Le weber, ou l'unité pratique de quantité, est la quantité que transporte, dans une seconde, un courant développé par une force électromotrice de 1 volt, agissant à travers une résistance de 1 ohm.

L'unité pratique de courant est un courant d'un weber par seconde; c'est le courant engendré par une force électromotrice de 1 volt à travers une résistance de 1 ohm.

Le farad est la capacité d'un condensateur qui contient 1 weber à un potentiel de 1 volt.

Le microfarad est la millionième partie du farad.

(1) L'introduction de la cheville relie les deux armatures et décharge le condensateur.

## APPENDICE AU CHAPITRE XX

### FORCE ÉLECTROMOTRICE ET ÉNERGIE

Tout courant produisant un travail est lui-même le résultat de l'action d'une certaine force. Toute force donnant naissance à un courant s'appelle une force électromotrice. Ainsi une différence de potentiel est une force électromotrice : la force est mesurée par cette différence, que l'on apprécie à l'aide des électromètres ; mais on peut la mesurer aussi par le travail que produit le courant auquel elle donne naissance.

Or le travail  $W$ , effectué par une quantité  $Q$  d'électricité transportée d'un point dont le potentiel est  $V$  à un point dont le potentiel est  $V'$ , est  $Q(V - V')$ , ou, posant  $V - V' = e$ ,

$$W = Qe :$$

c'est le même que celui d'un poids  $Q$  descendant du niveau  $V$  au niveau  $V'$ , ou tombant d'une hauteur  $V - V' = e$ .

Si  $V' = 0$ ,  $W = QV$ , l'énergie d'un corps électrisé est représentée par  $\frac{1}{2} VQ$  (p. 266).

Le coefficient  $\frac{1}{2}$  tient à ce que, pendant la décharge d'un corps chargé, le potentiel n'est pas constant et tombe de  $V$  à  $0$ . On multiplie alors  $Q$  par le potentiel moyen  $\frac{V}{2}$ . Mais si le potentiel  $V$  reste constant, en laissant le corps en communication avec une source  $V$ , le travail est alors  $QV$ .

Une certaine quantité de chaleur représente une certaine quantité d'énergie et a un équivalent mécanique. Il n'en est pas de même pour l'électricité : car l'énergie électrique est le produit de deux facteurs : la quantité et le potentiel. De même, dans un gaz à une certaine pression, l'énergie est le produit de la masse du gaz par cette pression. Pour un poids qui change de niveau, l'énergie est le produit du poids par la hauteur de chute.

Il n'y a donc pas de transformation réciproque du travail ou de la chaleur en quantité d'électricité ; l'électricité n'est qu'un intermé-

diaire et n'a d'autre rôle que d'emmagasiner la force vive. Le travail et la chaleur ne se transforment pas plus en électricité qu'ils ne se transforment en gaz ou bien en corps solide, quand on comprime le premier ou qu'on élève le second à une certaine hauteur (1).

## LOI DE JOULE

Si dans la relation  $W = Qe$  on fait  $Q = Ct$  (loi de Faraday) et  $e = Cr$  (loi de Ohm), on a  $W = Qe = Cet = C^2rt$  (loi de Joule).

J étant l'équivalent mécanique de la chaleur,  $\theta$  le nombre de calories dégagées, on a :

$$W = Qe = Cet = \frac{e^2}{r} t = C^2 r t = J\theta,$$

ce qui permet de calculer le nombre de calories développées par un courant  $C$  dans un conducteur de résistance  $r$ , faisant partie de son circuit.  $E$  étant la somme des forces électromotrices du circuit,  $R$  celle des résistances, on a

$$C = \frac{E}{R};$$

par suite,

$$W = J\theta = \frac{E^2}{R^2} r t.$$

Si  $r = R$ , le travail total ou la chaleur totale engendrée dans le circuit sera :

$$\frac{E^2}{R} t, \quad \text{ou} \quad C^2 R t.$$

Il est clair, en effet, que l'on a alors comme expression de l'énergie :

$$QE = Cet = \frac{E^2}{R} t = C^2 R t.$$

## RELATIONS ENTRE LES GRANDEURS ÉLECTRIQUES

Entre les cinq grandeurs électriques : quantité  $Q$ , courant (ou intensité)  $C$ , force électromotrice  $E$ , résistance  $R$ , capacité  $S$ , nous avons 4 relations communes à tous les systèmes d'unités, savoir :

$$Q = Ct;$$

$$W = QE;$$

$$C = \frac{E}{R};$$

$$S = \frac{Q}{E}.$$

(1) Blavier, *Annales télégraphiques*, vol. II. p. 264; 1875.

Ces quatre relations définissent les unités de quatre des grandeurs électriques en fonction de la cinquième et de l'unité de travail  $W$ . Si ces deux dernières sont exprimées en unités absolues, les unités électriques seront aussi exprimées en fonction des unités fondamentales de longueur, masse et temps.

#### SYSTÈME ÉLECTRO-STATIQUE

Dans ce système, on définit l'unité de quantité électrique par la loi de Coulomb. La force  $F$  qui s'exerce entre deux quantités  $Q$  et  $Q'$  d'électricité à la distance  $D$  est

$$F = f \frac{QQ'}{D^2},$$

étant la force entre deux unités d'électricité à l'unité de distance. Prenons pour unité de quantité celle qui à l'unité de distance repousse une quantité égale avec l'unité de force; alors, si l'on fait  $Q = Q' = 1$ ,  $D = 1$  et  $F = 1$ , on a  $f = 1$ , et entre deux quantités égales  $Q$  à la distance  $D$ , on a :

$$F = \frac{Q^2}{D^2}, \quad \text{d'où} \quad Q = D \sqrt{F}.$$

$D$  et  $F$  étant exprimés en unités absolues,  $Q$  sera exprimé en unités absolues.

#### SYSTÈME ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE

Dans ce système, on définit l'unité de courant par l'action d'un courant sur un aimant. Un courant circulaire d'intensité  $C$  et de longueur  $l$  exerce sur un pôle  $m$  placé à son centre une force

$$F = f \frac{lmC}{a^2},$$

$a$  étant le rayon. Prenons pour unité de courant celui qui, passant dans un fil de longueur  $l = 1$ , recourbé en arc de cercle de rayon  $a = 1$ , exerce sur un pôle  $m = 1$  placé à son centre une force  $F = 1$ ; alors  $f = 1$ , et la formule devient

$$F = \frac{lmC}{a^2},$$

d'où

$$C = \frac{a^2 F}{lm}.$$

L'angle au centre  $\alpha$  de l'arc, tel que sa longueur soit égale au rayon, est donné par

$$\frac{\alpha}{360^\circ} = \frac{a}{2\pi a} = \frac{1}{2\pi}, \quad \text{d'où} \quad \alpha = \frac{360}{2\pi} = 57^\circ 1/4.$$

L'unité de courant peut être définie de bien d'autres manières : par exemple, par l'équation du galvanomètre des tangentes (voir p. 515).

On verra plus tard que le rapport  $v$  de l'unité électro-magnétique à l'unité électro-statique de quantité  $= 3 \times 10^{10}$ .

En représentant par les grandes lettres les nombres exprimant les grandeurs en mesure électro-magnétique, et par les petites lettres les nombres exprimant les mêmes grandeurs en mesure électro-statique, on a les relations suivantes :

$$q = vQ, \quad c = vC, \quad e = \frac{1}{v} E, \quad r = \frac{1}{v^2} R, \quad s = v^2 S.$$

Les rapports des unités sont évidemment inverses de ceux des nombres mesurant la même quantité.

Pour 1 Daniell,  $e = 0,00374$ , par suite  $E = 0,00374 \times 3 \times 10^{10}$  unités  $= 1,12$  volts.

#### UNITÉS PRATIQUES

*Résistance.* — Outre le *ohm*, représenté par le symbole  $\omega = 10^9$  unités C. G. S., on emploie aussi le *megohm*, représenté par  $\Omega$ , et qui vaut 1 million de ohms.  $\Omega = 10^6 \omega = 10^{15}$  unités C. G. S. On emploie aussi quelquefois le *microhm*  $= \omega \times 10^{-6} = 10^3$  unités C. G. S.

*Force électromotrice.* — Le *volt*  $V = 10^8$  unités C. G. S.

Le *microvolt*  $v = V \times 10^{-6} = 10^2$  unités C. G. S.

*Courant ou intensité.* — Le *weber*  $= \Gamma = \frac{E}{R} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ohm}} = \frac{V}{\omega} = 10^{-4}$  unités C. G. S.

Pour les usages télégraphiques, on emploie le *milliweber*  $= \gamma = \frac{\Gamma}{10^3} = 10^{-7}$  unités C. G. S.

Le courant dont on se sert pour actionner les récepteurs Morse vaut 15 ou 16  $\gamma$ .

*Quantité.* — Le *weber* par seconde, défini par la relation  $Q = Ct$ .

*Capacité.* — Le *farad*  $= \Phi = \frac{Q}{E} = \frac{1 \text{ weber}}{1 \text{ volt}} = \frac{\Gamma}{V} = 10^{-9}$  unités C. G. S.

Le *microfarad* =  $\varphi = \Phi \times 10^{-6} = 10^{-45}$  unités C. G. S.

Un mille marin (1852 mètres) de câble électrique ordinaire a une capacité de  $\frac{1}{3} \varphi$  environ.

EXEMPLES DE TRANSFORMATION DE FORMULES

*Travail.* — Le travail  $W = C^2 r t$ . Si  $C$  est en webers et  $r$  en ohms, le produit  $C^2 r$  représente  $10^7 C^2 r$  ergs =  $\frac{10^7 C^2 r}{g}$  ou  $\frac{10^7 C^2 r}{981}$  grammes-centimètres =  $\frac{10^2 C^2 r}{981}$  kilogrammètres, soit environ  $\frac{1}{10} C^2 r$  kilogrammètres par seconde.

*Chaleur.* — On a  $J \theta = C^2 r t = 10^7 C^2 r t$  ergs, si  $C$  est en webers et  $r$  en ohms.

Alors

$$\theta = \text{nombre de calories-grammes} = \frac{10^7 C^2 r t}{4,2 \times 10^7} = \frac{C^2 r t}{4,2}.$$

*Capacité d'un câble sous-marin.* — En unités statiques, on a vu que  $s = \frac{K l \times 0,4343}{2 \log \frac{D}{d}}$ .

En unités magnétiques  $S = \frac{s}{v^2} = \frac{K l \times 0,4343}{2 \times 9 \times 10^{20} \log \frac{D}{d}}$  unités absolues C. G. S. =  $\frac{K l \times 0,4343 \times 10^{15}}{2 \times 9 \times 10^{20} \log \frac{D}{d}} \varphi$ .

En faisant  $l = 185\,200$  centimètres, la capacité par mille marin sera en microfarads :

$$\frac{K \times 0,0447}{\log \frac{D}{d}}.$$

Pour la gutta-percha  $K = 4,2$ , et la capacité par mille d'un câble en gutta-percha sera  $\frac{0,1877}{\log \frac{D}{d}}$ .

*Capacité de la terre en microfarads.* — La capacité de la terre en mesure statique est égale à son rayon, soit  $6,37 \times 10^8$ . En mesure magnétique  $S = \frac{s}{v^2} = \frac{6,37 \times 10^8}{9 \times 10^{20}} = 0,71 \times 10^{-12}$  u. C. G. S. =  $0,71 \times 10^{-12} \times 10^9 \varphi = 0,00071 \varphi$ .

Un farad  $\Phi$  représente donc 1400 fois la capacité de la terre, ou bien encore :

Capacité de la terre =  $0,00071 \times 10^6 \varphi = 710$  microfarads = capacité de  $710 \times 3$  ou de 2130 milles marins de câble télégraphique ordinaire.

*Remarque.* — Comme  $r = \frac{R}{v^2}$  et  $s = Sv^2$ , le produit  $rs$  de la résistance par la capacité en mesure électro-statique = le produit  $RS$  en mesure électro-magnétique; et comme

$$\omega = 10^9 \text{ u. C. G. S.} \quad \text{et} \quad \Phi = 10^{-9} \text{ u. C. G. S}$$

et

$$\Omega = 10^6 \omega \quad \text{et} \quad \varphi = 10^{-6} \Phi,$$

il en résulte que toutes les formules dans lesquelles entre seulement le produit de la capacité par la résistance subsistent sans changement quand la capacité et la résistance sont exprimées soit en unités statiques, soit en unités magnétiques, soit en farads et ohms, soit en microfarads et megohms.

J. R.

## CHAPITRE XXI

### DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE RÉSISTANCES

On constate, par expérience, qu'avec une matière donnée homogène, la résistance d'un fil métallique, de section uniforme, varie en raison directe de sa longueur.

La résistance d'un fil de longueur donnée varie en raison inverse de sa section, c'est-à-dire en raison inverse de son poids.

Par conséquent, la résistance d'un fil uniforme d'une matière déterminée est proportionnelle au quotient de sa longueur par son poids.

La résistance varie avec les matières. Par exemple, si la résistance du cuivre est représentée par 1615, celle du fer le sera par 9827.

Il est évident que si l'on prend pour étalon un certain fil arbitraire, et qu'on lui compare les résistances des autres fils, les nombres ainsi obtenus seront proportionnels, mais en général pas égaux à ceux qui expriment leur résistance en mesure absolue. On prépare certains fils appelés bobines de résistance, par une méthode qui sera décrite ultérieurement, de façon à connaître leurs résistances en mesure absolue, et on leur compare tous les autres fils.

### PONT DE WHEATSTONE

Supposons que l'on ait à sa disposition une série de bobines de résistance et un fil métallique donné dont il s'agit de déterminer la résistance.



Employons l'arrangement imaginé par M. Christie, et connu sous le nom de *pont de Wheatstone*.

Nous décrirons d'abord l'appareil sous la forme qu'on peut appeler le *modèle de démonstration* : c'est une disposition facile à comprendre, mais d'un usage peu commode; nous décrirons ensuite la forme pratique.

Le modèle de démonstration (fig. 121) se compose d'une tablette sur laquelle est fixé un parallélogramme formé de

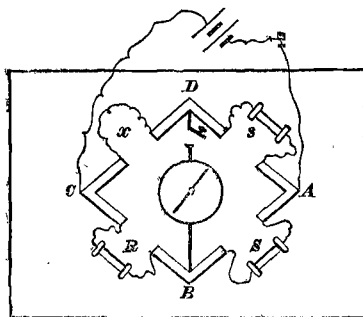


FIG. 121.

bandes métalliques. Aux quatre sommets, ABCD, sont placées des bornes-vis, et sur chaque côté se trouve une ouverture, munie à ses extrémités de bornes-vis. Les fils de pile sont reliés à deux sommets opposés, et ceux du galvanomètre aux deux autres sommets. On place dans les quatre ouvertures trois résistances connues, S, s et R, et la résistance inconnue  $x$ . En faisant varier la résistance R, on trouve que, pour une valeur particulière de cette résistance, le courant de la pile ne fait plus dévier l'aiguille du galvanomètre. Quand il en est ainsi, on a, comme nous allons le démontrer,

$$\text{rapport de } x \text{ à } R = \text{rapport de } s \text{ à } S,$$

d'où l'on tire  $x$  par une simple proportion.

## THÉORIE DU PONT DE WHEATSTONE

Pour comprendre cette théorie, notons le principe suivant, qui est une conséquence directe de la loi de Ohm :

Si un fil de résistance uniforme est mis en communication avec une pile, le potentiel varie régulièrement d'un bout à l'autre sur toute la longueur du fil ; — ainsi, au milieu du fil, la différence de potentiel entre ce point et l'une ou l'autre des extrémités est la moitié de la différence de potentiel des extrémités. A  $\frac{1}{3}$  de l'une des extrémités, le potentiel diffère du potentiel de cette extrémité de  $\frac{1}{3}$  de la différence totale ; et ainsi de suite.

Plus généralement, dans un fil quelconque, le potentiel varie régulièrement le long de la résistance ; c'est-à-dire que si le fil a 10 unités de résistance et que le potentiel soit 0 à un bout, et 100 à l'autre, le potentiel du point distant de 1 unité de résistance du premier bout sera 10, de 2 unités 20, de 3, 30 ; et ainsi de suite.

Lorsque la pile est en action, le courant, en arrivant en A (fig. 121), se partage, de même qu'un cours d'eau se divise en deux branches autour d'une île ; une partie suit le chemin ADC, l'autre le chemin ABC.

Tirons les lignes droites ADC, ABC (fig. 122, 123), représentant les résistances de ces deux trajets, et menons aux deux extrémités A les verticales AL représentant la différence de potentiel entre A et C.

Supposons que AD représente la résistance  $s$ , DC la résistance  $x$  ; la résistance totale de la branche du circuit contenant  $s$  et  $x$  est représentée par la ligne ADC. De même la résistance de la branche contenant S et R est représentée par ABC.

La longueur de la ligne AL, qui représente l'excès du potentiel de A sur celui de C, est évidemment la même dans les deux diagrammes. Tirez la ligne LC dans chacun d'eux.

En vertu du principe que nous avons posé, — à savoir

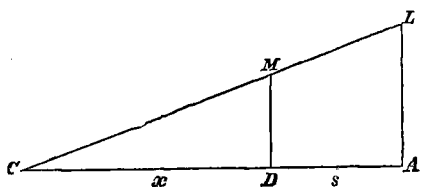


FIG. 122.

que le potentiel diminue régulièrement, — le potentiel (1) en un autre point quelconque du circuit peut être représenté par la longueur de la verticale passant par

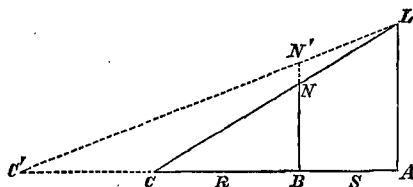


FIG. 123.

ce point, comprise entre la ligne horizontale et la ligne inclinée. Le potentiel en D, où est attaché un des fils du galvanomètre, est représenté par la longueur DM (fig. 122) (2). De même, le potentiel en B, où est attaché l'autre fil, est représenté par BN (fig. 123).

L'effet d'un changement dans la résistance R sera de changer la valeur du potentiel en B; car supposons que R

(1) Par *potentiel* nous entendons l'excès du potentiel sur celui de C.

(2) Le circuit du galvanomètre étant interrompu.

augmente de façon à amener C à la position C', la chute du potentiel serait alors représentée par la ligne ponctuée LC', et le potentiel en B serait représenté par la longueur BN'. Faisons varier R jusqu'à ce que BN soit égal à DM, alors les extrémités du fil du galvanomètre seront au même potentiel, et aucun courant ne passera dans ce fil.

Mais, comme la hauteur AL des deux triangles est la même, les hauteurs de deux autres points D et B, pris sur leurs bases respectives, ne pourront être égales que si le rapport de AD à DC, c'est-à-dire de  $s$  à  $x$ , est égal au rapport de AB à BC, c'est-à-dire de S à R (1); ou encore : le galvanomètre est au zéro lorsque

$$\text{rapport de } s \text{ à } x = \text{rapport de } S \text{ à } R.$$

Mais lorsque deux rapports sont égaux, le rapport du premier terme de l'un au premier terme de l'autre est égal au rapport du second terme de l'un au second terme de l'autre; donc, quand le galvanomètre est au zéro, nous avons

$$\text{rapport de } x \text{ à } R = \text{rapport de } s \text{ à } S,$$

ou,  $x$  égale R, multiplié par

$$\text{rapport de } s \text{ à } S,$$

ce que l'on écrit :

$$x = R \frac{s}{S}.$$

Ainsi, le galvanomètre étant au zéro, on connaîtra  $x$  si l'on connaît les trois autres quantités.

Le lecteur fera un exercice utile en cherchant à démontrer que le choix des sommets opposés auxquels on attache

(1) Nous conseillons au lecteur de faire cette vérification sur un dessin à l'échelle.

les fils de pile n'a pas d'importance, c'est-à-dire que la transposition de la pile et du galvanomètre ne change pas le résultat.

Dans la pratique, le galvanomètre et la pile doivent être disposés de telle sorte que les deux branches du

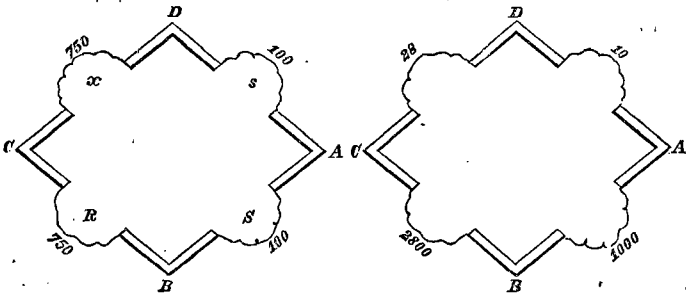


FIG. 124.

FIG. 125.

courant de la pile rencontrent autant que possible la même résistance.

Supposons, par exemple, S et s respectivement égaux à 100, et R à 750. Alors  $\frac{s}{S} = 1$ , et, par suite, R = 750, et les quatre branches seront disposées comme dans la figure 124. Les fils de pile devraient être attachés aux points A, C, et la résistance dans chaque branche serait de 850. Si on les attachait aux points B, D, la résistance dans l'une des branches serait 1500, et dans l'autre 200 seulement. Supposons maintenant que nous ayons :

$$S = 1000, s = 10, \text{ et } R = 2800.$$

$x$  est donné par

$$x = R \frac{s}{S} = 2800 \frac{10}{1000} = 28.$$

On devrait attacher les fils de pile en B, D, parce que

dans ce cas les résistances des deux branches seraient, comme dans la figure 125, 1010 et 2828; car si on les attachait en A, C, les circuits auraient 38 et 3800.

L'inconvénient d'avoir une grande différence entre les deux branches tient à ce que la presque totalité du courant passe alors dans le circuit qui offre la moindre résistance et l'échauffe, augmentant par cela même la résistance de ce côté du pont (car la résistance d'un fil croît quand le fil est échauffé); tandis que si le courant se partage également, l'accroissement de résistance dû à l'échauffement est le même des deux côtés.

Pour la commodité du calcul, il est d'usage de prendre pour S un multiple décimal ou un sous-multiple de s; alors, quand l'équilibre est établi en faisant varier R, il suffit, pour avoir  $x$ , de multiplier R par une certaine puissance de 10.

#### FORMES PRATIQUES DU PONT DE WHEATSTONE

On ne se sert jamais de la forme de pont que nous venons de décrire, sauf pour la démonstration. Deux formes principales sont en usage dans la pratique. Celle que l'on emploie le plus s'appelle une « boîte de résistance », et l'autre le « pont à curseur ».

#### PONT A CURSEUR

Il consiste (fig. 126 et 127) en une planchette horizontale sur le grand côté de laquelle est tendu un fil métallique d'une grande résistance; sur le côté opposé se trouve une bande de cuivre coupée par des ouvertures. Comparez le diagramme de la figure 127 à celui du modèle de démonstration (fig. 121). Les mêmes lettres indiquent les mêmes points dans les deux figures.

Les communications sont établies comme on le voit ; R n'est pas une résistance variable, mais une résistance arbitrairement choisie. Un des fils de pile A est attaché au curseur qui glisse le long du fil de résistance. S est la résis-



FIG. 126.

tance de la portion de ce fil d'un côté de A, s celle de l'autre portion. Si la résistance du fil est uniforme, il est évident que le rapport  $\frac{s}{S}$  sera égal au rapport des longueurs des portions du fil de chaque côté du curseur. Une échelle est fixée sur la planchette le long du fil, et si l'on suppose l'é-

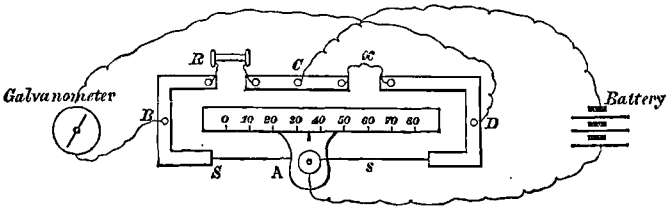


FIG. 127.

quilibre établi avec le curseur, par exemple, sur la division 35, comme dans la figure 127, et  $R = 100$ , on aura :

$$x = R \frac{s}{S} = 100 \frac{45}{35} = \frac{900}{7} = 128,57.$$

On voit que dans cet appareil il n'est pas nécessaire de connaître les valeurs de S et de s, mais seulement leur rapport.

L'appareil est commode pour certains usages, mais il

n'est pas susceptible d'une grande rigueur, car son fonctionnement repose sur l'hypothèse que le fil exposé à l'air conserve une résistance uniforme. Comme chaque parcelle de rouille ou d'écaïlle, qui se forme ou se détache, et chaque éraillure faite par le curseur, affectent la résistance, on voit que cette hypothèse n'est pas strictement vraie.

Le curseur porte habituellement un ressort et une tige verticale pouvant glisser. Le fil de pile est attaché à cette tige, en sorte que le contact est établi seulement au moment voulu, en pressant de haut en bas sur le ressort.

#### BOBINES DE RÉSISTANCE (pl. XXIII)

Une bobine de fil métallique d'une résistance connue s'appelle une *bobine de résistance*. Les bobines de résistance sont habituellement faites soit de fil de maillechort (argent allemand), soit d'un alliage d'argent avec 33,4 pour 100 de platine, parce que la résistance de ces matières varie très peu quand la température change.

Le fil, d'abord soigneusement isolé avec deux ou plusieurs couches de soie, et dont les extrémités sont fixées à des tiges de cuivre massives, est enroulé en double sur une bobine, comme on le voit dans la planche XXIII. Il est d'usage d'enfermer cette bobine dans une enveloppe mince de laiton, et de noyer le fil dans de la paraffine. En plongeant l'enveloppe dans l'eau, on peut porter le fil à la température voulue. L'effet de l'enroulement du fil en double est d'avoir toujours presque concurremment deux courants égaux et de sens contraires. Cette disposition empêche tout effet d'induction sur les aimants ou les fils conducteurs voisins.



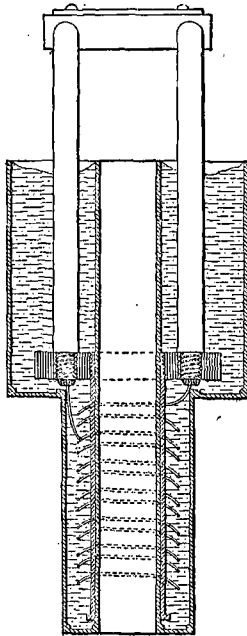


FIG. 1. — Section.

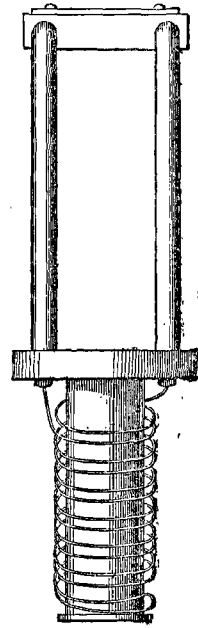






FIG. 2. — Élévation.

 *Metal.*  
 *Ebonite.*  
 *Parafine.*  
 *Solder.*

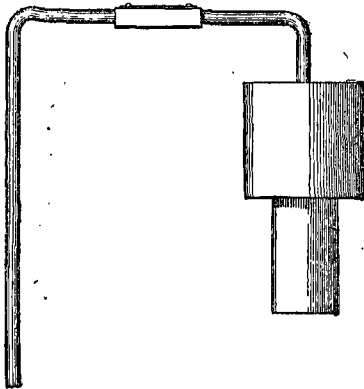


FIG. 3. — Élévation de côté.

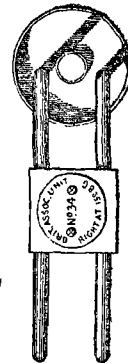


FIG. 4. — Plan.

PL. XXIII. — Étalon de l'unité de résistance électrique.



## BOITE DE RÉSISTANCE AVEC PONT

Une *boîte de résistance* consiste en un certain nombre de bobines de résistances différentes, disposées comme il suit. Toutes les bobines sont fixées sur la face inférieure d'une plaque d'ébonite, qui forme le couvercle d'une boîte d'acajou (fig. 128). La face supérieure du couvercle est garnie d'un certain nombre de blocs de laiton, à chacun

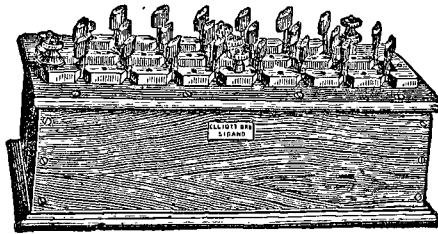


FIG. 128.

desquels sont attachés, par une de leurs extrémités, les fils de deux bobines consécutives, comme on le voit en section dans la figure 129. Si un courant est alors envoyé de A à B, il traverse toutes les bobines. Les bouts de ces blocs de

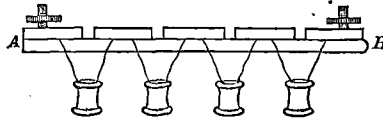


FIG. 129.

laiton ont la forme que l'on voit en plan dans la figure 128, et des chevilles de laiton (1) peuvent être enfoncées dans l'intervalle qui les sépare. Lorsqu'une cheville est placée

(1) Semblables aux chevilles dessinées dans la figure 94, vol. I. p. 471.

dans un des trous ( $\alpha$ , fig. 130), le courant passe directement par la cheville et ne passe pas dans la bobine ; alors, quand une cheville est introduite en  $\alpha$ , par exemple, la



FIG. 130.

résistance totale est diminuée de la résistance de la bobine en  $\alpha$ , ou, d'une façon générale, la résistance de A à B est égale à la somme des résistances débouchées. La résistance de chaque bobine est gravée sur le couvercle près du trou correspondant. Nous avons ainsi un moyen de faire varier les résistance sans déranger les communications.

Dans la boîte de résistance avec pont, les bobines sont disposées comme dans la figure 131, les nombres repré-

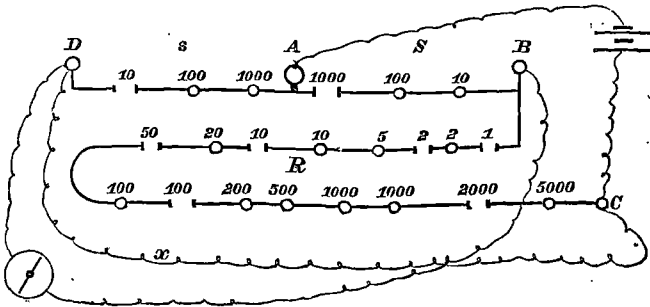


FIG. 131.

sentant le nombre d'unités de résistance de chacune des bobines.

Le lecteur voudra bien comparer encore cette figure à celle du modèle de démonstration (fig. 121, p. 528). Les mêmes points sont désignés par les mêmes lettres.

Nous voyons que les bobines sont disposées suivant une ligne continue, et que des vis d'attache sont intercalées à certains intervalles.

La première ligne contient deux séries, chacune de 10, 100 et 1000. Elles forment les branches S et s. On voit qu'on peut donner au rapport  $\frac{s}{S}$  les valeurs suivantes :

$$\begin{array}{l} \frac{10}{1000} = \frac{1}{100} \quad \text{et encore :} \\ \left. \begin{array}{l} \frac{10}{100} \\ \frac{100}{1000} \end{array} \right\} = \frac{1}{10} \quad \frac{1010}{100} \\ \left. \begin{array}{l} \frac{10}{10} \\ \frac{100}{100} \\ \frac{1000}{1000} \end{array} \right\} = 1 \quad \frac{1100}{40} \\ \left. \begin{array}{l} \frac{100}{10} \\ \frac{1000}{100} \end{array} \right\} = 10 \quad \frac{10}{1100} \\ \frac{1000}{10} = 100 \quad \frac{100}{1010}, \text{ etc.} \end{array}$$

Pour des résistances différentes on fait usage des différentes formes de la même fraction. Ainsi, si l'on veut avoir  $\frac{s}{S} = 1$ , on prendra la forme  $\frac{1000}{1000}$  si  $x$  est grand, et celle  $\frac{10}{10}$  s'il est petit.

La disposition donnée au pont dans le dessin est celle qui est la plus commode pour le calcul; mais si la résis-

tance à mesurer avait une valeur telle que l'équilibre fût établi avec la résistance débouchée dans la figure, il serait préférable de transposer la pile et le galvanomètre, car avec la première disposition les intensités des courants dans les deux branches sont en raison inverse de

$$10 + x \quad \text{et} \quad 1000 + 2163,$$

ou, comme  $x$  égale

$$R \frac{s}{S} = 2163 \frac{10}{1000} = 21,63,$$

en raison de 31,63 et 3163; tandis qu'en mettant la pile à la place du galvanomètre, et celui-ci à la place de la pile, les intensités seraient en raison inverse de

$$1810 \quad \text{et} \quad 2184,63.$$

La plus longue partie de la ligne des bobines représente R sur le pont, et la disposition mérite d'être signalée. Il y a seulement 16 bobines qui, par leur combinaison, permettent d'obtenir un nombre quelconque de 1 à 10000. C'est ce qu'on vérifie facilement en prenant un nombre au hasard et en essayant de le former avec ces bobines. D'une façon générale, on doit commencer par employer les nombres les plus grands, c'est-à-dire qu'on doit déboucher d'abord le nombre le plus grand au-dessous de celui que l'on veut avoir.

$x$ , le fil dont on cherche la résistance, est attaché aux bornes-vis C et D. S'il n'était pas assez long pour aller d'une borne à l'autre, on compléterait la longueur nécessaire, soit par l'addition d'un fil de résistance connue, ou mieux par celle d'une tige de cuivre assez épaisse pour qu'on puisse négliger sa résistance.

## MODE D'ATTACHE DES FILS FINS

Si  $\alpha$  est un fil fin, on ne doit pas l'attacher directement aux vis de serrage, car il y aurait incertitude sur la position exacte du point de contact, et par conséquent sur la longueur de fil comprise entre les vis. Il faut le souder à un morceau de gros fil de cuivre que l'on bat au marteau de façon à lui donner la forme de la figure 132.

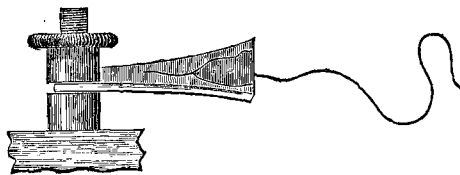


FIG. 132.

Les vis d'attache en C et D sont munies de contre-écrous, afin qu'on puisse essayer différents fils sans troubler les communications du galvanomètre.

## CLEFS DE CONTACT

Des clefs de contact sont placées dans les deux circuits du galvanomètre et de la pile; la clef qui est dans le circuit de la pile doit être de forme assez longue pour qu'on puisse reconnaître d'un simple coup d'œil si, dans deux expériences consécutives, le courant s'écoule ou non dans la même direction. La clef du galvanomètre doit être une clef à simple ressort (fig. 97, p. 474), et non pas une clef à inversion; dont l'emploi pourrait donner lieu à erreur; elle doit être munie d'un cliquet pour maintenir le contact quand c'est nécessaire.

## FRACTIONS D'UNITÉ

Nous avons dit que les boîtes de résistance ordinaire donnaient à R une valeur maxima de 10 000 unités.

Si l'on veut des fractions d'unité, on a une ou deux décimales en faisant  $\frac{S}{S}$  égal à  $\frac{1}{10}$  ou  $\frac{1}{100}$  respectivement; mais on ne peut opérer ainsi que si les résistances à mesurer ne dépassent pas 1000 unités, s'il s'agit d'avoir une décimale; 100 unités, s'il s'agit de deux. On pourra avoir une approximation plus grande en observant les déviations du galvanomètre. Si c'est un galvanomètre sensible, il arrive rarement que l'aiguille vienne juste au zéro.

Supposons la résistance comprise entre 1221 et 1222; il faudra faire  $\frac{S}{S} = 1$ . Si R égale 1221, le trait de lumière se déplacera légèrement dans une direction, soit de 5 divisions à gauche; et si on fait R égal à 1222, il se déplacera dans l'autre direction, soit de 10 divisions à droite.

On aura une approximation très voisine de la vérité en disant que l'excès de la vraie résistance sur 1221 est, par rapport à ce qui lui manque pour atteindre 1222, comme la déviation à gauche par rapport à la déviation à droite; c'est-à-dire que la vraie résistance est  $1221\frac{1}{3}$ .

## BOÎTE DE RÉSISTANCE, MODÈLE A CADRANS

Les bobines de résistance ont quelquefois la disposition de la figure 133.

La figure 134 montre les communications.

Les branches S, s ont la même disposition que dans les boîtes ordinaires; mais la grande résistance R est arrangée



différemment. Chaque cadran se compose d'un disque de laiton entouré d'un anneau coupé en segments.

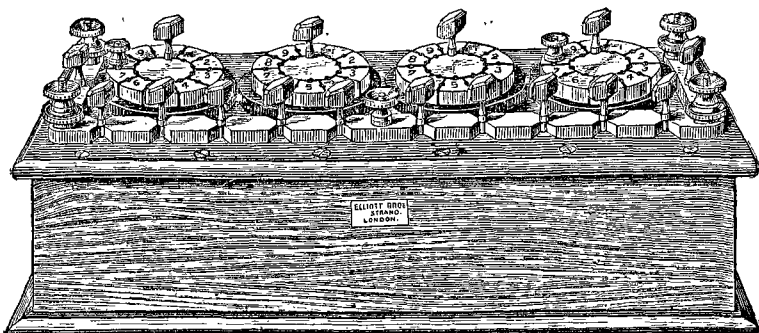


Fig. 133.

Chaque segment est relié au segment voisin par une bobine de résistance, comme on le voit dans le cadran des centaines (fig. 134). Toutes les bobines d'un même cadran ont la même valeur.

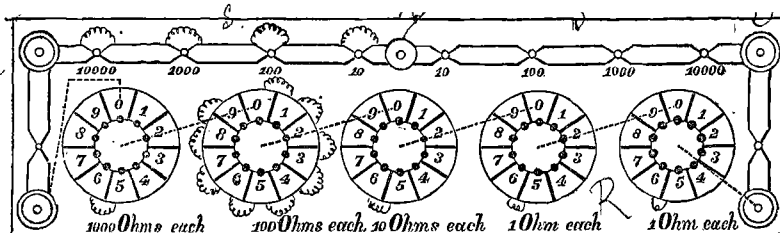


Fig. 134.

Le courant a à passer du segment marqué 0 au centre du disque.

On peut placer une cheville entre le centre du disque et un des segments. Si la cheville est placée à 0, il n'y a pas de résistance ; si elle est placée à 1, 2, 3, le courant doit traverser 1, 2, 3, bobines sur son chemin de 0 au centre.

La résistance en circuit est alors la somme des résistances *bouchées*, et la lecture se fait facilement.

BOBINES A CURSEUR DE SIR W. THOMSON ET DE M. VARLEY

Sir W. Thomson et M. Varley ont donné à la boîte de résistance (fig. 135) une disposition qui permet de faire varier les résistances, non pas en introduisant ou retirant des chevilles, mais en tournant une manette.

Les bobines remplissent le rôle des branches S et s du pont de Wheatstone. On se sert d'une résistance connue constante pour R.

La figure 136 montre le principe de cet arrangement ; la figure 137 donne les communications réelles.

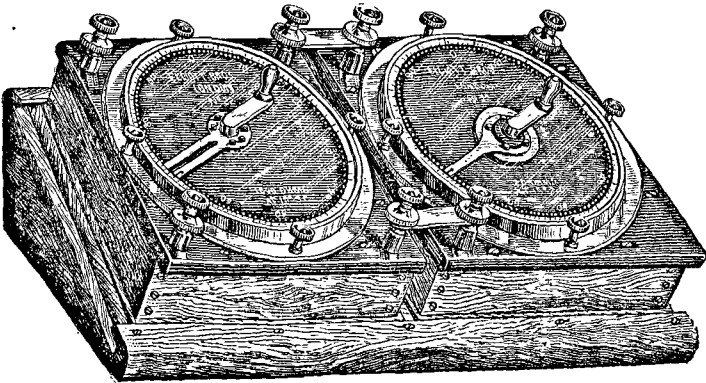


FIG. 135.

Considérons la figure 136. Le courant de la pile est amené à un curseur embrassant deux bobines de 1000 ohms chacune, et se partage le long des deux branches S et s de L. Lorsque M se déplace d'une division sur le dessin, S augmente de 1000 et s diminue de 1000.

Pour avoir un réglage précis, M se compose de 100 bobines de 20 ohms chacune, et le fil de pile peut se déplacer le long de cette série.

La figure 137 montre la disposition pratique de cet arrangement. L est muni de deux bras tournants parallèles et embrassant deux bobines. Le courant venant d'un des pôles de la pile entre dans ce double bras en A', le suit dans toute sa longueur et se divise en deux branches S et s. Si le bras est déplacé d'une division à droite, S augmente de 1000 et s diminue d'autant.

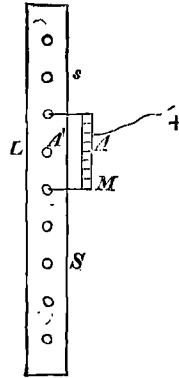


FIG. 136.

Par le réglage final, le courant se partage dans les bobines de M exactement encore de la façon représentée dans la figure 136 (1).

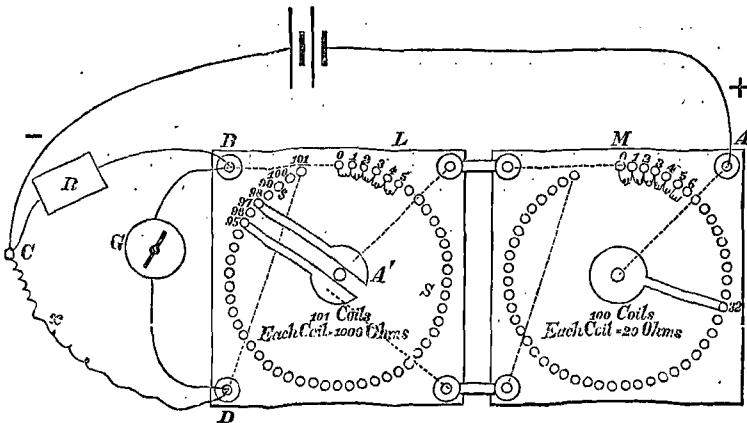


FIG. 137.

(1) Quelle que soit la position que l'on donne aux curseurs, la résistance totale du rhéostat L ne change pas. En effet, le rhéostat L comprend 101 bobinages. Électricité.

Dans la figure 137, les résistances des deux branches sont respectivement :

$$\begin{aligned} S &= 95680, \\ s &= 4320. \end{aligned}$$

#### RÉSISTANCES DE DIFFÉRENTES SUBSTANCES

*Résistance spécifique.* — La résistance spécifique, R, d'une substance est, dans le système C. G. S, la résistance comprise entre les deux faces opposées d'un cube de la substance, lorsque le côté du cube est de 1 centimètre.

Connaissant R pour chaque substance, on calculera la résistance d'un fil quelconque par la formule

$$\text{résistance} = R \frac{\text{longueur}}{\text{section}}.$$

Les tables suivantes des résistances spécifiques de divers conducteurs et isolants ont été puisées dans les *Unités et constantes physiques* du professeur Everett (p. 143-145).

Comme les résistances de tous les métaux croissent quand leur température augmente, la « correction de température » est donnée dans chaque cas (1).

bines de 1000 ohms chacune, et le rhéostat M, 100 bobines de 20 ohms.

La résistance du circuit formé par le rhéostat L se compose de celle de 99 bobines de 1000 ohms, plus la résistance de deux circuits parallèles comprenant l'un les deux bobines de 1000 ohms reliées par le curseur, et l'autre toutes les résistances du rhéostat M, soit aussi 2000 ohms. La résistance composée de ces deux circuits étant 1000 ohms, la résistance du rhéostat L comprise entre B et D est constamment égale à 100 000 ohms. J. R.

(1) La première des tables suivantes (p. 547) est tirée des *Cantor Lectures* de M. Jenkins; la seconde (p. 547), d'un mémoire de MM. Ayrton et Perry « sur la viscosité des diélectriques »; la troisième (p. 548), de l'*Electricity* de Maxwell, vol. I, dernier chapitre.

Tables des résistances spécifiques, en mesure électromagnétique (à 0° C., à moins de spécification contraire) (1).

	Résistance spécifique.	Valeur pour 100 de la variation par degré à 20 degrés C.
Argent recuit.....	1 521	0,377
— éroui.....	1 652	
Cuivre recuit.....	1 615	0,388
— éroui.....	1 652	
Or recuit.....	2 081	0,365
— éroui.....	2 118	
Aluminium recuit.....	2 946	
Zinc comprimé.....	5 690	0,365
Platine recuit.....	9 158	
Fer recuit.....	9 827	
Nickel recuit.....	12 600	
Étain comprimé.....	13 360	0,365
Plomb comprimé.....	19 850	0,387
Antimoine comprimé.....	35 900	0,389
Bismuth comprimé.....	132 650	0,354
Mercure liquide.....	96 190	0,072
Alliage, 2 parties argent, 1 partie platine, en poids, éroui ou recuit..	24 660	0,031
Mallechort (argent allemand) éroui ou recuit.....	21 170	0,044
Alliage, 2 parties or, 1 argent, en poids, éroui ou recuit.....	10 990	0,065

Après quelques minutes d'électrisation.	Résistance spécifique.	Température centigrade.	Références.
Mica.....	$8,4 \times 10^{22}$	20	Ayrton et Perry.
Gutta-percha.....	$4,5 \times 10^{23}$	24	Étalon adopté par La- timer Clark.
Gomme laque....	$9,0 \times 10^{24}$	28	Ayrton et Perry.
Matière de Hooper.	$1,5 \times 10^{25}$	24	Essais récents de câbles.
Ébonite.....	$2,8 \times 10^{25}$	46	Ayrton et Perry.
Paraffine.....	$3,4 \times 10^{25}$	46	Id.
Verre.....	Pas encore mesurée avec précision, mais plus grande que les précédentes.		
Air.....	Pratiquement infinie, quand il est froid.		

(1) Rappelons que le ohm (ou unité B. A.) =  $10^9$  unités absolues.

	Résistance spécifique en unités absolues.	Valeur p. 100 de la variation par degré à 20° C.	Densité.
Argent écouli.....	1 609	0,377	10,50
Cuivre — .....	1 642	0,388	8,95
Or — .....	2 154	0,365	19,27
Plomb comprimé.....	19 847	0,387	11,391
Mercure liquide.....	96 146	0,072	13,595
Alliage or 2, argent 1, écouli ou recuit.....	10 988	0,065	15,218
Sélénium à 100° C., cristallisé .	$6 \times 10^{13}$	1,00	
Eau à 22° C.....	$7,18 \times 10^{10}$	0,47	
— avec 0,2 pour 100 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	4,47 —	0,47	
— — 8,3 — —	$3,32 \times 10^9$	0,653	
— — 20 — —	1,44 —	0,799	
— — 35 — —	1,26 —	1,259	
— — 41 — —	1,37 —	1,410	
Sulfate de zinc et eau :			
Zn SO <sub>4</sub> + 23 H <sub>2</sub> O à 23° C....	$1,87 \times 10^{10}$		
Sulfate de cuivre et eau :			
Cu SO <sub>4</sub> + 45 H <sub>2</sub> O à 22° C....	1,95 —		
Verre à 200° C.....	$2,27 \times 10^{16}$		
— 250° C.....	$1,39 \times 10^{15}$		
— 300° C.....	$1,48 \times 10^{14}$		
— 400° C.....	$7,35 \times 10^{13}$		
Gutta-percha à 24° C.....	$3,53 \times 10^{23}$		
— à 0° C.....	$7 \times 10^{24}$		

La table suivante est due au docteur Matthiessen (1) :

Métaux.	Valeur pour 100 de la diminution du pouvoir conducteur entre 0° et 100° C.
Argent.....	28,44
Cuivre.....	29,69
Or.....	21,30
Étain.....	28,89
Plomb.....	29,61

#### DÉRIVATIONS (SHUNTS) DU GALVANOMÈTRE

Pour faire des déterminations de résistances avec précision, il faut se servir des formes les plus sensibles du gal-

(1) *Phil. Trans.*, 1864.

vanomètre à réflexion. Quand on ne connaît pas approximativement la valeur de la résistance à mesurer, il y a, dans les quelques premiers essais, une différence de potentiel considérable aux deux bouts du fil du galvanomètre ; et si on laissait le courant correspondant s'écouler à travers ce fil, le galvanomètre serait endommagé.

Pour éviter cet inconvénient, le galvanomètre est muni de « dérivations » (shunts).

Ces dérivations sont aussi très utiles pour mesurer, par la déviation du galvanomètre, des courants d'une intensité telle que, s'ils passaient directement dans l'instrument, le point lumineux serait projeté hors de l'échelle.

#### THÉORIE DES DÉRIVATIONS

La théorie des dérivations repose sur les conséquences suivantes de la loi de Ohm :

Soit un fil  $a$  (fig. 138), et supposons qu'il se divise au point A en deux (ou plusieurs) branches  $b$  et  $c$ , lesquelles

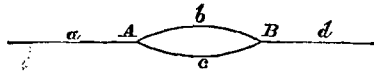


FIG. 138.

se rejoignent de nouveau en B et se prolongent suivant  $d$  ; le courant en  $d$  aura la même intensité qu'en  $a$ . Dans les parties  $b$  et  $c$ , il est divisé.

Soient  $E$  la différence de potentiel de A et B ;  $C_b, C_c, r_b, r_c$  les intensités et résistances respectives en  $b$  et  $c$  ; alors, d'après la loi de ohm, nous avons dans chacune des deux branches :

$$E = C_b r_b \quad \text{et} \quad E = C_c r_c ;$$

E ayant la même valeur dans les deux circuits, on a :

$$C_1 r_b = C r_c,$$

d'où

$$\frac{C_1}{C} = \frac{r_c}{r_b};$$

ou, les intensités dans les branches sont en raison inverse des résistances. Alors, pour construire une dérivation telle que les courants dans les deux branches soient dans un rapport donné, il suffit de donner aux résistances de ces branches des valeurs qui soient entre elles dans le rapport inverse.

En reliant les pôles d'un galvanomètre par un fil dont la résistance est dans un rapport connu avec celle de la bobine du galvanomètre, on peut envoyer une partie seulement du courant à travers le galvanomètre, et le reste à travers le fil de dérivation. Dans la figure 139, les

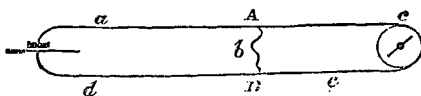


FIG. 139.

parties correspondantes à celles de la figure précédente ont reçu les mêmes lettres. Le lecteur pourra comparer les deux figures.

Connaissant la résistance  $b$  de la dérivation et celle  $c$  de la bobine du galvanomètre, le calcul précédent fait connaître le rapport du courant qui passe par le galvanomètre à celui qui passe par la dérivation. Ce n'est pas cependant tout à fait ce dont on a besoin pour la pratique. Ce qu'il importe d'avoir, c'est le rapport du courant passant par le galvanomètre, non pas à celui qui passe par la dérivation,



mais au courant total de la pile, c'est-à-dire au courant qui passe en  $a$  et  $d$ .

Mais le courant total va de A et B, et les seuls chemins par où il puisse passer sont  $b$  et  $c$ ; par conséquent, le courant en  $b$  ajouté au courant en  $c$  égale le courant total; ou, appelant C le courant total :

$$C = C_b + C_c.$$

Soit  $r$  la résistance totale du circuit divisé, pour trouver  $r$ , nous avons :

$$\text{courant en } b = C_b = \frac{E}{r_b},$$

$$\text{courant en } c = C_c = \frac{E}{r_c}.$$

Courant total :

$$C = C_b + C_c = \frac{E}{r_b} + \frac{E}{r_c}.$$

Réduisant au même dénominateur, et ajoutant, on a :

$$C = \frac{Er_c + Er_b}{r_b r_c} = E \frac{r_b + r_c}{r_b r_c},$$

ou, ce qui est la même chose,

$$C = \frac{E}{\frac{r_b r_c}{r_b + r_c}},$$

d'où

$$r = \frac{r_b r_c}{r_b + r_c}.$$

Le courant  $C_c$  dans le galvanomètre est :

$$C_c = \frac{E}{r}.$$

Le rapport du courant  $C_c$  au courant total  $C$  est :

$$\frac{C_c}{C} = \frac{\frac{E}{r_c}}{\frac{r_b r_c}{r_b + r_c}},$$

d'où l'on tire :

$$\frac{C_c}{C} = \frac{\frac{1}{r_c}}{\frac{1}{\frac{r_b r_c}{r_b + r_c}}} = \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{\frac{r_b}{r_b + r_c}}} ;$$

c'est-à-dire : le rapport du courant qui passe dans le galvanomètre au courant total est le même que le rapport de la résistance de la dérivation à la somme des résistances de la dérivation et du galvanomètre.

#### CONSTRUCTION DE DÉRIVATIONS

Dans la pratique, on construit habituellement les dérivi-  
vations par séries de trois, dont les résistances respectives  
sont telles que  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{100}$  ou  $\frac{1}{1000}$  du courant total passe à tra-  
vers le galvanomètre, suivant que l'une ou l'autre des bo-  
bines est reliée à l'instrument. Il est évident que chaque  
galvanomètre doit avoir sa série propre de dériviati-  
ons.

*Problème.* — On se propose de construire une série de  
dérivations pour un galvanomètre donné, dont la résistance  
est connue. Quelle doit être la résistance de chaque bo-  
bine, afin que  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{100}$  ou  $\frac{1}{1000}$  du courant total passe à travers  
le galvanomètre ?

1<sup>re</sup> Cas. On veut que les courants soient dans le rapport  
1 à 10. Alors

$$\frac{C_c}{C} = \frac{1}{10} ;$$

c'est-à-dire :

$$\frac{1}{10} = \frac{r_b}{r_b + r_c},$$

ou

$$10 = \frac{r_b + r_c}{r_b} = \frac{r_b}{r_b} + \frac{r_c}{r_b} = 1 + \frac{r_c}{r_b}.$$

Retranchant 1 de chaque membre, on a :  $9 = \frac{r_c}{r_b}$ , c'est-à-dire que la résistance de la dérivation doit être égale à  $\frac{1}{9}$  de la résistance du galvanomètre.

2<sup>e</sup> Cas. On veut que les courants soient dans le rapport de 1 à 100.

$$\frac{C_c}{C} = \frac{1}{100};$$

donc

$$100 = \frac{r_b + r_c}{r_b} = 1 + \frac{r_c}{r_b},$$

ou

$$99 = \frac{r_c}{r_b};$$

c'est-à-dire : la résistance de la dérivation doit être  $\frac{1}{99}$  de celle du galvanomètre.

3<sup>e</sup> Cas. Le rapport cherché est celui de 1 à 1000.

$$\frac{C_c}{C} = \frac{1}{1000};$$

donc

$$1000 = \frac{r_b + r_c}{r_b} = 1 + \frac{r_c}{r_b},$$

ou

$$999 = \frac{r_c}{r_b};$$

c'est-à-dire que la résistance de la dérivation doit être égale à  $\frac{1}{999}$  de la résistance du galvanomètre.

Les dérivations de galvanomètre sont habituellement disposées comme dans la figure 140.

Trois bobines, ayant respectivement  $\frac{1}{9}$ ,  $\frac{1}{99}$ ,  $\frac{1}{999}$  de la résistance du galvanomètre, sont placées dans une boîte longue, d'où partent de larges bandes de cuivre établissant la communication avec le galvanomètre.

Sur le couvercle de la boîte AB sont fixés deux blocs de laiton,  $a$  et  $d$ . Une extrémité de chacune des trois bobines

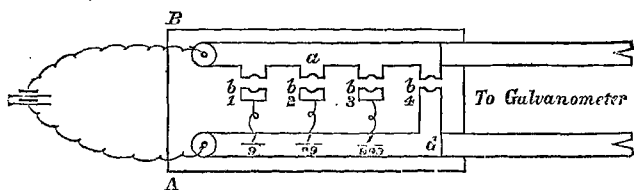


FIG. 140.

est attachée en  $d$ . Les autres extrémités sont attachées respectivement aux trois blocs isolés  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ , qui peuvent être mis séparément en communication avec  $a$  au moyen d'une cheville.

Lorsqu'aucune cheville n'est introduite, la totalité du courant de la pile passe à travers le galvanomètre. Lorsqu'une cheville est placée en  $b_1$ ,  $\frac{9}{10}$  du courant passent à travers la première bobine, et  $\frac{1}{10}$  seulement à travers le galvanomètre; si la cheville est transportée en  $b_2$  ou  $b_3$ ,  $\frac{99}{100}$  ou  $\frac{999}{1000}$  du courant passent par l'une ou l'autre des bobines, qui laisse passer seulement  $\frac{1}{100}$  ou  $\frac{1}{1000}$  du courant par le galvanomètre.

Une cheville placée en  $b_4$  met  $a$  et  $d$  en communication directe, et empêche ainsi le passage de tout courant dans le galvanomètre.

Les mêmes lettres représentent les mêmes parties dans la figure 140 et dans les figures 138 et 139.

Si on est obligé de laisser un appareil monté dans une salle ouverte, la communication avec la pile étant établie, la cheville doit toujours être placée en  $b_4$ , afin que, dans le cas où quelqu'un toucherait aux clefs de contact, le galvanomètre ne soit pas détérioré.

En commençant l'expérience, on a l'habitude de placer la cheville en  $b_3$ , et de régler la résistance jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de déviation visible. La cheville est transportée ensuite en  $b_2$ , et généralement on observe alors un petit mouvement. Les résistances étant réglées de nouveau, la cheville est transportée en  $b_1$ , puis enlevée tout à fait. En procédant ainsi, on détermine la résistance cherchée avec toute la précision dont l'instrument est susceptible.

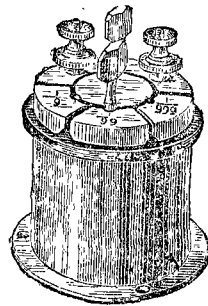


FIG. 141.

La figure 141 montre une série de dérivations enfermées dans une boîte circulaire. Les bandes de cuivre sont supprimées. On voit les chevilles dans les trous  $b_3$  et  $b_4$ .

#### RÉSISTANCE DE COMPENSATION

L'introduction d'une dérivation a pour effet de diminuer la résistance totale du circuit; il peut donc arriver que le courant total éprouve un accroissement tel que la déviation n'est pas sensiblement réduite.

Pour maintenir constant le courant total, on met dans le circuit une « résistance de compensation » égale à la diminution de résistance produite par la dérivation.

L'introduction de la dérivation réduit la résistance de

$$r \quad \text{à} \quad \frac{r r'}{r_2 + r'}$$

La résistance de compensation ( $\rho$ ) doit être égale à cette diminution, c'est-à-dire

$$\rho = r_c - \frac{r r_c}{r_c + r_c} = \frac{r_c^2}{r_c + r_c}.$$

Mais  $r_b = r_c \frac{1}{n-1}$ ,  $n$  étant la fraction du courant qui passe dans le galvanomètre; d'où

$$\rho = \frac{r_c^2}{r_c + \frac{r_c}{n-1}} = r_c \frac{n-1}{n}.$$

Ainsi, par exemple, avec la dérivation  $\frac{1}{10}$ , la résistance de compensation serait  $\frac{9}{10}$  de la résistance du galvanomètre.

#### MÉTHODE DE SIR W. THOMSON POUR LA DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE D'UN GALVANOMÈTRE

Un moyen évident de déterminer la résistance d'un galvanomètre est d'enlever ou de fixer son aiguille, et de le traiter comme une bobine de fil ordinaire, en mettant un autre galvanomètre dans le pont. Il arrive cependant quelquefois qu'on ne dispose dans son laboratoire que d'un seul galvanomètre très sensible, et que l'on a besoin de connaître sa résistance. Pour effectuer cette détermination sans recourir à l'emploi d'un autre instrument, le galvanomètre est placé avec son aiguille et son échelle dans la position qu'occupe habituellement le fil  $x$  dont on mesure la résistance. A la place qu'occupe d'habitude le galvanomètre, on met un simple fil dont la continuité est brisée par une clef de contact. La figure 142 donne cette disposition dans un modèle de démonstration. Soient  $O$  le fil et la clef substitués au galvanomètre habituel, et  $x$  le galvanomètre dont on cherche la résistance. Le contact en  $O$  étant

rompu, faisons passer le courant dans le pont. L'aiguille du galvanomètre  $x$  déviara. Supposons d'abord que le courant qui passe dans la branche ADC soit assez faible pour que la déviation de l'aiguille reste dans les limites de l'instrument, c'est-à-dire que le point lumineux ne sorte pas de l'échelle. Observons cette déviation, et établissons le contact en O. Si l'équilibre existe, aucun courant ne passera par le fil O; si R est trop grand ou trop petit, le courant traversera ce fil dans un sens ou dans l'autre. Il n'y a pas de galvanomètre en O, mais on peut savoir si le courant passe ou non, de la façon suivante :

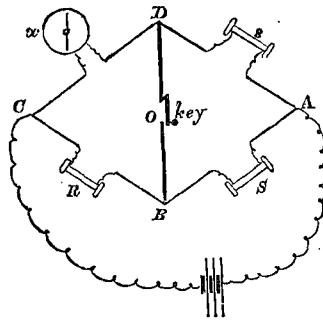


FIG. 142.

Supposons le courant principal s'écoulant de A à C; alors, tant qu'on n'établit pas de contact en O, l'intensité du courant dans DC, c'est-à-dire dans  $x$ , est égale à son intensité dans AD; mais si une partie du courant s'écoule de D à B, le courant diminuera dans  $x$ , et la déviation *devra décroître* quand on établira le contact en O.

De même, un courant qui irait de B à D augmenterait le courant qui passe de D à C, et accroîtrait la déviation.

Il en résulte que l'équilibre du pont est établi, et que R a sa valeur exacte, lorsque en faisant le contact en O la déviation de l'aiguille du galvanomètre en  $x$  n'augmente ni ne diminue.

Si cependant, et c'est ce qui arrivera probablement, le galvanomètre a une sensibilité telle que le passage de la portion du courant d'un seul élément suffise à projeter le

point lumineux hors de l'échelle, il faut adapter une dérivation. Si le galvanomètre n'a pas ses dérivations propres, on se sert comme dérivation d'une bobine de résistance, ou, à défaut, d'un fil métallique dont on détermine la résistance.

Soient  $r_b$  la résistance du fil de dérivation,  $r_c$  celle du galvanomètre :  $r_b$  est connu,  $r_c$  inconnu.

L'expérience du pont nous donne comme résultat la valeur de la résistance du circuit dérivé de D à C; c'est-à-dire qu'après l'expérience, nous connaissons la valeur de  $\frac{r_b r_c}{r_b + r_c}$ . En remplaçant  $r_b$  par sa valeur, il est facile de calculer  $r_c$  par la relation

$$\frac{r_b r_c}{r_b + r_c} = R \frac{s}{S}.$$

#### RÉSISTANCE DES PILES

Le liquide de la pile elle-même est interposé dans tous les circuits de pile; et comme il oppose au courant une résistance très considérable, on doit en tenir compte dans le calcul de la résistance totale du circuit.

#### MÉTHODE DE MANCE POUR LA DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE D'UNE PILE

Transposons la pile et le galvanomètre dans l'arrangement qui vient d'être décrit pour la détermination de la résistance d'un galvanomètre. On démontre mathématiquement que cette transposition ne change pas les rapports des résistances pour l'équilibre.

On appliquera le même calcul que dans le cas précédent; seulement on aura comme résultat, non plus la résistance du galvanomètre, mais celle de la pile.



La méthode de Mance a été imaginée avant celle de sir W. Thomson, qui en a été déduite.

DE LA MEILLEURE MANIÈRE D'ACCOUPLER LES ÉLÉMENTS  
DE PILE POUR UN OBJET DÉTERMINÉ

C'est à cause de la résistance offerte par les piles que l'on emploie de grandes plaques, quand on veut obtenir un courant puissant. Les petites plaques donnent autant de force électromotrice que les grandes, et par conséquent, en accouplant « en série » (fig. 143) un nombre suffisant des éléments les plus petits possibles, on peut obtenir une force électromotrice aussi considérable qu'on le veut.

Néanmoins, si les éléments sont de petites dimensions, on introduit en même temps une résistance assez grande pour qu'il puisse arriver que l'intensité du courant n'éprouve pas une augmentation sensible.

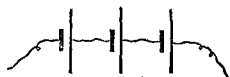


FIG. 143.

Trois éléments accouplés en série.

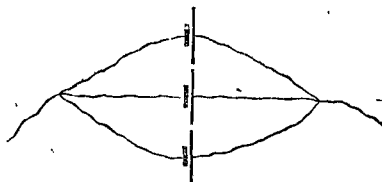


FIG. 144.

Trois éléments accouplés côte à côte.

En discutant les dimensions les meilleures qu'il convient de donner à un élément en vue d'un objet déterminé, il faut tenir compte de la résistance du circuit extérieur.

Si, comme cela se présente ordinairement, on ne dispose que d'éléments de mêmes dimensions, on doit se rappeler qu'en accouplant 2, 3... éléments, en reliant ensemble leurs pôles de même nom, on produit un élément com-

posé équivalent à un élément dont les plaques auraient une surface 2, 3... fois plus grande que celles de l'un des éléments primitifs. Ce mode d'accouplement est appelé « accouplement côte à côte (1) » (fig. 144).

La résistance d'un élément étant prise pour unité, la résistance de

	Reliés en séries.	Reliés côte à côte.
2 éléments sera .....	2	$\frac{1}{2}$
3 — — .....	3	$\frac{1}{3}$
4 — — .....	4	$\frac{1}{4}$
		etc., etc.

Supposons que nous ayons un certain nombre d'éléments de dimensions déterminées, et qu'on veuille obtenir le courant le plus intense possible dans un fil de résistance donnée.

Soient  $E$  la force électromotrice d'un élément,  $R$  la résistance d'un élément,  $r$  la résistance totale extérieure, et  $Q$  le nombre des éléments. Si les éléments sont accouplés en série, nous aurons :

$$C = \frac{QE}{QR + r}.$$

S'ils sont accouplés côte à côte, nous aurons :

$$C = \frac{E}{\frac{1}{Q}R + r}.$$

S'ils sont accouplés suivant un mode intermédiaire, c'est-à-dire de façon à former une série dont chaque membre se compose de deux ou plusieurs éléments accouplés côte à côte, et si  $N$  est le nombre des membres de la

(1) On dit encore accouplement parallèle, ou en surface, ou en quantité, ou par les pôles de mêmes noms.

série,  $n$  le nombre d'éléments de chaque membre, nous aurons :

$$G = \frac{NE}{\frac{N}{n}R + r}$$

C'est là l'expression générale, dont les deux premières expressions sont des cas particuliers.

$Nn$  est évidemment le nombre total d'éléments et égale  $Q$ .

Prenons quelques cas particuliers pour éclaircir la règle.

Supposons que l'on ait 20 éléments, ayant chacun 2 unités de résistance, et on veut envoyer un courant

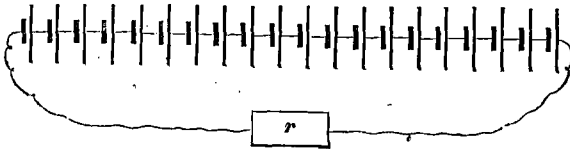


FIG. 145.

aussi intense que possible séparément à travers trois fils, dont les résistances respectives sont 1000,  $\frac{1}{5}$  et 10 unités.

E dépend de la nature des éléments, et reste le même dans tous les arrangements.

$$R = 2;$$

$$r = 1000, \frac{1}{5}, 10, \text{ respectivement dans les trois cas.}$$

1<sup>er</sup> Cas.  $r = 1000$ .

Accouplez d'abord la totalité des 20 éléments en série (fig. 145); on a  $N = 20$  et  $n = 1$ , d'où

$$G = \frac{20 E}{\frac{20}{1} 2 + 1000} = \frac{20}{1040} E.$$

Disposons maintenant les 20 éléments côte à côte (fig. 146). On a :

$$N = 1, \quad n = 20;$$

d'où

$$C = \frac{E}{\frac{2}{20} + 1000} = \frac{1}{1000,1} E,$$

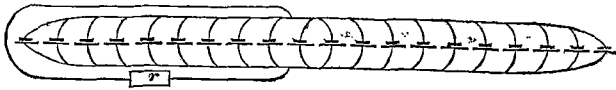


FIG. 146.

ou seulement un peu plus de  $\frac{1}{20}$  de l'intensité obtenue précédemment.

Disposons ensuite les éléments en quatre groupes côte à côte, chaque groupe se composant de 5 éléments accouplés en série (fig. 147).

On a :  $N = 5$ ,  $n = 4$ , et par suite, pour le courant,

$$C = \frac{5E}{\frac{5}{4} \cdot 2 + 1000} = \frac{5E}{1000 \frac{5}{8}}.$$

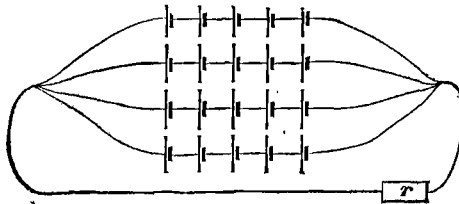


FIG. 147.

Cet arrangement vaut mieux que le précédent, mais ne vaut pas le premier; nous voyons donc que si la résistance

extérieure est grande, on doit accoupler tous les éléments en série.

2° Cas. — Cherchons maintenant quelle est la meilleure disposition quand la résistance extérieure est petite, c'est-à-dire, par exemple, si  $r = \frac{1}{4}$ .

Accouplons d'abord en série.

On a :

$$N = 20, \quad n = 1, \quad R = 2;$$

alors

$$C = \frac{20 E}{\frac{20}{1} \times 2 + \frac{1}{4}} = \frac{20}{40 \frac{1}{4}} E = \frac{1}{2} E, \text{ à peu près.}$$

On voit qu'avec cet arrangement 3 éléments donnent une intensité presque aussi grande que 20, car on a :

$$C = \frac{3 E}{\frac{3}{1} \times 2 + \frac{1}{4}} = \frac{3}{6 \frac{1}{4}} E.$$

Accouplons ensuite tous les éléments côte à côte.

On a :

$$N = 1, \quad n = 20,$$

et

$$C = \frac{E}{\frac{1}{20} \times 2 + \frac{1}{4}} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{4}} E = \frac{1 E}{\frac{4 + 10}{40}} = \frac{40}{14} E = 3 E, \text{ à peu près,}$$

c'est-à-dire un courant six fois plus intense que celui qui correspond à la disposition en série.

Donc, quand la résistance extérieure est très petite, il vaut mieux accoupler tous les éléments côte à côte.

3° Cas. — Lorsque la résistance extérieure n'est ni très petite, ni très grande, il faut employer un des groupements intermédiaires.

Supposons  $r = \frac{1}{10}$ .

Essayons d'abord le groupement en série :

$$N = 20, \quad n = 1,$$

$$C = \frac{20 E}{\frac{20}{1} \times 2 + 10} = \frac{20}{50} E = \frac{4}{10} E;$$

puis le groupement « côte à côte » :

$$N = 1, \quad n = 20,$$

$$C = \frac{E}{\frac{1}{20} \times 2 + 10} = \frac{1}{10 \frac{1}{10}} E = \frac{1}{10} E, \text{ à peu près};$$

puis quatre groupes de séries avec 5 éléments par série :

$$N = 5, \quad n = 4,$$

$$C = \frac{5 E}{\frac{5}{4} \times 2 + 10} = \frac{5 E}{12 \frac{1}{2}} = \frac{4}{10} E, \text{ exactement.}$$

Représentons maintenant le nombre d'éléments en série,

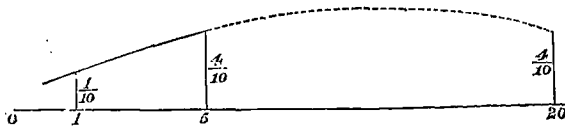


FIG. 148.

dans la figure 148, par les distances horizontales, et l'intensité du courant par les distances verticales.

On voit que l'intensité du courant va en augmentant de 1 à 5, et qu'à 20 elle a la même valeur qu'à 5. On doit alors supposer raisonnablement qu'elle ira encore en croissant quelque temps après 5, puisqu'elle commencera à décroître jusqu'à la valeur qu'elle a à 20.

Le point où elle cesse de croître pour commencer à décroître sera sa valeur maxima.

Cherchons ce point intermédiaire, et essayons un groupement de deux séries de 10. On a :

$$N = 10, \quad n = 2,$$

$$C = \frac{10E}{\frac{10}{2} \times 2 + 10} = \frac{10E}{20} = \frac{1}{2} E \text{ ou } \frac{5}{10} E.$$

C'est donc là le groupement d'éléments qui conviendra le mieux dans la pratique, avec les résistances données (1).

Il n'est pas possible cependant, dans la pratique, de faire tous ces calculs avant de grouper notre pile; il nous faut une règle qui nous permette de voir du premier coup le meilleur mode d'accouplement.

Le problème qui se pose est le suivant :

« Étant donnés  $R$ ,  $r$ , et  $(N \times n)$  (le nombre d'éléments), trouver le rapport de  $\frac{N}{n}$  qui rend  $C$  maximum. » La solution de ce problème nécessite l'emploi du calcul différentiel: on le trouvera résolu en note (2), et nous donnerons seulement ici la réponse, qui est :

$C$  est un maximum quand

$$r = \frac{N}{n} R \quad \text{ou} \quad \frac{N}{n} = \frac{r}{R}.$$

(1) Ce groupement ne correspond pas nécessairement au maximum de valeur de la fonction; c'est la valeur maxima compatible avec la limitation expérimentale que  $\frac{N}{n}$  soit un nombre entier.

(2) Nous avons:  $(Nn)$ ,  $R$ ,  $r$ ,  $E$ , qui sont toutes des quantités constantes; il faut trouver la valeur de  $\frac{N}{n}$  qui rend

$$C = \frac{NE}{\frac{N}{n}R + r} \text{ maximum,}$$

Ainsi, pour obtenir le courant maximum, le rapport du nombre d'éléments de chaque série au nombre de groupes en série accouplés côte à côte doit être égal au rapport de la résistance extérieure à la résistance de chaque élément.

Cet arrangement rend aussi la *résistance totale inté-*

ou, ce qui revient au même, qui rend  $\frac{1}{C}$  minimum

$$\begin{aligned} \frac{1}{C} &= \frac{\frac{N}{n} R}{N E} + \frac{r}{N E} \\ &= \frac{1}{n} \frac{R}{E} + \frac{1}{N} \frac{r}{E}; \end{aligned}$$

mais  $Nn = \text{constante}$ ,  $\therefore N = \left(\frac{1}{n} \times \text{constante}\right)$ , et cette constante = le nombre d'éléments =  $Q$  :

$$\therefore \frac{1}{C} = \frac{N}{Q} \cdot \frac{R}{E} + \frac{1}{N} \frac{r}{E}.$$

Différentiant (2) par rapport à  $N$ , nous avons :

$$\frac{d}{dN} \frac{1}{C} = \frac{R}{QE} - \frac{1}{N^2} \cdot \frac{r}{E}; \quad (3)$$

égalant à zéro .

$$\frac{R}{QE} \cdot \frac{E}{r} = \frac{1}{N^2}$$

ou  $\frac{R}{rQ} = \frac{1}{N^2}$  ou  $\frac{r}{R} Q = N^2$ .

$$\text{Mais } Q = Nn, \therefore N^2 = \frac{r}{R} Nn, \text{ ou } N = \frac{r}{R} n, \text{ ou } \frac{N}{n} = \frac{r}{R}. \quad (4)$$

Ainsi le groupement indiqué dans le texte rend  $\frac{1}{C}$  soit maximum, soit minimum.

Différentiant (3) encore une fois :

$$\frac{d^2}{dN^2} \frac{1}{C} = \frac{1}{N^3} \frac{r}{E}, \quad (5)$$

expression positive; par suite,  $\frac{1}{C}$  est un minimum, ou le groupement donné dans le texte rend  $C$  maximum



rieure égale à la résistance extérieure, car l'équation donne  $r = \frac{N}{n} R$ , et  $\frac{N}{n} R$  est, comme on l'a vu, la résistance totale de la pile.

## UNITÉS DE RÉSISTANCE

Quand on expérimente sur une résistance électrique, il est très important d'avoir quelque unité de résistance à laquelle on puisse rapporter les autres résistances. La première forme d'unité qui se présente est un fil de longueur, section, densité et substance déterminées à une température donnée.

L'unité Siemens consiste en une colonne de mercure à la température de 0° C., contenue dans un tube de verre de 1 mètre de long et 1 millimètre carré de section.

C'est un étalon purement arbitraire, et qui ne peut être relié à aucun système absolu de mesure. Un système de mesure fondé sur le système C. G. S. a été introduit par l'Association britannique, et l'unité qui en dérive s'appelle l'unité B. A. ou ohm.

Nous devons renvoyer l'étude de ce système à une autre partie de cet ouvrage, car elle exige la connaissance de quelques parties de la science électrique que nous n'avons pas encore traitées (voy. chap. xxv.)

## APPENDICE AU CHAPITRE XXI

### LOIS DE OHM

Toute la partie pratique de la mesure électrique repose sur la loi de ohm et sur les conséquences que l'on en tire.

La loi de Ohm peut se décomposer en deux :

1° Loi de l'intensité :

$$C = \frac{E}{R},$$

$E$  étant la somme des forces électromotrices et  $R$  la somme des résistances du circuit.

2° Loi des potentiels.

$V$  et  $V'$  étant les potentiels de deux points séparés par une résistance  $r$ ,  $\varepsilon$  la somme des forces électromotrices interposées entre les deux points, on a :

$$V - V' = Cr - \varepsilon,$$

$\varepsilon$  étant positif quand il détermine une augmentation de potentiel entre les deux points.

Si un pôle d'une pile est relié à la terre et l'autre à une résistance  $p + R$  aboutissant aussi à la terre, le potentiel  $V$  en un point séparé du pôle par une résistance  $p$  et de la terre par une résistance  $R$  est :

$$V = \frac{R}{p + p + R} E,$$

$p$  étant la résistance intérieure de la pile.

### COURANTS DÉRIVÉS

Quand un circuit comprend plusieurs branches reliant deux points donnés du circuit, ces branches portent le nom de circuits *dérivés* ou circuits *parallèles*.

Soient  $a, b, c$ , etc., les résistances des branches;  $A, B, C$ , etc., les intensités des courants qui les parcourent;  $x$  la résistance unique qui peut les remplacer sans changer l'intensité  $I$  dans le reste du circuit; on a les relations

$$\frac{A}{a} = \frac{B}{b} = \frac{C}{c} = \dots = \frac{A+B+C+\text{etc.}}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \text{etc.}} = \frac{I}{x},$$

d'où

$$\frac{1}{x} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \text{etc.} \quad \text{et} \quad I = \frac{E}{R+x},$$

$R$  étant la résistance du reste du circuit.

#### DÉRIVATIONS DES GALVANOMÈTRES

Soient  $G$  et  $S$  les intensités dans le galvanomètre  $g$  et la dérivation  $s$ ,  $I$  l'intensité totale,  $x$  la résistance du galvanomètre dérivé,  $r$  la résistance de compensation; on a :

$$\frac{G}{g} = \frac{S}{s} = \frac{I}{x},$$

d'où

$$x = \frac{gs}{g+s}, \quad I = G \times \frac{g}{x} = G \times \frac{g+s}{s} = mG;$$

$m$  est le *pouvoir multiplicateur* de la dérivation.

Pour une dérivation de pouvoir multiplicateur  $m$ , on a les relations suivantes :

$$\begin{array}{lll} s = \frac{g}{m-1}, & x = \frac{g}{m}, & r = \frac{m-1}{m} g. \\ \text{Si } m = 2, & s = g, & x = \frac{g}{2}, & r = \frac{g}{2}; \\ m = 10, & s = \frac{1}{9} g, & x = \frac{1}{10} g, & r = \frac{9}{10} g; \\ m = 100, & s = \frac{1}{99} g, & x = \frac{1}{100} g, & r = \frac{99}{100} g; \\ m = 1000, & s = \frac{1}{999} g, & x = \frac{1}{1000} g, & r = \frac{999}{1000} g. \end{array}$$

## FORMULE DE MÉRITE D'UN GALVANOMÈTRE A RÉFLEXION

Elle fait connaître la résistance du circuit qui, avec un élément étalon, produit l'unité de déviation (une division) sur l'échelle du galvanomètre.

Soit  $d$  la déviation obtenue avec un circuit composé de l'élément étalon de résistance  $p$ , d'un rhéostat  $R$  et d'un galvanomètre  $g$ , avec sa dérivation  $s$ .

En posant :

$$m = \frac{g + s}{s} \text{ (pouvoir multiplicateur),}$$

$$g_1 = \frac{gs}{g + s} \text{ (résistance du galvanomètre dérivé),}$$

on a :

$$\text{formule de mérite} = md(p + R + g_1).$$

## CONSTANTE D'UN GALVANOMÈTRE A RÉFLEXION

C'est la déviation produite par l'élément étalon dans un circuit dont la résistance totale est de 1 megohm, c'est-à-dire 1 million de ohms.

En prenant  $p + R + g_1 = 10\,000$  et  $m = 100$ , la formule de mérite indique qu'il faut une résistance  $d$  fois plus grande que le megohm pour avoir une déviation de 1 division. Donc une déviation de  $d$  divisions correspond à la résistance de 1 megohm, et constante =  $d$ .

## MESURE DE TRÈS GRANDES RÉSISTANCES

Si l'on fait passer le courant d'une force électromotrice  $E$  dans une résistance  $x$  assez grande pour qu'on puisse négliger devant elle la résistance de la pile et du galvanomètre, et qu'on ait une déviation  $\delta$ , on pourra écrire :

$$\delta = \frac{E}{x}.$$

Si d'autre part la constante est  $d$ , on aura :

$$x = E \frac{d}{\delta} \text{ (megohms).}$$

## LOIS DE KIRCHHOFF

En appliquant les lois de Ohm à un système quelconque de conducteurs reliés entre eux, on a les deux conséquences suivantes :

1° Pour tout point de concours, c'est-à-dire tout point où aboutissent plus de deux conducteurs, la somme des intensités des courants qui le traversent est nulle, en considérant comme + les courants qui se dirigent vers le point, et comme - ceux qui s'en éloignent.

2° Pour toute figure fermée du système, la somme des produits des intensités par les résistances est égale à la somme des forces électromotrices.

La direction positive des intensités étant choisie, les forces électromotrices sont regardées comme + ou -, suivant qu'elles déterminent une augmentation ou une diminution de potentiel.

Appliquées au pont de Wheatstone, ces deux lois fournissent les équations nécessaires pour avoir l'intensité du courant dans les diverses branches. Nous allons les appliquer à la méthode de compensation.

## MÉTHODE DE COMPENSATION

C'est une méthode de réduction à zéro (comme le galvanomètre différentiel et le pont de Wheatstone) pour la mesure des *constantes* des piles, c'est-à-dire de leur force électromotrice et de leur résistance intérieure.

Les pôles des deux piles  $E$  et  $E'$  que l'on veut comparer étant reliés aux deux extrémités d'une caisse de résistance  $R$ , on intercale un galvanomètre  $G$  dans le circuit de la plus faible  $E'$ , et on donne à la résistance  $R$  une valeur telle que l'intensité soit nulle dans ce dernier circuit. En appelant  $p$  la résistance de la pile  $E$ ,  $C$  le courant, qui a la même intensité en tous les points du circuit  $AEBR$ , puisque aucun courant ne passe dans la branche  $E'G$ , on aura

$$\text{dans le circuit } AEBR : \quad C(p + R) = E;$$

$$\text{et dans le circuit } BE'GAR : \quad CR = E';$$

$$\text{d'où} \quad \frac{E}{E'} = \frac{p + R}{R}.$$

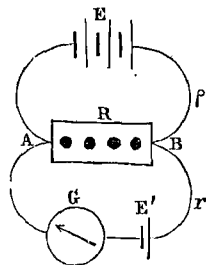


FIG. 140.

Si on intercale un autre rhéostat  $\rho$  dans le circuit de  $E$ , et qu'on donne à  $\rho$  et  $R$  des résistances telles que  $G$  soit au zéro, on aura :

$$\begin{aligned} C(p + \rho + R) &= E, \\ CR &= E', \end{aligned}$$

d'où

$$\frac{E}{E'} = \frac{p + \rho + R}{R}.$$

Pour deux autres résistances  $\rho_1$  et  $R_1$  donnant encore l'équilibre, on a :

$$\frac{E}{E'} = \frac{p + \rho_1 + R_1}{R_1}.$$

De ces deux relations on tire :

$$\begin{aligned} \frac{E}{E'} &= \frac{(\rho_1 - \rho) + (R_1 - R)}{R_1 - R}, \\ \nu &= \frac{R\rho_1 - R_1\rho}{R_1 - R}. \end{aligned}$$

On aura ainsi  $E$  et  $p$ . Le nom de *compensation* vient de ce que l'équilibre étant établi avec  $\rho$  et  $R$ , si on le détruit en ajoutant une nouvelle résistance  $\rho_1 - \rho$  dans le rhéostat  $\rho$ , il faut, pour le rétablir, *compenser* en ajoutant une résistance  $R_1 - R$  dans le rhéostat  $R$ .

#### POTENTIOMÈTRE DE CLARK

Dans la méthode précédente, la pile  $E'$  n'est traversée par aucun

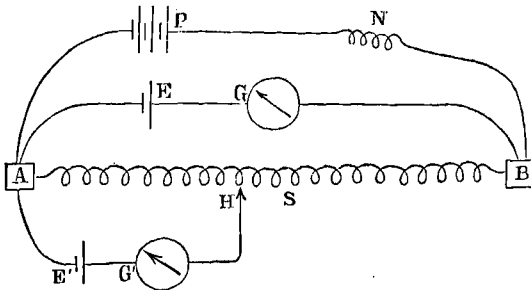


FIG. 150.

courant et par suite ne se polarise pas.  $E$ , au contraire, peut subir des

effets de polarisation. M. Clark a modifié la méthode en se servant d'une pile auxiliaire constante P, et en disposant les deux piles E et E' à comparer, de façon qu'elles ne soient ni l'une ni l'autre traversées par aucun courant.

Les pôles de la pile auxiliaire P sont reliés à deux blocs métalliques A et B, avec un rhéostat N intercalé; E, la plus grande des piles à comparer, a ses pôles reliés aussi à A et B à travers un galvanomètre G. En A et B sont soudés les bouts d'un fil métallique bien calibré et reposant sur une règle divisée en 1000 parties égales, par exemple. On donne au rhéostat N une résistance R telle que G soit au zéro.

On a alors :

$$E = C \times 1000.$$

On relie ensuite E', d'une part à A, et de l'autre à un curseur II placé sur le fil divisé S en un point II, tel que le galvanomètre G' soit aussi au zéro. Le point II étant à n divisions à partir de A, on a :

$$E' = C \times n,$$

d'où

$$\frac{E'}{E} = \frac{n}{1000}.$$

Le professeur Adams a fait remarquer que le galvanomètre G' est inutile; car le galvanomètre G étant au zéro, pour une certaine résistance du rhéostat N, son équilibre sera dérangé si le curseur II occupe une position autre que celle pour laquelle le galvanomètre G' reste au zéro.

#### COMPARAISON DES FORCES ÉLECTROMOTRICES

Il existe un grand nombre de méthodes pour comparer les forces électromotrices. A celles que nous venons d'indiquer nous ajouterons les deux suivantes qui sont les plus simples :

*Méthode d'opposition.* — On oppose dans un même circuit n éléments E à n' éléments E', de telle sorte qu'un galvanomètre interposé reste à zéro.

Alors

$$nE = n'E'.$$

*Méthode du condensateur.* — En chargeant un condensateur de capacité S avec la pile E, on a une quantité d'électricité Q qu'on peut

mesurer en déchargeant le condensateur à travers un galvanomètre à réflexion et notant l'arc d'impulsion  $d$ .

On fera la même expérience en chargeant le même condensateur avec la pile  $E'$ .

On a :

$$Q = SE, \quad Q' = SE',$$

d'où

$$\frac{E}{E'} = \frac{Q}{Q'} = \frac{d}{d'}.$$

Si on a employé des dérivations de pouvoirs  $m$  et  $m'$ ,

$$\frac{E}{E'} = \frac{md}{m'd'}.$$

#### RÉSISTANCE INTÉRIEURE

Il existe aussi un grand nombre de moyens de mesurer la résistance intérieure des piles. Les deux suivants sont les plus employés.

*Méthode de la demi-déviaton.* — On forme un circuit de la pile ( $E, p$ ) et du galvanomètre convenablement dérivé, dont la résistance composée est alors  $g_1$  : on a une déviation  $\delta$  ; on introduit des résistances  $R$  jusqu'à ramener la déviation à  $\frac{\delta}{2}$ . On a alors :

$$p = R - g_1;$$

Si dans le circuit primitif il y avait déjà une résistance  $r$  et qu'il faille la porter à  $R$  pour ramener la déviation à  $\frac{\delta}{2}$  on a :

$$p = R - (2r + g_1).$$

En général, on dérive le galvanomètre à  $\frac{1}{1000}$  et  $g_1 = \frac{g}{1000}$ .

*Méthode de la dérivation (Thomson).* — On forme le circuit de la pile  $P$  d'un rhéostat  $R$  et d'un galvanomètre  $G$ . Le rhéostat ayant une valeur  $r$ , on met une dérivation  $s$  entre les pôles de la pile et on note la déviation  $\delta$ .

On a :

$$\delta = \frac{Es}{p(g+r+s) + (g+r)s}.$$



On supprime la dérivation  $s$ ,  $\delta$  augmente ; mais en donnant une

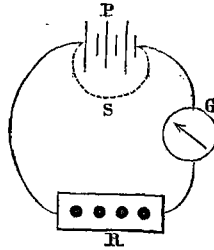


FIG. 151.

résistance convenable  $R$  au rhéostat, on ramène la déviation à la même valeur  $\delta$ . Alors

$$\delta = \frac{E}{p + g + R},$$

d'où l'on tire

$$p = \frac{R - r}{g + r} \times s.$$

#### COROLLAIRES DE BOSSCHA

Des lois de Ohm et de Kirchhoff, M. Bosscha a déduit quelques corollaires qui facilitent beaucoup la solution des problèmes de distribution des courants dans les circuits linéaires. Nous citerons les deux suivants, dont les méthodes de Thomson (p. 556) et de Mance (p. 558) sont des applications immédiates.

1° « Toutes les fois que l'intensité est nulle dans une des branches, les intensités dans les autres branches sont indépendantes de la résistance du conducteur dans lequel il n'y a pas de courant. » Ainsi, si le courant est nul dans la branche BD (fig. 142), les intensités dans les autres branches et en particulier en  $x$  seront indépendantes de la résistance de BD, et on pourra établir ou rompre le contact en O, c'est-à-dire faire la résistance de BD nulle ou infinie, sans que la déviation du galvanomètre placé en  $x$  change. Réciproquement, si en fermant ou ouvrant le contact en O, la déviation du galvanomètre placé en  $x$  ne change pas, c'est que l'intensité est nulle dans BD, et par conséquent c'est que l'on a :

$$\frac{x}{R} = \frac{s}{S}.$$

D'où la méthode de Thomson (p. 556) pour la mesure de la résistance d'un galvanomètre.

2° « Lorsqu'il se trouve deux conducteurs  $a$  et  $b$ , tels qu'une force électromotrice placée en  $a$  n'envoie aucun courant en  $b$ , on ne changera pas l'intensité du courant en  $b$ , soit en supprimant le conducteur  $a$ , soit en réunissant par un circuit sans résistance les deux points qu'il relie. » Dans la figure 142, transposons la pile et le galvanomètre. Si on a la relation  $\frac{x}{R} = \frac{s}{S}$ , une pile placée dans BD n'envoie aucun courant dans AC; la pile étant placée en  $x$ , on ne changera donc pas la déviation d'un galvanomètre placé dans AC, en fermant ou ouvrant le contact O. Réciproquement, si la déviation du galvanomètre placé dans AC ne change pas en ouvrant et fermant le contact O, c'est que l'on a :

$$\frac{x}{R} = \frac{s}{S},$$

d'où l'on déduit la résistance  $x$  de la pile.

#### RÉSISTANCES SPÉCIFIQUES

*Résistance spécifique rapportée à l'unité de volume.* — C'est la résistance qu'offre au passage du courant un cube de l'unité de volume (le centimètre cube dans le système C. G. S.) de la substance considérée. R étant la résistance d'un conducteur de longueur  $l$  et de section uniforme  $s$ ,  $\rho$  la résistance spécifique, on a :

$$R = \frac{l\rho}{s},$$

étant en centimètres,  $s$  en centimètres carrés.

La *conductibilité spécifique* est l'inverse de la résistance, c'est-à-dire  $\frac{1}{\rho}$ .

*Résistance spécifique rapportée à l'unité de masse.* — Pour évaluer exactement la section d'un petit fil, on la déduit de la longueur, du poids et du poids spécifique d'un échantillon. Le poids spécifique étant quelquefois difficile à connaître exactement, on prend comme terme de comparaison la résistance d'un fil de l'unité de longueur et de l'unité de masse : c'est ce que l'on appelle la « résistance spécifique rapportée à l'unité de masse ».

Soient  $P$  le poids en grammes,  $s$  la section en centimètres carrés,  $l$  la longueur en centimètres,  $\delta$  le poids spécifique; on a :

$$P = s l \delta, \quad \text{d'où} \quad s = \frac{P}{l \delta},$$

Alors

$$R = \frac{l \rho}{s} = \frac{l^2 \delta}{P} \rho.$$

Si  $r$  est la résistance de 1 centimètre du fil pesant 1 grammé, on a :

$$r = \delta \rho,$$

et par conséquent

$$R = \frac{l^2}{P} r.$$

Habituellement, on prend pour terme de comparaison la résistance de 1 mètre du fil pesant 1 gramme. Si  $l$  est la longueur en mètres, on a alors :

$$R = \frac{l^2 \delta \times 10\,000}{P} \rho$$

( $\rho$  étant la résistance spécifique rapportée au centimètre cube); et par suite, si  $r_1$  est la résistance de 1 mètre du fil pesant 1 gramme,

$$r_1 = 10\,000 \delta \rho,$$

et alors

$$R = \frac{l^2}{P} r_1.$$

#### EFFET DE LA TEMPÉRATURE

Entre les résistances d'un métal aux températures  $t + \theta$  et  $t$  on admet la relation

$$R_{t+\theta} = R_t (1 + \alpha)^\theta,$$

ou

$$\log R_{t+\theta} = \log R_t + \theta \log (1 + \alpha).$$

Pour la plupart des métaux purs, entre 0 et 100°, on a :

$$R_{100} = R_0 \times 1,414.$$

Le docteur Matthiessen donne la relation

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2),$$

et pour la plupart des métaux purs :

$$a = 0,003824, \quad b = +0,00000126;$$

pour le mercure :

$$a = 0,0007485, \quad b = -0,000000398;$$

pour le maillechort ou argent allemand :

$$a = 0,0004133, \quad b = +0,000000152.$$

Entre deux températures  $t$  et  $t + \theta$  peu différentes, on admet

$$R_{t+\theta} = R_t (1 + \theta \alpha);$$

pour le cuivre :  $\alpha = 0,00388$ .

Entre la conductibilité à 0 et 100°, on a pour le cuivre :

$$C_{100} = C_0 \left(1 - \frac{29,69}{100}\right) = C_0 \times 0,70.$$

#### RÉSISTANCE DES DIÉLECTRIQUES

Si on calcule la résistance d'un condensateur à diélectrique solide, on trouve qu'il existe, entre l'expression de cette résistance et celle de sa capacité, la relation

$$RS = \frac{1}{4\pi} \rho \sigma,$$

$R$  étant la résistance,  $S$  la capacité,  $\rho$  la résistance spécifique,  $\sigma$  la capacité inductive spécifique. Le facteur  $4\pi$  provient d'ailleurs de ce qu'on a pris arbitrairement pour unité la capacité spécifique inductive de l'air.

Ainsi la résistance d'une couche cylindrique de gutta-percha de longueur  $l$  comprise entre deux cylindres métalliques concentriques de diamètres  $d$  et  $D$  (âme d'un câble sous-marin) est donnée par

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \log \text{nép.} \frac{D}{d} = 0,366 \frac{\rho}{l} \log \frac{D}{d};$$

d'où on tire :

$$\rho = 2,729 \frac{lR}{\log \frac{D}{d}}.$$

La résistance augmente avec la durée de l'électrisation. On la mesure en général au bout d'une minute de charge.

Elle diminue rapidement avec la température, suivant la loi suivante :

$$R_{t+0} = R_t \times 0,8944^0.$$

On définit alors la résistance spécifique à 24° C.

Pour la bonne gutta-percha, la résistance spécifique rapportée au centimètre cube, à 24°C et après une minute de charge, varie de  $389 \times 10^6$  à  $450 \times 10^6$  megohms, ou de  $3,89 \times 10^{23}$  à  $4,5 \times 10^{23}$  unités absolues électro-magnétiques.

M. Siemens a indiqué la méthode suivante pour mesurer la résistance d'un diélectrique. On forme avec le diélectrique un condensateur à grande surface. On charge une de ses armatures au potentiel P et on met l'autre armature à la terre. On mesure le temps  $t$  que met le potentiel à tomber à la valeur  $p$ . S étant la capacité du condensateur, on a :

$$p = P e^{-\frac{t}{S}};$$

d'où

$$R = \frac{t}{S \log \text{ nép. } \frac{P}{p}} = \frac{0,4343 t}{S \log \frac{P}{p}},$$

$t$  étant en secondes.

Le temps que met le condensateur à perdre la moitié de sa charge étant  $t$  secondes,

$$R = 1,443 \frac{t}{S}.$$

Un câble électrique construit avec de la gutta-percha dont la résistance spécifique est  $389 \times 10^6$  megohms, met *cent secondes* à perdre la moitié de sa charge.

J. R.

## CHAPITRE XXII

### ÉLECTRO-MAGNÉTISME — NOTIONS PRÉLIMINAIRES

---

#### AIMANT ÉQUIVALENT

Si un courant électrique passe dans un très petit anneau de fil métallique, cet anneau agit sur tous les rapports comme le ferait un aimant court qui serait suspendu à son centre, et qui aurait la position qu'il prend naturellement sous l'action seule du courant. Cette position, nous le rappelons, est perpendiculaire au plan de l'anneau, et le pôle marqué de l'aimant se trouve à la gauche d'un homme qui nagerait autour de l'anneau dans le sens du courant et les yeux tournés vers le centre (1).

L'intensité du courant restant constante, si on le fait circuler autour de deux ou plusieurs anneaux concentriques, on augmente le moment magnétique de l'aimant équivalent en augmentant l'intensité de cet aimant. Si les anneaux sont disposés en hélice, on augmente le bras du couple et par conséquent le moment.

#### ÉLECTRO-AIMANT (2)

Si un barreau de fer doux est placé dans l'axe d'une bobine de fil traversée par un courant, le barreau devient un aimant dont le pôle marqué se trouve à la gauche d'un homme nageant dans le sens du courant et les yeux tournés vers l'axe de la bobine.

(1) Voir p. 470.

(2) Voir chap. xxxi.

Lorsque le courant cesse, le barreau perd ses propriétés magnétiques; lorsqu'on l'inverse, le magnétisme du barreau est inversé. Le magnétisme du barreau augmente lorsque l'intensité du courant augmente. Tout d'abord, lorsque le courant est faible, il croît sensiblement dans la même proportion. Lorsque l'intensité du courant vient à croître, l'intensité de l'aimant croît dans un rapport plus petit et qui diminue rapidement, et finalement il arrive un moment où l'augmentation du courant ne produit plus aucune augmentation dans le magnétisme du barreau. A ce moment, on dit que le barreau est « aimanté à saturation ».

## ACTION MUTUELLE DE DEUX COURANTS

Deux courants de même sens s'attirent.

Deux courants de sens contraires se repoussent.

*La force qui s'exerce entre deux courants rectilignes parallèles est numériquement égale au produit des intensités des courants multiplié par leur longueur, divisé par le carré de leur distance.*

Cette loi a été découverte par Ampère.

## INDUCTION ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE

On doit à Faraday les découvertes suivantes :

## MOUVEMENT DU FIL

*Si un fil se meut dans le voisinage d'un aimant dans une direction quelconque, sauf le long d'une ligne de force, il se produit entre ses deux extrémités une différence de potentiel qui donnera naissance à un courant, si ces deux extrémités sont réunies par un fil soustrait à l'action de l'aimant inducteur (1).*

(1) L'expérience peut être réalisée de plusieurs manières. La plus facile à

On peut se rappeler la direction de ce courant par la règle suivante :

Si, dans l'hémisphère nord, une personne s'avance les bras étendus, le courant que l'action du magnétisme terrestre tendrait à produire dans un fil représenté par ses bras marcherait de sa main droite à sa main gauche (1).

#### MOUVEMENT DE L'AIMANT

Si un pôle magnétique se meut dans le voisinage d'un fil, dans une direction quelconque, sauf celle parallèle au fil, un courant sera induit dans le fil. Si, par exemple, un aimant (SN fig. 153) est enfoncé vivement dans une bobine de fil, ou si on l'en retire vivement, il se mani-

saisir consiste à faire glisser les extrémités du fil mobile sur deux rails fixes (fig. 152) dans la direction O. E. et reliés transversalement par un fil fixe.

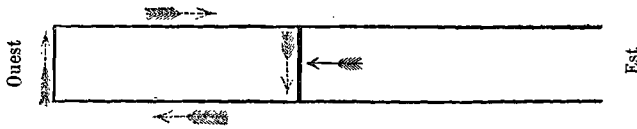


FIG. 152.

Flèche pleine = mouvement du fil.

Flèche pointillée = courant développé par un pôle magnétique marqué, situé en avant, ou sous l'influence du magnétisme terrestre.

(Supposons les deux rails dans un même plan vertical, représenté par la feuille de papier; les lignes de force du champ formé par la composante horizontale de la terre iront du sud (fluide austral), situé en avant du papier, au nord (fluide boréal), situé par derrière le papier. Un aimant qui remplacerait la composante horizontale terrestre aurait donc son pôle austral ou pôle marqué en avant du papier. Si on imagine le bonhomme d'Ampère couché sur le fil mobile dans le sens de la flèche pointillée et regardant vers le nord, c'est-à-dire derrière le papier, il aura devant lui un pôle boréal. La force électro-magnétique tendra à déplacer ce pôle vers sa droite, ou, si ce pôle est immobile, à déplacer le bonhomme vers sa gauche, c'est-à-dire en sens contraire du mouvement. Le sens indiqué par la flèche pointillée est donc bien le sens du courant qui doit se produire en vertu de la loi de Lenz (ch. XXIX).

J. R.)

(1) Faraday, *Exp. res.* 3079, vol. III, p. 332.



fera un courant induit qui aura une certaine direction quand on introduit le pôle, et une direction contraire

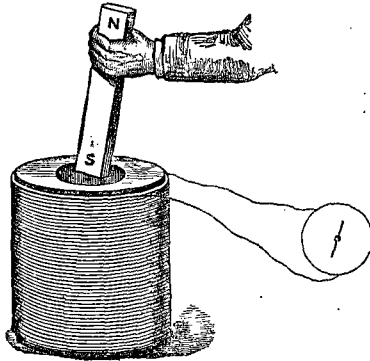


Fig. 153.

quand on le retire. Si on retourne l'aimant pour se servir de l'autre pôle, le courant sera inverse.

#### MOUVEMENT DU COURANT

Si au lieu d'un aimant d'acier, c'est une bobine de fil

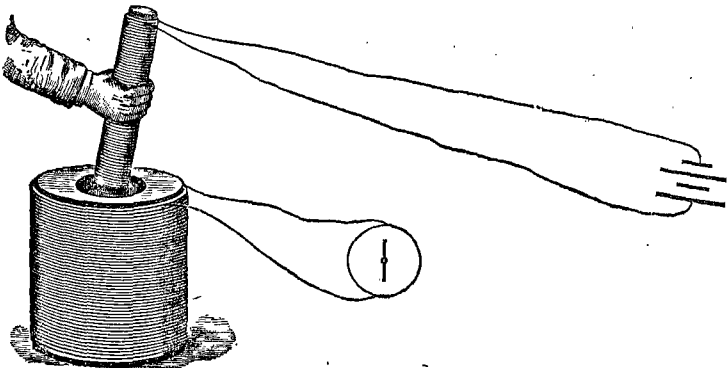


Fig. 154.

traversée par un courant, comme dans la figure 154, que l'on

enfonce dans la bobine extérieure ou qu'on retire de cette bobine, il se développe des courants induits dont les directions dépendent des directions du mouvement de la bobine extérieure et de la direction du courant qui la traverse. La bobine intérieure agit sous tous les rapports comme le ferait son aimant équivalent.

Dans les deux cas, le courant induit est d'autant plus intense que l'on enfonce ou que l'on retire plus vivement l'aimant de la bobine, et dans le cas du fil mobile, il est d'autant plus intense que le fil se meut plus rapidement.

#### VARIATION DU COURANT

Si, dans la figure 154, la plus petite bobine est introduite dans la plus grande, et qu'on fasse varier son courant, à chaque accroissement il y aura dans la bobine extérieure un courant induit dans une certaine direction, et à chaque diminution, un courant induit dans l'autre direction, car la variation d'un courant stationnaire produit le même effet magnétique que le déplacement d'un courant fixe.

Si l'on met un noyau métallique dans la bobine intérieure, l'effet sur la bobine extérieure sera encore augmenté (1). Si c'est un noyau de fer, l'augmentation sera très considérable.

(1) Voir chap. xxiv.

## NOTES

## ÉQUIVALENCE DES AIMANTS ET DES COURANTS

On a vu que le moment du couple exercé par un courant circulaire C sur un aimant  $ml$  placé sur son axe à une distance D est exprimé par

$$G = \frac{2\pi C a^2}{(a^2 + D^2)^{\frac{3}{2}}} \times ml.$$

Si  $a$  est très petit par rapport à D, cette expression se réduira à

$$G = \frac{2\pi C a^2}{D^3} \times ml,$$

ou, posant  $\pi a^2 = A$ ,  $ml = M'$ ,

$$G = \frac{2 A C M'}{D^3},$$

relation qui peut encore servir à définir l'unité du courant.

Remplaçons le courant circulaire par un petit aimant de moment M placé à son centre normalement à son plan. Les deux aimants M et M' seront dans la situation des aimants de Gauss, deuxième position (voy. p. 306), et le moment du couple que l'aimant fixe M exerce sur l'aimant mobile M' est égal à

$$\frac{2 M M'}{D^3}.$$

Il y aura donc équivalence entre le courant et l'aimant M, si  $M = AC$ .

## EXTENSION AUX COURANTS FINIS

On a supposé que les aimants et les courants étaient infiniment petits par rapport à leurs distances. Ampère a étendu cette équivalence aux courants finis dans leurs actions à distance, par le raisonnement suivant : « Soit un circuit plan quelconque ; partageons sa surface en éléments infiniment petits par des droites parallèles coupées par un second système de parallèles faisant des angles droits avec les premières, et imaginons autour de ces aires infiniment petites des

courants dirigés dans le même sens que le courant primitif. Toutes les parties des courants qui se trouveront suivant ces lignes droites seront détruites, et il ne restera que les parties curvilignes de ces courants qui forment le circuit total. » Chaque petit courant de surface  $A$  et d'intensité  $C$  étant équivalent à un aimant  $M = AC$ , le courant total de surface  $\Sigma A$  sera équivalent à un aimant  $\Sigma M = C\Sigma A$ .

#### SOLÉNOÏDES

Une longue hélice formée de spires d'un diamètre petit par rapport à sa longueur s'appelle habituellement un « solénoïde », bien que strictement ce nom ne convienne qu'à une série de cercles égaux et parallèles, perpendiculaires à un axe commun et traversés par des courants égaux  $C$ . Les propriétés d'un solénoïde indéfini sont identiques à celles d'un pôle d'aimant qui occuperait la même position que l'extrémité de ce solénoïde, et dont la nature (boréale ou australe) est déterminée par la condition de satisfaire à la règle du bonhomme d'Ampère.

Un solénoïde de longueur finie peut être regardé comme la superposition de deux solénoïdes indéfinis.

Un solénoïde composé de  $N$  cercles de surface  $A$ , suspendu dans un champ magnétique, est soumis à la même action qu'un aimant dont le moment serait

$$M = NAC;$$

$l$  étant la longueur de l'axe du solénoïde, on a aussi  $M = lm$ .

L'intensité du pôle de l'aimant équivalent est donc  $m = \frac{NAC}{l}$ .

$n$  étant le nombre de spires par centimètre,  $N = nl$  et  $m = nAC$ .

Un solénoïde indéfini peut être remplacé par un pôle  $m = nAC$ , et un solénoïde limité de longueur  $l$ , par un aimant de même longueur et dont le moment serait  $nAC \times l$ .

Si  $L$  est la longueur du fil enroulé en spires de rayon  $a$ ,  $L = 2\pi a \times N$  et  $A = \pi a^2 = \frac{L^2}{4\pi N^2}$ . Le moment  $M = NAC$  devient alors  $= \frac{L^2 C}{4\pi N}$ .

#### AIMANTATION

L'action d'un solénoïde de longueur  $2l$  sur l'unité de pôle placée sur son axe et au milieu de sa longueur est égale à

$$\frac{2\pi CN}{\sqrt{a^2 + l^2}}.$$

C'est en ce point qu'elle a sa plus grande valeur; mais si la longueur de la spirale est très grande par rapport à son diamètre, le champ magnétique intérieur sera sensiblement uniforme, sauf à une très petite distance des extrémités.

## AIMANTS ET SOLÉNOÏDES (1)

Considérons un solénoïde vertical traversé par un courant dans un sens tel que le solénoïde ait son pôle sud en haut; descendons dans son intérieur un petit aimant suspendu avec son pôle nord en bas: celui-ci sera attiré avec une force qui ira en diminuant jusqu'au centre, où il sera en équilibre sous l'action des forces magnétiques. Au delà, les forces magnétiques tendront à s'opposer à son mouvement de descente. Quand l'aimant est en équilibre dans l'intérieur du solénoïde, ses pôles sont disposés comme le seraient ceux d'un barreau de fer doux, de même longueur, aimanté par le solénoïde; c'est-à-dire que son pôle nord correspond au pôle nord du solénoïde.

Un aimant creux ne se conduit pas sous ce rapport comme un solénoïde. Si le pôle nord d'un aimant A est introduit dans l'intérieur d'un aimant creux C par le pôle sud de ce dernier, C tend à repousser A dès que A a pénétré un peu dans son intérieur; et si l'on place une tige de fer doux à l'intérieur d'un aimant d'acier creux, le pôle nord de l'aimant induira un pôle sud sur le bout voisin du fer doux.

Cette expérience prouve qu'on ne doit pas regarder un aimant comme produit simplement par des courants circulant autour de sa périphérie extérieure; mais elle confirme l'hypothèse qu'un aimant se compose d'un grand nombre de solénoïdes placés côte à côte. Un aimant creux sera formé par un faisceau annulaire de ces solénoïdes; et si on considère l'anneau qui forme l'un des bouts de l'aimant, et les petits circuits qui le remplissent, on verra que dans les éléments situés sur la circonférence intérieure de l'anneau, les courants ont une même direction, contraire à celle qu'ils ont dans les éléments situés sur la circonférence extérieure, et qu'ils se détruisent dans les éléments contigus. Par conséquent, aux pôles d'un aimant creux, les courants sur la circonférence intérieure ont une direction inverse de celle des courants sur la circonférence extérieure.

Des considérations analogues expliquent qu'une enveloppe de fer doux qui entoure une hélice magnétisante n'exerce pas d'action magnétique sur les points extérieurs. Il y a à l'intérieur de l'enveloppe

(1) Jenkin, *Electricity*, p. 145.

un courant de même sens que celui de l'hélice, et à l'extérieur un courant de sens contraire.

Un cylindre de fer doux, introduit dans une hélice magnétisante, augmente beaucoup l'intensité du champ de force extérieur. Le coefficient d'aimantation du fer doux étant 332, le champ devient 32 fois plus intense. Le fer doux concentre les lignes de force près des pôles, comme une lentille concentre les rayons lumineux sur un point que l'on veut éclairer.

#### ACTION MUTUELLE DE DEUX COURANTS

La loi d'Ampère permet de calculer l'action de deux courants fermés de dimensions très petites par rapport à leur distance. Supposons les deux courants C et C' situés dans des plans verticaux perpendiculaires l'un à l'autre, le centre du second C' se trouvant sur une normale au plan de C passant par le centre de C. Si C est fixe et C' mobile autour d'une verticale passant par son centre, l'action qui s'exerce entre eux produira un couple tendant à rendre leurs plans parallèles, et dont le moment sera

$$G = \frac{2AC \times A'C'}{D^3}, \quad (1)$$

A et A' étant les surfaces des deux courants, D leur distance.

Cette relation peut servir à définir l'unité d'intensité par la condition que si  $C = C' = 1$ ,  $A = A' = 1$ , on ait  $G = \frac{2}{D^3}$ . Cette unité est identique à celle déjà définie par les actions électro-magnétiques.

Mais la formule (1) suppose que l'expression de l'action mutuelle de 2 éléments de courant établie par Ampère est multipliée par 2; sinon le calcul donnerait  $G = \frac{AC \times A'C'}{D^3}$  et, définissant l'unité d'intensité d'après cette dernière relation, on a un nouveau système d'unités, dit système *électro-dynamique*. Le rapport de l'unité de courant électro-magnétique à l'unité de courant électro-dynamique est  $\sqrt{2}$ . Il est préférable de multiplier par 2 l'expression d'Ampère, afin de faire concorder les deux systèmes.

J R.

## CHAPITRE XXIII

### LE TÉLÉPHONE ET LE MICROPHONE

#### TÉLÉPHONE DE BELL

Le téléphone de Bell, aujourd'hui si connu, est une belle application de la théorie de l'induction électro-magnétique. Il est représenté par la figure 155, qui en montre l'aspect extérieur, et par la figure 156, qui est une coupe-longitudinale.

Un diaphragme formé d'une feuille de fer très mince est placé au fond de l'embouchure de l'appareil. Derrière

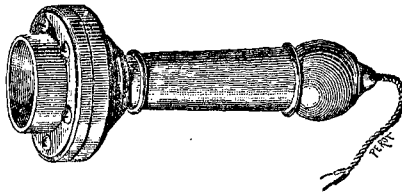


FIG. 155.

cette membrane est une tige d'acier aimantée, perpendiculaire à cette membrane de fer; sur la tige d'acier, une toute petite bobine de fil de cuivre, très courte et très voisine de la membrane. Le tout est enfermé dans un tube en bois dont la forme suit le profil de l'appareil intérieur.

Lorsqu'on parle dans l'instrument, la plaque de fer vibre à l'unisson des vibrations sonores.

Son mouvement produit des altérations temporaires dans le magnétisme de l'aimant d'acier, et celles-ci à leur tour induisent des courants périodiques dans la bobine de fil.

Les courants induits se transmettent le long de la ligne télégraphique et sont reçus dans un téléphone semblable à son autre extrémité.

Ils circulent autour de la bobine de fil de ce téléphone,

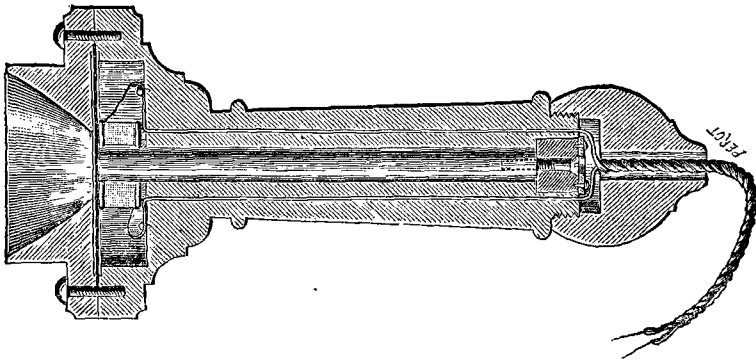


FIG. 156.

et produisent des variations temporaires dans le magnétisme de l'aimant d'acier.

En raison de ces changements, la force avec laquelle la plaque de fer est attirée subit des variations ; en sorte que cette plaque se met à vibrer à l'unisson des vibrations de la plaque de l'instrument transmetteur.

La plaque, en vibrant, met l'air en mouvement et reproduit avec exactitude, non seulement les sons musicaux, mais aussi les mots articulés dans l'instrument transmetteur. On peut reconnaître même à la distance de plusieurs kilomètres les voix des personnes qui parlent. On trouve



dans les ouvrages de télégraphie la description de diverses modifications de cet instrument (1).

Lorsqu'un courant de pile *constant* est envoyé à travers un téléphone, aucun son n'est produit, mais chaque *variation* du courant donne naissance à un bruit fort. On se sert quelquefois de cet instrument pour reconnaître si un courant est constant ou intermittent.

#### MICROPHONE DE HUGHES

Lorsque en un point d'un circuit traversé par un courant de pile se trouve un contact imparfait, un changement dans la bonté du contact produira une variation dans le courant et donnera un son dans un téléphone intercalé dans le circuit.

Le professeur Hughes a découvert que lorsque le contact consiste en deux morceaux de charbon légèrement pressés l'un contre l'autre, les plus petits sons émis dans le voisinage du charbon produisent des variations dans le courant.

Le microphone (fig. 157) se compose de deux ou plusieurs morceaux de charbon A, C, B légèrement pressés l'un contre l'autre, et mis dans le circuit d'un téléphone T et d'une pile P.

(1) On a vu page 345 le principe du téléphone de Reis, qui est le plus ancien de ces appareils.

M. Page a reconnu que les variations de potentiel produites par la transmission téléphonique étaient accusées par l'électromètre de M. Lippmann. M. A. Bréguet, de son côté, frappé de la réversibilité de cet électromètre et de l'instantanéité de ses mouvements, a songé à en faire un téléphone à la fois transmetteur et récepteur : c'est le *téléphone à mercure*. Ainsi, avec deux instruments semblables à celui de la figure 45 (p. 241), il suffit de fermer le vase A par une membrane, de relier les fils  $\alpha$  ensemble et les fils  $\beta$  ensemble, pour que les sons émis sur la membrane du premier appareil soient reproduits par celle du second. On simplifie l'appareil en supprimant la partie KGH et terminant le tube AK en K par une pointe effilée plongeant dans le vase B, comme dans la figure 46.

J. R.

Le chuchotement le plus faible fait près du microphone est brusquement reproduit dans le téléphone.

Pour amplifier les effets, on place habituellement le microphone sur une table de résonance posée sur des rou-

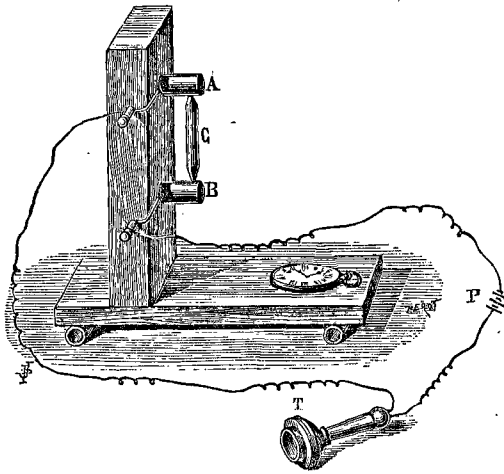


FIG. 157.

leaux de caoutchouc. On entend distinctement au téléphone le bruit d'une mouche qui se promène sur cette table.

Le tic-tac d'une montre résonne comme des coups de marteau.

## APPENDICE AU CHAPITRE XXIII

---

### COMMUNICATIONS TÉLÉPHONIQUES (1)

Il existe actuellement à Paris deux entreprises pour l'établissement de communications téléphoniques privées; l'une emploie le téléphone électro-magnétique de Gower, l'autre le téléphone à courant de pile d'Edison.

#### TÉLÉPHONE DE GOWER

Le téléphone de Gower, présenté à l'Académie des sciences le 27 janvier 1879 (2), est fondé sur le principe de Bell : les sons produits sont assez nets pour être entendus, si l'on veut, de toute une salle, et l'instrument renferme en lui-même son avertisseur.

L'instrument est représenté dans la figure 158 (1, 2, 3).

Afin d'obtenir des aimants très forts, M. Gower emploie de l'acier d'Allevard, qui paraît être le meilleur pour cet usage : il a donné à ses aimants la forme particulière que l'on voit dans la partie 3 de la figure, et dans laquelle les deux pôles sont placés en regard l'un de l'autre et à une très petite distance. Le magnétisme leur a été communiqué par un courant intense fourni par une machine Gramme, et ils peuvent porter 5 kilogrammes. Les pôles se terminent par des noyaux de fer oblongs, entourés de bobines méplates; cette forme permet de placer les pôles bien au centre de la membrane, qui est représentée dans la partie 2.

L'appareil est placé dans une boîte de laiton 1 d'un volume très réduit.

La membrane 2 est montée sur un couvercle de laiton dans l'épaisseur duquel une cavité extrêmement mince est réservée : on a ainsi une reproduction plus nette des articulations, car on évite les effets

(1) Les figures et descriptions contenues dans cet appendice sont extraites du journal *la Lumière électrique*, Paris, 51, rue Vivienne, qui a mis gracieusement les figures à notre disposition.

(2) *Comptes rendus*, t. LXXXIII, p. 179.

de résonance qui, en prolongeant chaque son, rendraient confus le son qui suit.

L'appareil est muni d'un tuyau acoustique de 1 mètre de long, qui ne diminue pas l'intensité des sons ; on parle devant l'embouchure de ce tuyau quand on veut transmettre, et on le met à l'oreille pour re-

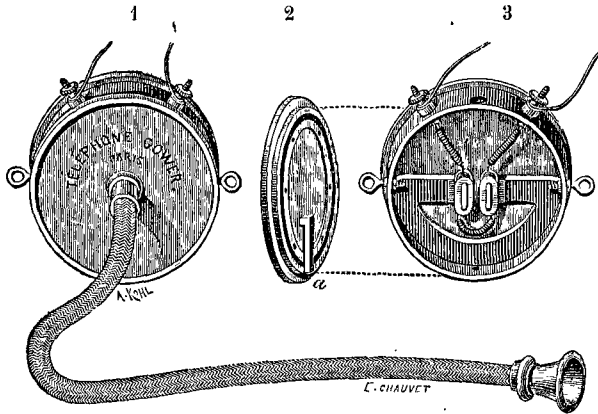


Fig. 158.

cevoir, si une seule personne doit entendre. Si plusieurs personnes doivent entendre, on remplace dans le récepteur le tuyau acoustique par un porte-voix.

M. Gower a ajouté à son appareil un appel analogue au sifflet des tuyaux acoustiques et fonctionnant sans l'assistance d'aucune pile.

Cet avertisseur est simplement constitué par une ouverture pratiquée dans le diaphragme 2 et derrière laquelle se trouve fixée par une équerre *a* une anche d'harmonium. Quand on souffle par le tuyau acoustique, on fait vibrer l'anche : ses vibrations se communiquent à toute la membrane qui lui sert de support, et les excursions de cette membrane sont fort étendues. Il en résulte la production de courants induits énergiques relativement aux courants téléphoniques habituels, et qui font produire au récepteur un son assez semblable aux cors de tramways.

Les deux téléphones, transmetteur et récepteur, sont identiques et ont chacun leur anche vibrante ; mais celle-ci n'entre en jeu que dans le transmetteur et seulement quand on souffle ; car, si l'on parle, on ne produit pas de courant d'air, mais seulement des vibrations de l'air.

*Installation.* — Les abonnés sont reliés par des fils télégraphiques au poste central, où on les réunit par groupes de 30 au plus, chaque groupe étant desservi par un employé qui a devant lui un système analogue à celui de la figure 159. Cette figure suppose 10 correspondants seulement. La partie supérieure est une boîte renfermant autant de signaux visibles du système Ader (voy. plus loin) qu'il y a de lignes,

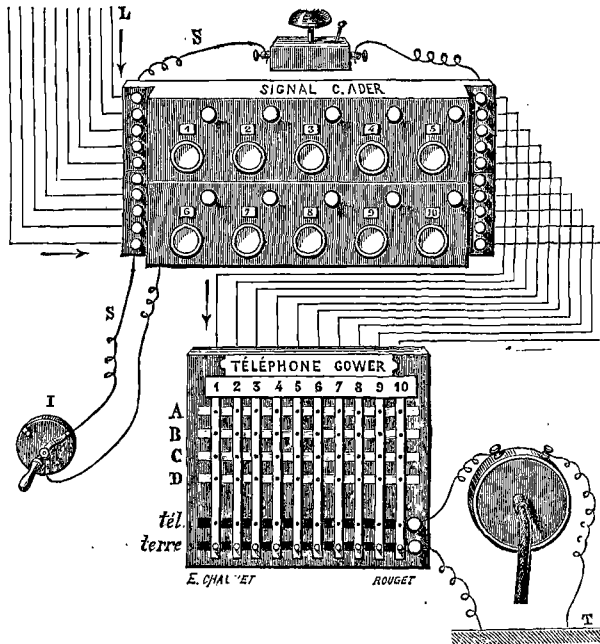


FIG. 159.

et ces signaux portent des numéros : les trous circulaires sont les petites fenêtres où le disque se montre. Au-dessus est une sonnerie électrique qui peut être introduite dans le circuit à l'aide de l'*interrupteur* I, quand cela est utile.

La seconde partie du système est le *commutateur*, connu en télégraphie sous le nom de *commutateur suisse*. — Chaque ligne aboutit à une lame verticale de cuivre portant son numéro : derrière la tablette de bois de ce commutateur existent d'autres bandes horizontales

de cuivre, figurées légèrement et qui croisent les premières sans les toucher. Ces bandes sont percées de trous à leurs points de croisement, et en enfonçant dans un de ces trous une cheville métallique, on relie la bande de dessus à celle de dessous.

Chaque bande a sa cheville; sur la figure, elles sont toutes au bas du tableau sur la ligne marquée *terre* : si le numéro 5 appelle, l'employé détache la cheville du numéro 5 et l'enfonce dans la bande 5 sur la ligne marquée *tél* ou *téléphone*. Il peut alors correspondre avec l'abonné numéro 5, qui lui demande de le mettre en communication avec le numéro 9. L'employé efface le signal du numéro 5, déplace la cheville de la bande 9, qu'il met sur la ligne *téléphone*, et envoie le signal d'appel au numéro 9 avec lequel il entre en correspondance. Ayant prévenu le numéro 9, il met 5 et 9 en communication directe, en enfonçant les chevilles 5 et 9 chacune sur sa bande verticale, mais suivant une même ligne horizontale.

Les signaux des numéros 5 et 9 sont alors effacés, et restent effacés pendant la correspondance de 5 avec 9, parce que la parole ne suffit pas pour les mettre en mouvement. Quand les numéros 5 et 9 auront terminé, ils souffleront tous deux dans leur téléphone, et l'apparition de leurs signaux montrera à l'employé que la ligne est disponible : celui-ci ôte alors les chevilles et les remet sur la ligne *terre*.

Si les correspondants n'appartiennent pas au même groupe, l'opération est un peu plus compliquée, mais pourtant analogue, à l'aide d'un tableau spécial, appelé *grand commutateur*, qui fait pour les groupes ce que les autres font pour les lignes.

#### SIGNAL VISIBLE D'AVERTISSEMENT POUR LES TÉLÉPHONES SANS PILE DE M. ADER

L'avertissement du téléphone Gower ne donne qu'un signal fugitif; pour reconnaître d'où vient l'appel, il faut le compléter par un signal persistant et qui frappe l'œil, comme dans les systèmes de sonneries électriques à signaux.

La difficulté résolue par M. Ader est de faire opérer un déclanchement par une armature électro-magnétique, vibrant si faiblement que ses mouvements sont invisibles.

L'électro-aimant de l'appareil (fig. 160) est à peu près celui du Gower, avec pôles rapprochés, et l'armature est constituée par une lame de ressort R fixée d'une manière très rigide par une de ses extrémités, et portant en un point de sa longueur une petite ouverture dans laquelle est engagé le crochet C d'une détente fixée à l'ex-

trémité d'une bascule LX en équerre. Cette bascule est articulée en X et porte du côté opposé au bras de détente deux autres bras, dont l'un, M, est pourvu d'un contrepoids courant sur une vis, et l'autre d'un disque sur lequel est écrit le mot *Répondez*. Quand le déclanchement s'effectue, ce disque apparaît dans une fenêtre pratiquée sur le couvercle de la boîte qui renferme l'appareil.

Pour que le crochet de la détente C puisse sortir facilement de l'ouverture dans laquelle il est engagé, la partie qui forme détente

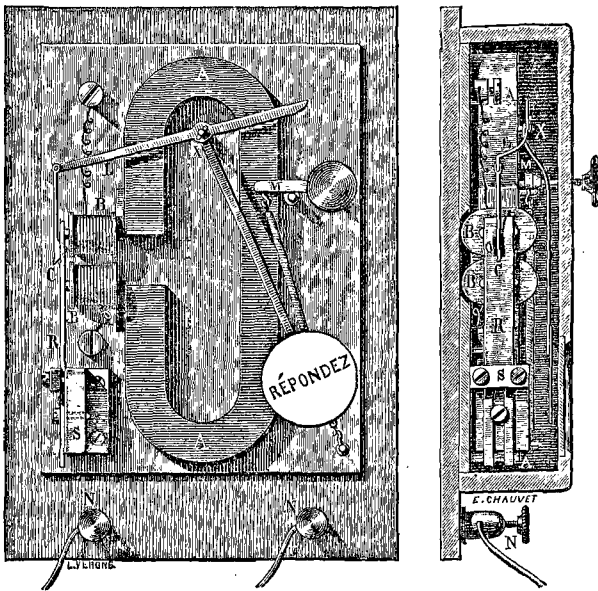


FIG. 160.

est taillée en plan incliné, et l'enclenchement n'est effectué que par le frottement déterminé sur ce plan incliné par la partie aiguë de l'ouverture qui sert de butoir. Tant que le ressort ne vibre pas, l'enclenchement se maintient; mais dès qu'une petite vibration se produit, la partie aiguë du butoir accomplit des mouvements de va-et-vient infiniment petits, qui produisent sur le plan incliné l'effet d'un cliquet d'impulsion sur une roue à rochet, et finissent par le pousser successivement hors de l'ouverture, et, dès lors, le déclanchement s'effectue et le signal *Répondez* apparaît derrière la fenêtre.

Il suffit pour cela de souffler dans le téléphone Gower, comme pour produire l'appel, et les courants transmis sont alors assez forts pour provoquer de petites vibrations qui, en additionnant leurs effets, arrivent à déterminer une action mécanique suffisante, quand le ressort R vibre à l'unisson du son émis par la membrane du téléphone. Cet effet ne se produit pas sous la seule influence de l'émission de la parole.

On a perfectionné ce système en rendant droite la surface de détente du crochet C et inclinant le ressort-armature R. Celui-ci accomplit alors, sous l'action de l'aimant, des mouvements en arc de cercle qui agissent sur la partie droite du crochet comme un cliquet d'impulsion sur une crémaillère. L'aimant A n'a plus qu'une bobine ; l'autre bobine est remplacée par le ressort R lui-même, qui se trouve alors fixé sur l'un des pôles de l'aimant sous l'inclinaison voulue, et dont les vibrations sont ainsi amplifiées.

#### TÉLÉPHONE EDISON

Le téléphone Edison est fondé sur le même principe que le microphone imaginé postérieurement par M. Hughes, c'est-à-dire sur la possibilité d'obtenir des variations régulières et périodiques de l'intensité du courant fourni par une pile, en faisant varier la résistance du circuit.

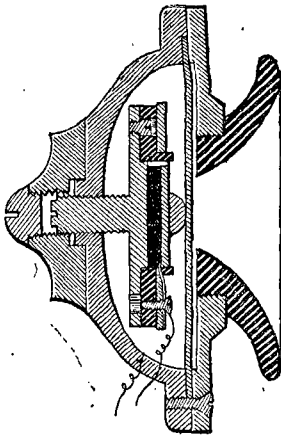


FIG. 161. — Transmetteur Edison.

Nous empruntons à la *Lumière électrique* (1) du 1<sup>er</sup> juillet 1880 les détails du système employé à Paris par la Compagnie du téléphone Edison.

Dans le transmetteur (fig. 161), une pastille de charbon de la grandeur d'une pièce d'un franc, fixée entre deux disques de platine, reçoit les vibrations de la plaque vibrante. Ces vibrations se traduisent par des variations de pression sur la pastille, variations qui ont pour effet de modifier sa résistance électrique et par suite l'intensité du courant qui la traverse. Ce courant, produit par une pile de

(1) La lumière électrique, t. II, p. 272.



2 ou 3 éléments Leclanché, passe seulement dans le circuit local formé par la pastille et le fil inducteur AB d'une bobine d'induction

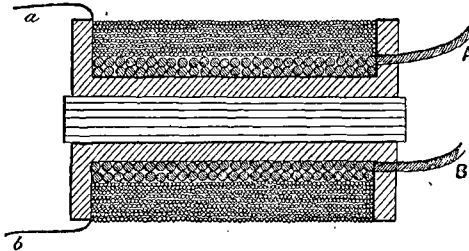


FIG. 162. — Bobine d'induction.

(fig. 162). C'est le courant induit développé dans le fil fin *ab* qui va sur la ligne et fait fonctionner le récepteur.

Ce récepteur (fig. 163), dû à M. Phelps, est un téléphone Bell, dont

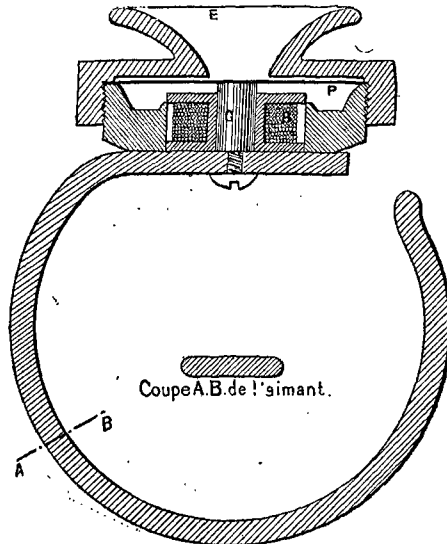


FIG. 163. — Récepteur Phelps.

l'aimant est disposé en anneau, ce qui le rend très commode à tenir et

à suspendre. La bobine de fil fin entoure un petit noyau de fer doux G vissé sur l'aimant. Une plaque vibrante P et une embouchure en ébonite E complètent le système.

La figure 164 montre les liaisons de deux postes téléphoniques entre eux et avec le bureau central, au moment où la conversation est engagée. Dans la position d'attente, lorsque les téléphones sont suspendus à leurs crochets, chaque abonné a sa sonnerie sur la ligne, et le circuit de sa pile est ouvert. Il est prêt à recevoir un appel. Si, au contraire, il veut appeler, il appuie sur un bouton qui envoie le courant direct

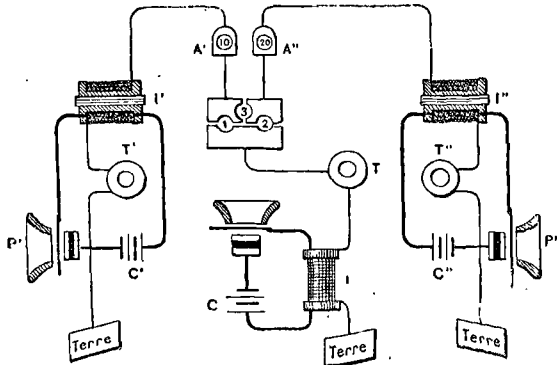


FIG. 164. — Installation des téléphones Edison.

de la pile sur la ligne, et avertit le poste central en faisant tomber le guichet de son numéro (en A' par exemple).

Le seul fait de prendre le téléphone à la main établit *automatiquement* les communications de la figure 164. Les courants induits développés par la parole dans la bobine T' du poste de gauche traversent la ligne, le signal A' qu'ils sont trop faibles pour influencer, et, si on suppose une cheville placée en 1, arrivent au récepteur T du poste central. En mettant la cheville en 2, le poste central communique avec le poste de droite T''. En mettant la cheville en 3, les deux postes extrêmes communiquent directement; et en ajoutant une autre cheville en 1 ou 2, le poste central peut participer à la communication. Quand la conversation est terminée, un des abonnés envoie sur la ligne le courant de sa pile, lequel agit à la fois sur les signaux A' et A'' et prévient ainsi l'employé du poste central

## LIGNES TÉLÉPHONIQUES

L'établissement de ces lignes présente certaines difficultés; car si on a deux lignes dans le voisinage l'une de l'autre, même sur une petite partie du parcours, les courants induits qui se produisent, agissant sur un instrument aussi sensible que le téléphone, font qu'on entend sur l'une des lignes la correspondance échangée par l'autre. Cet effet se fait sentir même sur les lignes aériennes et à des distances de 1 et 2 mètres.

Dans les communications urbaines, où l'on emploie des câbles à plusieurs fils posés en égout, cet inconvénient est très grave; il y a induction mutuelle non seulement entre les fils d'un même câble, mais même d'un câble à l'autre.

Pour détruire cette induction, le seul procédé efficace, c'est d'employer un *fil de retour* : on forme un circuit complet avec deux fils légèrement cordés ensemble (un pas de 10 centimètres est suffisant). Mais alors chaque communication exige deux fils. Un même câble peut d'ailleurs contenir plusieurs circuits, comprenant chacun deux fils cordés. C'est la solution adoptée par la Compagnie Edison.

La Compagnie Gower n'emploie qu'un seul fil par communication, mais chaque fil isolé est revêtu séparément, soit d'une enveloppe de plomb, soit d'une armature protectrice formée d'un fil de fer galvanisé de 1/2 millimètre de diamètre. Ces enveloppes métalliques en communication avec la terre empêchent l'induction *statique* d'un fil à l'autre, mais n'empêchent pas l'*induction dynamique*.

## EMPLOI DU TÉLÉPHONE COMME GALVANOSCOPE

Dans une note à l'Académie des sciences, du 25 mars 1878 (1), M. d'Arsonval cite des expériences prouvant que le téléphone est au moins 100 fois plus sensible que le nerf, qui est considéré, depuis Galvani, comme le réactif le plus sensible de l'électricité. Cette extrême délicatesse du téléphone le rend propre à dénoncer l'existence de courants très faibles et permet de l'employer comme galvanoscope. Mais, comme il ne peut fournir des sons que sous l'action de courants interrompus, il faut que le circuit sur lequel on expérimente soit coupé à certains intervalles, soit à la main, soit à l'aide d'interrupteurs à mouvement d'horlogerie ou autres (diapasons, trembleurs, etc.).

Il n'est même pas nécessaire de mettre le téléphone dans le circuit

(1) *Comptes rendus*, vol. LXXXVI, p. 832.

que l'on veut étudier : il suffit de mettre le téléphone dans un circuit placé parallèlement au premier. On peut augmenter l'action inductrice qui se produit à chaque interruption du circuit principal, en enroulant les deux fils parallèles sur une bobine commune, et mettant un barreau ou des fils de fer doux dans l'axe de cette bobine.

Le téléphone n'indique pas le sens du courant et ne donne qu'une idée vague de son intensité. Mais il peut être utilisé à la place du galvanomètre, dans les méthodes de réduction à zéro, comme dans le pont de Wheatstone; à mesure que l'on approche de l'équilibre, le son baisse graduellement; il cesse d'être perceptible pour se faire entendre de nouveau dès qu'on dépasse le point d'équilibre.

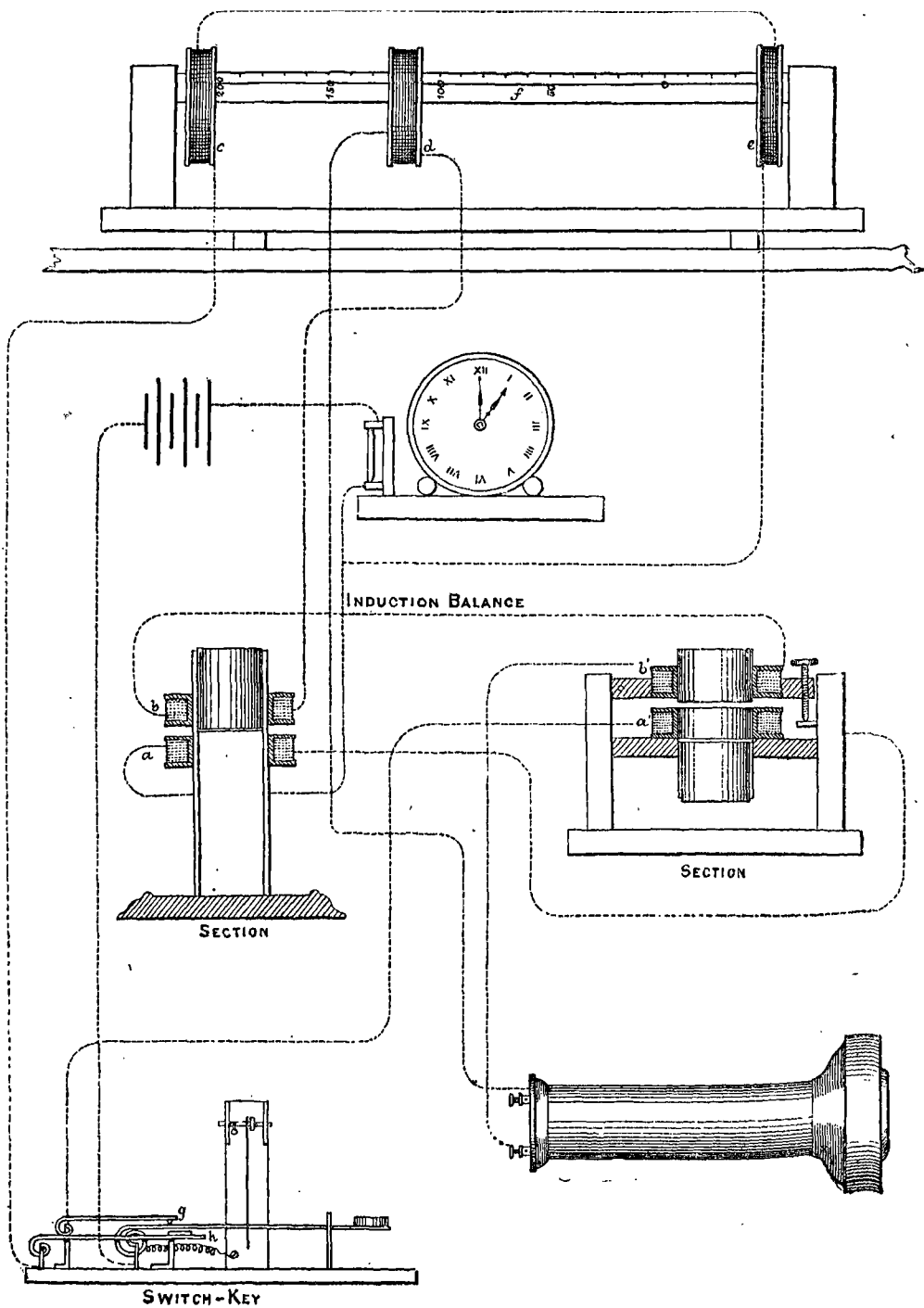
On peut construire également des téléphones à deux fils qu'on emploierait comme des galvanomètres différentiels.

On verra dans la suite de cet ouvrage diverses applications de ce genre, notamment dans la balance d'induction de M. Hughes (chap. xxiv), dans les expériences de M. Warren de la Rue démontrant l'intermittence de la décharge d'une pile dans les tubes à vide (chap. xxxv), et dans celles de M. Spottiswoode sur l'état sensitif de la décharge électrique (chap. xxxvi).

#### MICROTASIMÈTRE OU THERMOSCOPE D'EDISON

M. Edison a appliqué le principe du téléphone à charbon à dénoncer de très petits changements de pression. Le microtasimètre, qu'il a imaginé dans ce but, se compose d'un disque de charbon placé entre deux lames de platine, le tout comprimé par une tige rigide commandée à cet effet par une vis micrométrique. Les moindres variations de la pression font varier la résistance électrique du système; ce dernier forme une branche d'un pont de Wheatstone, et, l'équilibre une fois établi, la variation de la résistance du microtasimètre est révélée par la déviation du galvanomètre. Cet appareil peut être utilisé comme un thermoscope très sensible : il suffit d'approcher la main de la tige qui exerce la pression, pour y produire la dilatation et par suite un changement de pression du charbon qui se traduit par une déviation de l'aiguille galvanométrique.





Pl. XXIV. — Balance d'induction voltaïque de Hughes (*Switch-key* = commutateur).

## CHAPITRE XXIV

### BALANCE D'INDUCTION VOLTAÏQUE DE HUGHES (pl. XXIV)

Dans le printemps de 1879, le professeur Hughes a communiqué à la Société de physique (1) la description d'une *balance d'induction voltaïque*, qu'il avait imaginée dans le but de mesurer la conductibilité de diverses substances pour les courants induits instantanés, et d'étudier *la constitution moléculaire des métaux et alliages*.

Quand deux bobines de fil sont placées près l'une de l'autre, et qu'on envoie à travers l'une d'elles un courant pulsatoire, un certain courant sera induit dans l'autre bobine chaque fois que le courant variera dans la première.

Si on met dans l'intérieur des bobines un noyau métallique, le courant induit produit un accroissement de son dans le téléphone placé dans le circuit, et, en général, cet accroissement est d'autant plus grand que l'on augmente davantage la quantité de métal et que le métal est plus conducteur.

La balance d'induction (pl. XXIV), comprend deux bobines primaires,  $a, a'$ , et deux secondaires,  $b, b'$ .

Les deux bobines  $a, a'$  sont parcourues par le même courant intermittent, et les bobines secondaires sont reliées l'une à l'autre de telle sorte que les courants induits dans chacune d'elles circulent dans des directions opposées, et qu'ils se neutralisent exactement lorsqu'ils sont égaux.

(1) *Phil. Mag.*, juillet 1879, II, p. 50.

Le courant primaire dans  $a, a'$  est fourni par 3 éléments Daniell, et ses pulsations sont produites par un microphone intercalé dans le circuit. Les sons qui excitent le microphone sont produits par le tic-tac d'une horloge.

L'égalité des courants induits est vérifiée au moyen d'un téléphone intercalé dans le circuit commun de  $b$  et de  $b'$ .

Lorsque les courants induits sont égaux, le téléphone reste silencieux, mais la moindre inégalité dans les courants lui fait rendre des sons.

Si deux pièces du même métal, exactement égales, deux shillings neufs par exemple, sont placées respectivement dans l'intérieur des bobines  $a, b, a', b'$ , on ne constatera aucun effet; mais s'il y a la moindre différence entre elles; si, par exemple, l'un des shillings est un peu usé, le téléphone rendra des sons bruyants.

Pour mesurer les différences d'induction produites par différentes pièces de métal, on se sert de la bobine *cursor* (1) figurée au haut de la planche XXIV.

A chaque extrémité d'une barre divisée  $f$ , sont fixées des bobines  $c$  et  $e$ , autour desquelles le courant primaire circule dans des directions opposées. Une troisième bobine  $d$ , mise dans le circuit d'une des bobines secondaires  $b$ , peut glisser le long de cette barre.

Lorsque  $d$  occupe exactement le milieu entre  $c$  et  $e$ , elle ne subit aucun effet, car les actions que  $c$  et  $e$  exercent sur elle s'équilibrent; mais lorsqu'on la rapproche de l'une ou de l'autre, elle devient le siège d'un courant induit qui augmente ou diminue le courant qui passe dans  $b$ , suivant la direction dans laquelle on l'a déplacée.

La distance dont il a fallu déplacer  $d$  du centre pour

(1) Cette partie de l'appareil est appelée par le professeur Hughes un *sonomètre*.



établir la balance, lorsque des pièces égales et semblables de différents métaux étaient placées respectivement en  $a$ ,  $b$  et  $a'$ ,  $b'$ , exprime en unités arbitraires de l'instrument les différences entre les conductibilités instantanées de ces métaux.

L'instrument est si sensible qu'il suffit d'introduire dans une des bobines « 1 milligramme de cuivre, ou un fil de fer fin, plus fin qu'un cheveu humain », pour que le téléphone rende des sons bruyants.

L'inventeur constate qu'il a déjà étudié, avec le secours de cet instrument, « les effets sur les métaux, de la chaleur, du magnétisme, de l'électricité, etc., et des changements mécaniques, tels que tension, torsion et pression », et il se propose « de décrire dans un prochain mémoire les résultats remarquables qu'il a déjà obtenus ».

M. Chandler Roberts (1) a montré qu'on pouvait avec cet instrument essayer la pureté des alliages.

Un alliage or-argent, contenant seulement 13 centigrammes (2 grains) d'or par 373 grammes (1 livre troy) d'argent, se distingue nettement de l'argent pur au moyen de la balance.

L'instrument peut servir à découvrir les mauvaises pièces de monnaie; car si l'on met une bonne pièce d'or dans l'une des bobines, et une mauvaise dans l'autre, le téléphone émet immédiatement des sons.

La hauteur des sons produits dans le téléphone n'est pas la même quand on emploie des métaux différents pour troubler l'équilibre; ainsi le fer donne, « un son sourd et étouffé, et l'acier dur un son extrêmement aigu. »

(1) *Phil. Mag.*, juillet 1879, II, p. 57.

## APPENDICE AU CHAPITRE XXIV

### BALANCE D'INDUCTION ET SONOMÈTRE

Nous complétons ce chapitre par l'extrait suivant de la description de la balance d'induction donnée par M. Bertin, dans les *Annales de chimie et de physique* (1).

#### BALANCE D'INDUCTION

Le sens de l'enroulement du fil dans les deux bobines primaires  $a$  et  $a'$  est tel qu'un courant qui les parcourt tourne dans les deux bobines en sens contraire. Dans la figure, le courant des 3 éléments Daniell est rendu pulsatoire par un microphone et les sons sont produits par une horloge. Dans l'appareil construit à Paris par M. Ducretet, le courant de la pile est interrompu par une roue dentée, mue par un mouvement d'horlogerie. Ce mouvement fait tourner d'une vitesse uniforme la roue dentée, qui communique avec l'un des pôles de la pile, pendant que l'autre pôle est attaché à un petit ressort de platine qui frotte contre les dents de la roue. Quand l'horloge est en mouvement, le courant est successivement ouvert et fermé dans les deux bobines inductrices  $a$  et  $a'$ .

Au-dessus des bobines  $a$  et  $a'$  se trouvent les bobines  $b$  et  $b'$  qui reçoivent les courants induits : elles sont reliées entre elles par un fil, de telle sorte qu'un même courant les parcourrait en tournant dans le même sens. Leurs extrémités libres sont reliées au téléphone. [ On remarquera que la bobine centrale du sonomètre est intercalée aussi dans le circuit du téléphone. ]

Les bobines inductrices  $a$  et  $a'$  étant de sens contraires, les courants induits dans les bobines  $b$  et  $b'$  sont toujours de sens contraires, et le téléphone est silencieux si les deux courants induits sont égaux. Ce silence n'est pas obtenu immédiatement, parce que les bobines ne

(1) Voy. *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, vol. XIX, p. 561, avril 1880.

sont pas identiques; mais on peut toujours y arriver en agissant sur la vis qui éloigne ou rapproche la bobine induite  $b'$  de la bobine inductrice  $a'$ : c'est toujours par là qu'il faut commencer.

On a cherché à rendre égales les deux bobines induites et les deux bobines inductrices; mais il n'est pas nécessaire que les premières soient égales aux secondes. C'est seulement une condition de maximum pour l'induction, qui est toujours proportionnelle au produit des nombres de spires des deux bobines agissant l'une sur l'autre. Les dimensions choisies par M. Hughes sont les suivantes: chaque bobine porte 100 mètres du fil n° 32; elles sont en bois; leur diamètre intérieur est de 3 centimètres, l'extérieur de 5°,5; leur épaisseur est de 1 centimètre, et dans chaque groupe  $ab$ ,  $a'b'$  elles sont séparées par un intervalle de 5 millimètres. Pour que les deux groupes ne puissent pas réagir l'un sur l'autre, l'auteur conseille de les éloigner de 1 mètre; mais on a pu sans inconvénient réduire cette distance à la moitié.

Le *switch-key* de la figure est un commutateur qui permet de mettre successivement en communication, avec la pile, la balance et le sonomètre.

La pile communique avec le levier de la clef; ce levier, dans la position de la figure, est en contact avec le ressort  $g$  relié à la bobine inductrice  $a'$  de la balance; en abaissant la clef, on rompt ce contact et on établit le contact du levier, et par suite de la pile, avec le ressort  $h$  relié à la bobine  $c$  du sonomètre.

M. Hughes s'est proposé d'étudier, à l'aide de la balance, l'influence des masses métalliques sur l'induction, influence qui a fait l'objet de nombreux travaux depuis Arago (1824) jusqu'à Verdet (1851).

On commence par mettre l'horloge en mouvement, et par amener le téléphone au silence en agissant sur la vis de la bobine  $b'$ .

*Expérience 1.* — On place dans les deux groupes de bobines deux godets en bois: si on met dans l'un des godets une pièce de 1 franc, le téléphone deviendra bruyant; une seconde pièce mise dans l'autre groupe ne le fera pas taire, en général, parce que les deux pièces ne sont pas parfaitement égales, soit en poids, soit en titre, soit en température, etc. On reconnaît facilement celle dont l'action est moindre, en en approchant une pièce de 50 centimes fixée normalement à l'extrémité d'une tige de bois. D'un côté elle augmente le bruit du téléphone, de l'autre elle le diminue jusqu'à l'ancêtre: c'est de ce dernier côté que se trouve la pièce la plus faible.

La sensibilité de la balance est telle que, le téléphone étant silencieux parce que les pièces sont égales, il suffit de souffler sur un des godets, ou d'échauffer légèrement une des pièces avec les doigts, pour

que le téléphone se fasse entendre. On reconnaît de même la plus petite différence de titre dans des monnaies égales en apparence.

En opérant successivement avec des disques de même diamètre et de même épaisseur, on constate l'inégale action des divers métaux.

Lé disque, toujours horizontal, étant descendu, à l'aide d'une tige de bois, entre les bobines, on reconnaît que l'action est très variable et qu'elle est maximum, quand le disque est au centre de l'espace libre laissé entre les deux bobines  $a'$  et  $b'$ . Si on relève le disque, le son diminue jusqu'à ce que l'on soit au centre de la surface extérieure de la bobine; puis il augmente si l'on pousse la pièce sur la bobine, et redevient maximum quand le disque est sur le bord extérieur.

Les sons correspondant à chaque métal différent non seulement par leur intensité, mais encore par leur tonalité. Ainsi le fer donne un son étouffé, tandis que l'acier trempé donne des sons très aigus. M. Hughes attribue cette différence entre les métaux à une différence dans la rapidité de leur action inductive.

*Expérience 2.* — Les masses métalliques agissent ici comme les diaphragmes que l'on introduit dans les bobines induites pour affaiblir la tension du courant induit, et ces diaphragmes agissent eux-mêmes comme une bobine intérieure, qui recevrait l'induction si elle était fermée et ne produirait aucun effet si elle était ouverte. Ce sont des phénomènes connus.

Enlevons le godet dans l'un des groupes, et introduisons à sa place une bobine ordinaire, dont les bouts de fil peuvent être à volonté réunis ou séparés : s'ils sont séparés, le téléphone se taira; s'ils sont réunis, il fera entendre un bruit intense.

*Expérience 3.* — Répétons l'expérience avec une bobine plate ou une spirale; l'effet sera le même, si elle est horizontale; mais si elle est verticale, le téléphone sera silencieux, que la bobine soit ouverte ou fermée: c'est que les courants induits ne peuvent pas se produire dans un circuit perpendiculaire au courant inducteur.

*Expérience 4.* — La même chose a lieu avec les disques métalliques. En plaçant une pièce de 1 franc horizontalement sur un des groupes, le téléphone parlera si la pièce est horizontale; il se taira si la pièce est verticale, et fera entendre un son d'intensité variable dans les positions intermédiaires.

*Expérience 5.* — Cette influence de la position du disque peut être facilement constatée sur tous les métaux non magnétiques; mais pour les métaux magnétiques elle s'exerce en sens contraire. En introduisant un disque en fer ou en nickel, l'effet sera très faible si le disque est horizontal; très fort, au contraire, s'il est vertical.

*Expérience 6.* — La même chose aura lieu avec une spirale plate

en fer. L'effet sera très faible si la spirale est horizontale, qu'elle soit ouverte ou fermée, l'induction dans le fer étant faible; le téléphone parlera au contraire très fort si cette spirale est verticale, et il sera encore indifférent de l'ouvrir ou de la fermer.

*Expérience 7.* — C'est que les métaux magnétiques peuvent agir de deux manières : comme diaphragmes, si leur dimension parallèle à l'axe de la bobine est petite, et comme aimants, si cette dimension est grande; Dans le premier cas, ils diminuent l'induction; dans le second cas, ils l'augmentent. Cet antagonisme est mis en évidence par l'expérience suivante.

On introduit un disque en fer horizontalement entre les deux bobines  $a'$  et  $b'$ ; l'effet, qui était faible quand le disque était dans le centre des bobines, devient très intense. On introduit à côté, et cette fois dans l'axe des bobines, un faisceau de fils de fer : le téléphone, qui parlait très haut, parle maintenant tout bas, et on pourrait le faire taire en soulevant un peu le faisceau de fils de fer. Ce faisceau agit donc en sens contraire du disque.

*Expérience 8.* — La balance rend sensibles des variations de magnétisme qui doivent être très faibles. On introduit un fil de fer dans le groupe  $a' b'$ , le téléphone signale sa présence; dans  $ab$  on introduit un fil plus long, que l'on peut tordre avec une manette; tout d'abord, ce dernier n'éteint pas le son produit par le premier; mais il suffit de le tordre légèrement pour que le téléphone redevienne silencieux.

*Expérience 9.* — Ces phénomènes donnent un moyen de mesurer la limite de sensibilité de la balance. L'introduction dans les bobines d'une tige de bois portant à son extrémité un petit fil de fer de 1 millimètre de long et de 0<sup>mm</sup>,1 de diamètre produit dans le téléphone un bruit appréciable. C'est même un moyen de juger de la sensibilité de l'ouïe de l'observateur.

*Expérience 10.* — On prend deux godets en bois, revêtus à l'intérieur d'une couche de terre de pipe, pour pouvoir y mettre des corps chauds. On les place dans les deux groupes de bobines, et l'on y met deux cylindres métalliques choisis de telle sorte que le téléphone reste silencieux; si ensuite on enlève un des cylindres pour le chauffer fortement et qu'on le remette en place, le téléphone parlera, et l'on reconnaîtra que l'action du métal chauffé a diminué si c'est du cuivre et qu'elle a augmenté si c'est un métal magnétique. Dans le premier cas, la conductibilité du métal a diminué, et tout s'explique. Dans le second cas, le métal produisait un double effet, un effet d'aimantation et un effet de diaphragme : tous les deux ont diminué, mais inégalement; la différence peut avoir un signe quelconque.

L'emploi du *sonomètre* permet de mesurer les effets produits.

## SONOMÈTRE ÉLECTRIQUE

Le sonomètre est un inductomètre à trois bobines verticales,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ .

Les deux extrêmes  $c$ ,  $e$ , sont les bobines primaires ou inductrices; elles communiquent entre elles et sont enroulées de manière que le courant les parcourt en sens contraires. Elles sont fixées aux extrémités d'une règle horizontale, sur laquelle court une troisième bobine  $d$  qui est la bobine secondaire ou induite; celle-ci est dans le circuit du téléphone. Ces bobines ne sont pas égales :  $e$  est la plus mince.

On a vu que, quand la clef du commutateur est au repos, la balance est dans le circuit et le sonomètre n'y est pas, et que c'est le contraire lorsqu'on presse sur le bouton de cette clef. Rien n'est donc plus facile que d'entendre alternativement le son de la balance et le son du sonomètre.

Le sonomètre, en effet, produit un son quand le courant interrompu le traverse; les deux bobines inductrices  $c$  et  $e$  donnent des courants induits de sens contraires dans la bobine mobile  $d$ , et ces courants, en passant par le téléphone, changent son état magnétique et le font parler s'ils ne sont pas égaux. Si donc, ayant le téléphone à l'oreille, on fait glisser la bobine  $d$  sur la règle, on trouve une position pour laquelle le téléphone est silencieux. C'est le zéro de la règle. Dans la figure, l'écartement des deux bobines fixes est de 240 millimètres : le zéro est à 40 millimètres de la bobine la plus mince  $e$  et à 200 de la bobine  $c$ . Si on éloigne la bobine  $d$  du zéro, le son reparaît plus ou moins fort et son intensité peut être indiquée par la division à laquelle la bobine est arrêtée.

On a maintenant à comparer tous les métaux sous la forme de disques de mêmes dimensions. On en met un dans un des groupes de la balance : le téléphone donne un son. On presse sur la clef; on entend un autre son produit par le sonomètre, et on le fait varier en déplaçant la bobine mobile  $d$ . En pressant alternativement sur la clef, on entendra successivement les deux sons et on finira par les rendre égaux. La bobine induite sera alors à une certaine division qui mesurera l'effet de métal : 115 pour l'argent, 52 pour le fer, 40 pour le plomb, etc.

M. Hughes a dressé un tableau de ces nombres, que M. Bertin appelle *coefficients d'induction spécifique*, et qu'il compare à d'autres coefficients semblables, obtenus par d'autres méthodes par Babbage, Herschel et Nobili : tous ces nombres ne s'accordent pas entre eux; ils n'ont pas plus de rapport avec la conductibilité électrique des métaux.

« Ces expériences ne sont, en réalité, dit M. Bertin, qu'une application immédiate des lois de l'induction (1).

» On sait que chaque interruption successive du courant inducteur produit deux courants induits, l'un *inverse*, l'autre *direct*, qui sont égaux en quantité et inégaux en *intensité*, ce dernier mot désignant le quotient de la quantité par la durée du courant. Ces deux courants se montreront donc égaux dans tous les appareils qui ne mesurent que la quantité, tels que le galvanomètre et le voltamètre, tandis qu'ils se montreront inégaux dans tous les phénomènes qui dépendent de l'intensité, tels que la commotion, l'étincelle et l'aimantation de l'acier trempé. C'est ce dernier phénomène que l'on observe avec le téléphone, dont le bruit est le résultat du changement de magnétisme de l'aimant, qui lui sert de noyau, par le courant induit qui circule autour de cet aimant. On peut s'assurer que le téléphone est sensible aux deux courants induits, mais qu'il parle beaucoup plus fort quand il reçoit le courant direct, celui qui correspond à la rupture du circuit inducteur. Si le téléphone reçoit à la fois les courants induits dans deux bobines de sens contraires, c'est comme s'il ne recevait que leur différence, et il restera silencieux quand les deux courants seront égaux.

» L'introduction d'une bobine fermée dans la bobine induite produit un effet bien connu. Elle augmente la durée de l'induction et par conséquent diminue l'intensité du courant induit; son action sur le téléphone sera donc affaibli. Le résultat sera le même si l'on remplace la bobine par une masse métallique dans laquelle puissent se développer des courants induits. Cette masse, qu'on appelle *diaphragme*, pourra avoir une forme quelconque, pourvu que ses dimensions parallèles à l'axe de la bobine ne soient pas trop petites. L'induction paraît devoir être d'autant plus facile que le corps est plus conducteur; mais elle doit dépendre d'autre chose que de la conductibilité mesurée dans des fils.

» Mais si le corps introduit dans la bobine est magnétique; si c'est du fer, par exemple, les résultats seront bien différents. Le fer s'aimante par le passage du courant, et cette aimantation augmente l'induction tout entière, aussi bien la quantité que l'intensité. Tous les effets sont donc augmentés, aussi bien les effets galvanométriques que les effets téléphoniques. Seulement, si le fer agit comme aimant, il agit aussi comme diaphragme métallique; de là une complication que l'on fait disparaître en remplaçant le noyau en fer par un faisceau de fils de fer. »

(1) Voir chap. XXIX.

## CHAPITRE XXV

### DÉTERMINATION DE L'INDUCTION ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE

Nous avons établi, dans le chapitre XXII, que, « si un fil conducteur se meut dans le voisinage d'un pôle magnétique, dans une direction quelconque, sauf le long d'une ligne de force, il se développe à ses extrémités une différence de potentiel qui peut, dans certaines circonstances, produire un courant ».

Nous savons qu'on augmentera la force électromotrice en déplaçant le fil plus rapidement, ou en augmentant l'intensité d'aimantation.

Supposons que l'on ait tracé les lignes de force magnétique dans la région à travers laquelle se meut le fil, et exprimons l'intensité d'aimantation, sur une certaine surface perpendiculaire aux lignes de force, par le nombre de ces lignes qui passent à travers un centimètre carré de cette surface.

On exprimera que l'intensité d'aimantation d'une surface est égale à l'unité, en traçant une ligne de force à travers chaque centimètre carré de cette surface.

Nous voyons alors que si un fil rectiligne est animé d'un mouvement de translation uniforme dans le champ, la différence de potentiel produite à ses extrémités sera en rapport constant avec le nombre de lignes de force que le conducteur coupe dans une seconde.

Car le nombre de lignes de force qui passe par chaque



centimètre carré augmentera si l'on accroît la force magnétique; et si l'on augmente la vitesse du fil, le nombre de centimètres sur lesquels il passe dans une seconde augmentera également. En choisissant convenablement nos unités (comme on l'a indiqué dans le système C. G. S.), on peut faire de ce rapport constant un rapport d'égalité, et nous pouvons établir la proposition suivante :

*Si un fil rectiligne se meut uniformément dans un champ magnétique, il se produira à ses extrémités une différence de potentiel qui sera numériquement et algébriquement égale au nombre de lignes de force coupées dans une seconde, en se rappelant que les lignes de force coupées dans une direction sont comptées +, et que les mêmes lignes coupées par le fil animé d'un mouvement dans la direction opposée sont comptées —.*

Si le fil n'est pas rectiligne, la différence de potentiel à ses extrémités sera la même que celle qui se développerait aux extrémités d'un fil rectiligne dont les extrémités coïncideraient avec celles du fil courbe.

*Corollaire.* — Il n'y aura pas de courant produit dans un fil formant un circuit fermé qui se déplace parallèlement à lui-même, si le champ est uniforme dans toute l'étendue du circuit (1).

Si le fil ne se déplace pas d'un mouvement uniforme, mais qu'il soit animé d'une vitesse variable, la différence de potentiel de ses extrémités, à un instant donné, sera égale au nombre de lignes de force qu'il couperait s'il se déplaçait d'un mouvement uniforme pendant une seconde

(1) Soient A et B les potentiels aux deux extrémités d'un fil courbe, et  $A > B$ , il y aura courant se dirigeant de A vers B. Si les deux points sont reliés aussi par un fil droit, il y aura encore dans celui-ci un courant de A vers B. Les courants étant dirigés de A vers B dans les deux fils se détruiront dans le circuit fermé constitué par les deux fils. J. R.

avec la vitesse qu'il a à ce moment, et dans un champ dont l'intensité continuerait à être égale à celle du champ actuel à l'instant considéré.

On examinera plus loin certains cas de mouvement rotatoire.

Si le fil se meut dans une direction perpendiculaire aux lignes de force, le nombre de lignes de force qu'il coupera, en parcourant une distance donnée, sera plus grand que s'il se déplaçait dans une direction plus rapprochée de la parallèle à ces lignes; et s'il se meut le long de ces lignes, il n'en coupera aucune, et il n'y aura pas de différence de potentiel produite (1).

Si les extrémités du fil sont reliées par un autre fil qui ne soit pas en mouvement, comme, par exemple, si le fil glisse sur deux rails fixes reliés ensemble à un bout, un courant traversera le système.

---

## NOTES

### FORCE ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE

Lorsqu'un conducteur droit parcouru par un courant se meut dans un champ magnétique uniforme, il subit en tous ses points l'action d'une force perpendiculaire au plan passant par sa propre direction et par celle des lignes de force. Cette force  $F$  est égale au produit de la longueur  $L$  du conducteur par l'intensité  $C$  du courant, par l'intensité  $H$  du champ magnétique, et par le sinus de l'angle  $\alpha$  que la direction du courant fait avec les lignes de force :  $F = HCL \sin \alpha$ .

(1) Le rapport de la différence de potentiel produite quand le fil se meut dans un plan quelconque, à celle qui serait produite s'il se mouvait dans un plan perpendiculaire aux lignes de force, est exprimé par le cosinus de l'angle des deux plans.

## FORCE ÉLECTROMOTRICE D'INDUCTION

Si un conducteur perpendiculaire aux lignes de force du champ se meut dans la direction de la force magnétique (laquelle est normale aux lignes du champ et au conducteur), ou dans une direction opposée, son mouvement sera aidé par cette force, ou, au contraire, cette force s'opposera à son mouvement. Dans ce dernier cas, il faudra, pour la vaincre, dépenser une quantité de travail mesurée par le produit de la force par le chemin parcouru. Si le conducteur se meut avec une vitesse uniforme  $V$ , le chemin parcouru dans le temps  $t$  sera  $Vt$  et le travail  $FVt = HCLVt$ .

L'expérience montre que ce travail est représenté par une diminution dans le premier cas, par un accroissement dans le second, du courant préexistant dans le conducteur; ou, s'il n'y a pas de courant préexistant, par la production, dans chaque cas, d'un courant dont le sens est déterminé par la condition que la force électro-magnétique qui en résulte tende à s'opposer au mouvement (loi de Lenz, chap. XXIX).

Or le travail d'un courant est égal à  $EQ$  ou à  $ECt$ . Si donc  $E$  est la force électromotrice d'induction,  $C$  la variation d'intensité produite, on a :

$$HCLVt = ECt$$

ou

$$E = HLV.$$

Si le conducteur  $L$  est oblique par rapport aux lignes de force, on le remplace par sa projection  $L \sin \alpha$  sur une perpendiculaire à ces lignes. Enfin, si le mouvement est oblique par rapport à ces mêmes lignes, on prend la composante  $Vt \cos \theta$  du déplacement  $Vt$  suivant la direction de la force électro-magnétique.

On a alors :

$$HCLVt \sin \alpha \cos \theta = ECt$$

d'où

$$E = HLV \sin \alpha \cos \theta.$$

Si  $H = 1$ ,  $L = 1$ ,  $V = 1$ ,  $\alpha = 90^\circ$  et  $\theta = 0$ , on a :  $E = 1$ . C'est une nouvelle définition de l'unité de force électromotrice.

Considérons deux rails horizontaux (fig. 152), situés l'un au-dessus de l'autre dans la direction ouest est, c'est-à-dire normalement aux lignes de force (sud-nord) de la composante horizontale de la terre. Ils sont reliés à gauche par une traverse conductrice fixe, et à droite

par une traverse mobile de longueur  $L$ . Si celle-ci se déplace vers la gauche du papier, d'un mouvement uniforme et avec une vitesse  $V$ , la force électro-motrice d'induction sera  $HLV$ . Or ce produit est égal au nombre de lignes de force que le conducteur mobile coupe dans l'unité de temps. Si  $N$  est le nombre de ces lignes coupées dans le temps  $t$ , la force électromotrice sera  $\frac{N}{t}$ ; si le mouvement est en sens inverse, elle sera égale à  $-\frac{N}{t}$ .

J. R.

## CHAPITRE XXVI

### UNITÉ DE RÉSISTANCE DE L'ASSOCIATION BRITANNIQUE

Nous avons établi une relation entre le mouvement d'un fil dans un champ magnétique et la force électromotrice à ses extrémités.

L'intensité du courant dans le fil est, on le sait, le quotient de la force électromotrice par la résistance.

L'unité absolue électro-magnétique de résistance est la résistance qui satisfait à la loi de Ohm, lorsque la force électromotrice est égale à l'intensité du courant, ces deux grandeurs étant exprimées en mesure électro-magnétique; car, dans l'équation

$$E = Cr,$$

si l'on fait  $C = E$ , il en résulte la condition  $r = 1$ .

Si un fil, dont les extrémités sont reliées par un fil au repos et sans résistance, se meut dans un champ magnétique, de telle sorte que le nombre des lignes de force qu'il coupe dans une seconde soit égal au courant engendré, la résistance de ce fil sera l'unité. Si on mesure le courant par la déviation d'une aiguille dans le même champ magnétique, on peut déterminer l'égalité du potentiel et de l'intensité du courant, sans qu'il soit nécessaire de connaître l'intensité de l'aimantation du champ; car on va voir que cette quantité disparaît, comme facteur commun, dans les deux membres de l'équation. Pour les

déterminations dont nous nous occupons, le magnétisme terrestre nous fournit un champ dont l'intensité est uniforme sur une étendue suffisamment grande.

#### RAILS ET CURSEUR

Revenons à notre système de rails (p. 582). La méthode que nous avons décrite ne pourrait pas être appliquée; elle est donnée à titre d'explication, et c'est une modification de cette méthode qu'on emploie dans l'expérience.

Supposons que la traverse fixe réunissant les deux rails soit courbée en arc de cercle (fig. 165), et supposons les rails distants l'un de l'autre de 1 centimètre et situés dans le même plan vertical.

Pour simplifier le calcul, admettons que ce plan soit le plan magnétique E. et O.

Faisons mouvoir sur les rails, à la vitesse de 1 centimètre par seconde, c'est-à-dire avec l'unité de vitesse, un



FIG. 165.

fil rectiligne vertical dont on puisse faire varier la résistance.

Supposons que l'arc et les rails n'aient pas de résistance.

Au centre de l'arc que, pour plus de simplicité, nous supposerons être un demi-cercle dont le plan est à angles droits avec celui des rails, c'est-à-dire vertical et dans la direction magnétique N. et S., suspendons une petite aiguille. L'arc et l'aiguille constitueront alors un galvano-

mètre des tangentes; seulement, comme nous n'avons que la moitié d'un anneau, son équation deviendra :

$$C = H \operatorname{tang} \delta \frac{\alpha}{\pi}, \quad (1)$$

ou, comme  $2\alpha = 1$  centimètre,

$$C = H \operatorname{tang} \delta \frac{1}{2\pi}. \quad (2)$$

La longueur du curseur étant l'unité, le nombre de lignes qu'il coupe par seconde sera égal au produit de sa vitesse par la composante horizontale du magnétisme terrestre.

Lorsque le curseur se meut, la différence de potentiel produite à ses extrémités est égale à

force horizontale de la terre  $\times$  vitesse du curseur.

Il n'y a pas d'autre résistance dans le circuit que celle du curseur. L'intensité du courant engendré dans le circuit est, d'après la loi de Ohm,

$$C = \frac{\text{force horizontale de la terre} \times \text{vitesse du curseur}}{\text{résistance du curseur}}.$$

Ce courant tend à dévier l'aiguille avec une certaine force. La force magnétique de la terre tend à la ramener en arrière, et les moments des deux couples opposés varient avec l'angle de déviation. Lorsque l'aiguille arrive au repos, les couples sont égaux.

Si l'aiguille est au repos à  $45^\circ$ ,  $\operatorname{tang} \delta = 1$ , et l'équation (2) devient :

$$C = \frac{1}{2\pi} H. \quad (3)$$

Nous avons donc, lorsque l'aiguille est à  $45$  degrés,

force horizontale de la terre  $= 2\pi$  fois le courant;

c'est-à-dire

$$\text{force horizontale de la terre} = 2\pi \frac{\text{force horizontale de la terre} \times \text{vitesse du curseur}}{\text{résistance du curseur}}.$$

Divisons les deux membres de cette équation par la force horizontale de la terre, et nous avons :

$$1 = 2\pi \frac{\text{vitesse du curseur}}{\text{résistance du curseur}}.$$

Multiplions les deux membres par la résistance du curseur, et nous avons :

$$\text{résistance du curseur} = 2\pi \text{ fois la vitesse du curseur.}$$

On voit que ce résultat est indépendant de l'intensité de la force de la terre.

*L'unité de résistance est alors la résistance du fil qui, employé comme curseur pour relier les deux rails déjà mentionnés, devrait glisser avec une vitesse de  $\frac{1}{2\pi}$  centimètres par seconde, pour dévier de 45 degrés une aiguille au centre du demi-anneau.*

C'est l'unité absolue électro-magnétique. Mais ses dimensions sont beaucoup trop petites; c'est pourquoi l'unité B. A. ou « ohm » est définie comme égale à  $10^9$  (1000 millions) unités absolues électro-magnétiques.

Un mille (1609 mètres) de fil de cuivre pur, n° 16 de la jauge, a une résistance d'environ 13,7 U. B. A.

#### MÉTHODES PRATIQUES

Examinons maintenant les méthodes qui ont servi à la détermination pratique de l'unité.



Il est évident qu'on ne peut pas appliquer la combinaison des rails et du curseur. Examinons comment on peut la modifier de manière à rendre l'expérience possible.

Il faut d'abord substituer le mouvement circulaire au mouvement rectiligne, afin que l'appareil conserve la même place pendant l'opération. Il faut ensuite se passer des rails et du barreau qui les relie. Rappelons que si notre curseur a une résistance d'une unité B. A. seulement, on doit, pour avoir une déviation de  $45^\circ$ , développer une vitesse de  $\frac{1}{2\pi}$  1000 millions de centimètres, soit à peu près 1000 milles (1609 kilomètres) par seconde.

#### DEMI-CERCLE TOURNANT

Plaçons un fil demi-circulaire, reposant sur des pivots en A et B, dans une position telle que son diamètre soit

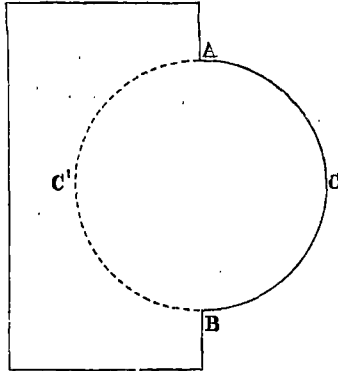


FIG. 466. — Elévation

vertical et que son plan coïncide avec une surface équipotentielle de la composante horizontale de la terre, c'est-

à-dire avec le plan magnétique E. et O.; faisons-le tourner autour de son diamètre d'une demi-révolution dans une seconde, c'est-à-dire de telle sorte qu'au bout de la seconde il soit dans la position indiquée par les lignes ponctuées; il aura décrit une hémisphère dont la projection sur un plan perpendiculaire aux lignes de force (le plan du papier) sera le cercle ACBC'.

Le nombre de lignes de force coupées pendant la première seconde est alors le nombre de ces lignes qui traversent le cercle.

Si on continue la rotation dans la même direction, l'autre

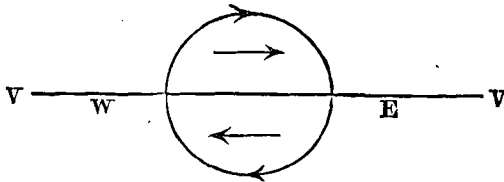


FIG. 167. — Plan (W, E = Ouest, Est).

hémisphère sera décrit dans la deuxième seconde. Le nombre des lignes de force coupées sera le même que tout à l'heure; mais comme pendant la première seconde le fil se mouvait de l'est à l'ouest, et qu'il se meut, pendant la deuxième, de l'ouest à l'est (fig. 167), la force électromotrice, quoique numériquement la même, sera algébriquement opposée; et si la première est regardée comme  $+$ , la seconde sera comme  $-$ .

Alors, pendant la première demi-révolution, le courant induit est dirigé vers le bas (1), et dans la seconde demi-révolution, le courant induit est égal et de sens contraire

(1) Voir vol. I, p. 582.

au précédent, c'est-à-dire dirigé vers le haut. En suspendant une petite aiguille au centre, l'anneau tournant devient son propre galvanomètre. A l'instant même où le

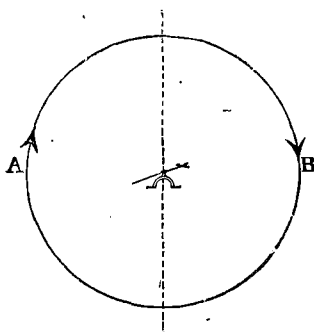


Fig. 168.

courant change de sens, la position du fil par rapport à l'aimant suspendu à son centre est également renversée, en sorte que le courant tendra toujours à dévier l'aimant dans la même direction.

Car, soit AB (fig. 168) une section verticale d'un galvanomètre ordinaire des tangentes, et considérons séparément deux demi-cercles séparés par un diamètre vertical. Le courant en A est alors dirigé vers le haut, et le courant en B vers le bas; tous deux tendent à dévier l'aiguille dans la même direction, et les deux moitiés de l'anneau fixe sont exactement dans le même état que le demi-cercle tournant dans ses deux positions.

#### ANNEAU TOURNANT

Nous avons supposé jusqu'ici que le courant du demi-cercle avait son circuit complété par les supports. Ce n'est pas nécessaire; car si on donne au fil tournant la forme

d'un cercle complet, chaque moitié complète le circuit de l'autre, et on double l'effet sur l'aiguille. Afin d'augmenter encore l'effet sur l'aiguille, l'anneau simple, dans les mesures réelles, est remplacé par une bobine d'un nombre de tours connu et très grand. Tel était l'appareil employé pour la détermination de l'unité absolue de résistance par le comité de l'Association britannique, chargé du rapport sur les étalons électriques en 1861.

#### RAPPORT DU COMITÉ

Les membres suivants du comité désigné par l'Association britannique ont publié, en 1863, la description d'une « mesure expérimentale de résistance électrique, faite au King's College de Londres (1) », à laquelle sont empruntées les pages suivantes.

Membres du comité : le professeur J. Clerk Maxwell, MM. Balfour Stuart et Fleeming Jenkin.

La description de l'appareil qui est citée est de M. Fleeming Jenkin.

Les expériences ont été faites en juin 1863. Nous devons dire tout d'abord que lorsque l'anneau tourne avec une vitesse uniforme, la déviation de l'aiguille est parfaitement fixe; car, bien que la force exercée sur l'aiguille ne soit pas la même aux différents points de la révolution, cependant, les variations étant périodiques, et ayant une période très courte (vu la grande vitesse de rotation), la force sur l'aiguille est toujours sensiblement égale à la force moyenne.

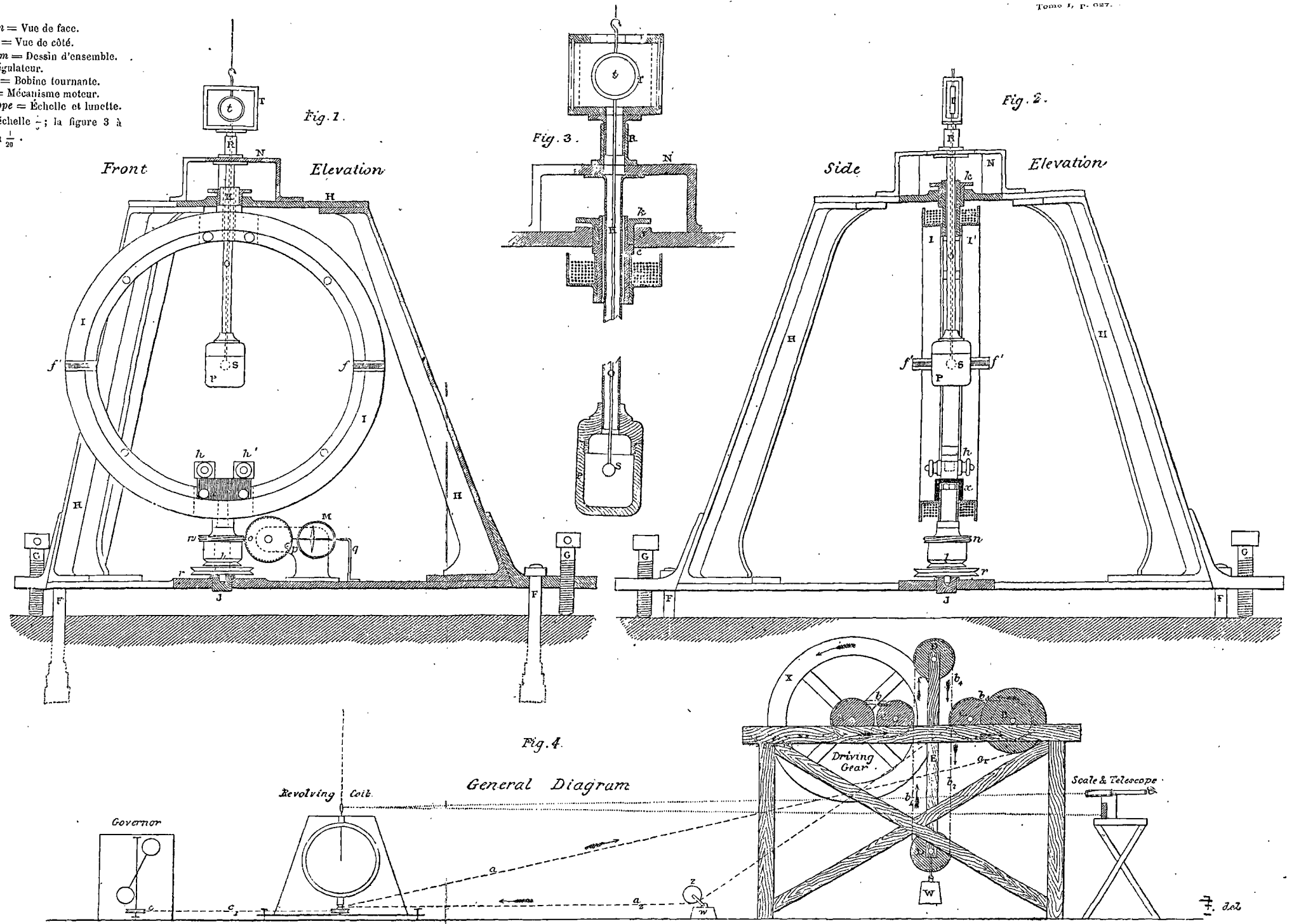
La seconde partie du rapport décrit les méthodes em-

(1) *Reports on Electrical Standards*, p. 97, edited by prof. Fleeming Jenkin, F. R. S. (Spon, 1873).



FIG. 1. — *Front Elevation* = Vue de face.  
 FIG. 2. — *Side Elevation* = Vue de côté.  
 FIG. 4. — *General diagram* = Dessin d'ensemble.  
*Governor* = Régulateur.  
*Revolving Coil* = Bobine tournante.  
*Driving Gear* = Mécanisme moteur.  
*Scale et Telescope* = Échelle et lunette.

Les figures 1 et 2 sont à l'échelle  $\frac{1}{2}$ ; la figure 3 à l'échelle  $\frac{1}{5}$ , et la figure 4 au  $\frac{1}{20}$ .



PL. XXV. — Appareil d'induction pour la détermination de l'unité B. A.

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

ployées pour la construction de bobines de résistance égales à la bobine tournante.

Commençons par la

#### DESCRIPTION DES APPAREILS (pl. XXV)

« Pour la commodité de la description, l'appareil avec lequel les expériences ont été faites est divisé en cinq parties : 1° le mécanisme moteur; 2° la bobine tournante; 3° le régulateur; 4° l'échelle et sa lunette, servant à lire les déviations de l'aimant; 5° la balance électrique, à l'aide de laquelle la résistance de la bobine de fil de cuivre a été comparée à un étalon arbitraire de maillechort.

» La planche XXV montre la disposition générale des quatre premières parties. »

#### LE MÉCANISME MOTEUR (DRIVING GEAR)

« Le *mécanisme d'entraînement* (fig. 4) se compose d'un lourd volant X, monté sur un arbre A qu'on fait tourner à la main, et communiquant son mouvement par une courroie  $bb_1b_2\dots$ , disposée d'une façon analogue au système d'Huyghens, à un arbre B, sur lequel est montée une poulie qui entraîne la bobine tournante par une simple courroie  $aa_1a_2$ . A l'inspection du diagramme, on comprend facilement l'arrangement de la courroie  $bb_1b_2\dots$  qui communique le mouvement de l'arbre A à l'arbre B. C, C sont deux poulies-guides folles sur des essieux fixés au bâti principal. D, D sont deux poulies folles maintenues à une distance constante par la bielle E, à laquelle est suspendu le poids W.

» Lorsqu'une résistance suffisante s'oppose à la rotation de l'arbre B, la rotation du volant dans la direction de la flèche a pour effet de soulever de terre le poids W, ten-

dant ainsi à faire tourner l'arbre C avec une force définie qui reste sensiblement constante, tant que le poids W ne touche pas terre et que la courroie  $bb_1b_2\dots$  conserve la même longueur. Quand la résistance augmente avec la vitesse de rotation, comme dans les expériences présentes, on peut aisément régler à la main la vitesse de la roue conductrice, de façon à empêcher le poids de tomber assez bas pour toucher terre et de monter assez haut pour gêner le mécanisme; et alors, avec un peu de soin, on obtient une force constante appliquée à l'arbre B et à toute la machine qu'il conduit. »

#### LA BOBINE TOURNANTE

« La bobine tournante (1) forme la partie la plus importante de l'appareil : elle est représentée à l'échelle de  $\frac{1}{3}$  dans les figures 1 et 2 (pl. XXV).

» Un fort massif de laiton HH est traversé à sa partie inférieure par trois boulons de laiton F, F, F, scellés dans une lourde pierre. Il peut être nivelé avec soin par trois grosses vis calantés, G, G, G.

» Les anneaux de laiton I, I, sur lesquels est enroulé le fil de cuivre isolé, reposent sur le massif par un pivot J, fait en bois dur, et par un support creux K en laiton (fig. 1); ce support est encastré dans une sorte de boîte à étoupe  $k$  (fig. 2 et 3), qui, à l'aide de trois vis et d'une rondelle plate formant ressort, placée entre lui et le massif en J, peut être ajustée de façon à maintenir très soigneusement le collier  $e$ , qui empêche toute tendance à l'arrêt ou à l'ébranlement. Ainsi supportée, la bobine tourne avec la plus grande aisance et la plus grande régularité.

(1) Actuellement déposée au laboratoire Cavendish, à Cambridge.



» La bobine de fil de cuivre est nécessairement divisée en deux parties enroulées sur les anneaux I, I', afin de laisser le passage de la suspension de l'aimant S.

» Les deux anneaux de laiton sont formés chacun de deux moitiés distinctes, isolées l'une de l'autre par de la vulcanite à leurs jonctions en  $ff'$ . Cette séparation isolante est nécessaire pour empêcher la production de courants d'induction dans les anneaux de laiton.

» Ces anneaux, une fois réunis ensemble, ont été tournés très soigneusement par MM. Elliott frères. Le fil de cuivre isolé était enroulé dans le même sens sur les deux anneaux; l'extrémité intérieure du second était soudée au bout extérieur du premier; les deux bouts extrêmes du conducteur ainsi formé étaient soudés à deux bornes de cuivre  $hh'$  isolées par une pièce de vulcanite  $x$  fixée sur les anneaux de laiton. Chaque borne était munie d'une forte vis de serrage en cuivre, et pourvue d'une coupe à mercure creusée dans sa surface supérieure. Les deux bobines pouvaient être reliées, de manière à former un circuit fermé, par un barreau de cuivre entre les deux bornes-vis. Le barreau, les bornes-vis et les écrous étaient amalgamés, afin d'assurer un bon contact. Lorsque les fils de cuivre étaient réunis à la balance électrique, on enlevait le barreau court de cuivre, et les communications nécessaires étaient établies à l'aide de tiges courtes de cuivre de 6 millimètres de diamètre, plongeant par une de leurs extrémités dans la coupe à mercure des bornes, et par l'autre dans les coupes à mercure de la balance électrique.

» On vérifiait à diverses reprises, par expérience, l'absence de tout courant induit de nature à influencer l'aimant suspendu, lorsque le circuit était interrompu en  $hh'$ .

» La rotation était communiquée aux bobines par une

corde de boyau faisant simplement un demi-tour sur la gorge de la petite poulie  $l$ . La corde pouvait être tendue à volonté par le galet  $z$  et le poids  $w$  (fig. 4).

» Une seconde poulie à gorge  $r$  servait à la courroie  $cc_1$ , qui communiquait le mouvement à un régulateur qui contrôlait la vitesse. »

#### LE COMPTEUR

« Une vis courte  $n$ , d'un grand diamètre, engrenant dans une roue dentée de 100 dents  $o$ , formait le compteur, qui faisait connaître la vitesse de rotation de la façon suivante : Un taquet  $p$ , sur la roue  $o$ , soulevait, à chaque passage, le ressort  $q$ ; ce ressort, en retombant, frappait le gong  $M$ . Le coup était évidemment répété tous les 100 tours, et on observait au chronomètre l'intervalle des coups. L'arrangement se prêtait également à une rotation en sens inverse. »

#### L'AIMANT SUSPENDU

« La figure 3 montre plus clairement la façon dont l'aimant suspendu est introduit au centre de la bobine. Un trépied de laiton  $N$ , fixé sur le massif principal, supporte le long tube de laiton  $O$  qui traverse librement le support creux  $k$ . L'extrémité inférieure du tube  $O$  porte une boîte cylindrique en bois  $P$ .

» L'aimant est suspendu dans l'intérieur de cette boîte, dont la partie inférieure peut s'enlever pour vérifier la position exacte de l'aimant. Sur le support  $N$  repose aussi un tube court de laiton  $R$ , dans lequel glisse un petit tube qui porte la cage de verre  $T$ . Le miroir  $t$ , attaché à l'aimant  $S$  par un fil de laiton rigide, est suspendu dans cette cage de verre par un fil de cocon d'environ 2<sup>m</sup>,15 de long.

Ce fil était protégé contre les courants d'air par une cage de bois (non figurée dans le dessin), descendant depuis le point de suspension jusqu'à la cage de verre. Une petite enveloppe de papier, formant le prolongement de la cage de bois et reposant par le bas sur le massif principal, mettait cette cage sensiblement à l'abri du vent. Une ouverture pratiquée dans la cage permettait de voir le miroir. Le fil de suspension était fixé par son extrémité supérieure dans une tête de torsion permettant de le faire tourner : on pouvait l'élever ou l'abaisser à l'aide d'un petit treuil, et à l'aide de trois vis de position on ajustait le système dans un plan horizontal. Les précautions prises pour suspendre l'aimant et le protéger à la fois contre les courants d'air et les vibrations ont réussi ; car l'image de l'échelle réfléchie dans le miroir était aussi nette et aussi fixe lorsque la bobine faisait 400 tours par minute que lorsqu'elle était au repos. Le régulateur employé avait été prêté par un membre du comité, et maintenait la vitesse si régulière qu'on observait les déviations avec autant de précision que le zéro. »

#### L'ÉCHELLE ET LA LUNETTE

« L'échelle (1) et la lunette n'exigent pas de description spéciale. Elles étaient disposées comme on le fait d'habitude dans les expériences de ce genre, à 3 mètres environ du miroir. On avait une échelle de papier divisée à la machine et clouée sur une règle de bois. Ce système sera changé dans les expériences ultérieures, car l'échelle était sensiblement influencée quand le temps changeait. »

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

## LA BALANCE ÉLECTRIQUE

« Le diagramme ci-joint (fig. 169) montre la balance électrique qui servait à comparer la résistance de la bobine tournante I' (pl. XXV), R (fig. 169), avec la résistance d'un étalon arbitraire de maillechort S, avant et après chaque expérience de rotation. L'arrangement est une modification de la balance ordinaire de Wheatstone (1). A et

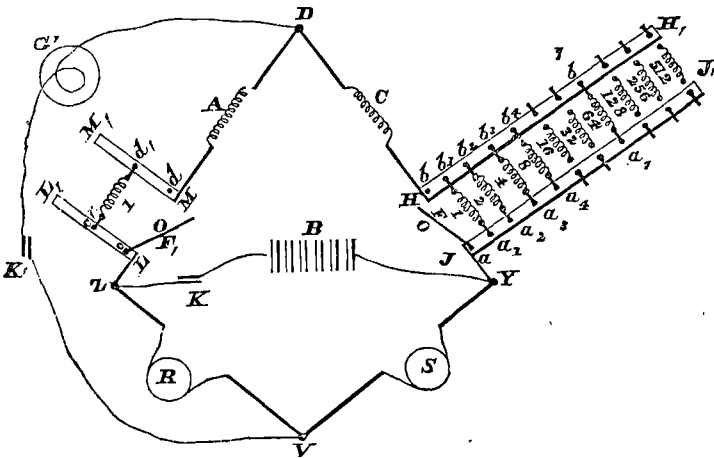


FIG. 169.

C représentent les branches de la balance, S l'étalon de maillechort, et R la bobine de fil de cuivre à mesurer (2). JJ<sub>1</sub>, HH<sub>1</sub>, MM<sub>1</sub> et LL<sub>1</sub>, sont quatre grosses barres de cuivre

(1) Vol. I, chap. XXI.

(2) Pour comparer la figure 169 à la figure 121, remarquer que dans la figure 169

A	correspond à	S
C	—	s
R	—	R
S	—	x.

avec des coupes à mercure  $aa_1a_2$ ,  $bb_1b_2$ ,  $cc_1$  et  $dd_1$ . Deux tiges courtes en cuivre F et F<sub>1</sub> servent à relier  $a$  avec  $b$  et  $c$  avec  $d$ . Quand ces communications sont établies, l'arrangement est exactement celui de la balance de Wheatstone (p. 527), avec des clefs en K et K'. A et C sont des bobines formées d'environ 7<sup>m</sup>,50 de fil de maillechort n° 31 (1); elles sont réglées à l'égalité avec un soin extrême, et chacune d'elles est prise comme représentant 100 unités arbitraires.

» S'il arrivait que R fût exactement égal à S, le galvanomètre G ne serait pas affecté en abaissant les clefs KK', lorsque  $a$  est relié à  $b$  et  $c$  à  $d$  par les tiges F et F<sub>1</sub>, qui n'ont pas de résistance sensible.

» Cette égalité parfaite de R et de S ne peut jamais être obtenue, parce que de légers changements dans la température affectent les deux bobines d'une façon très différente. Les modifications introduites ont pour objet d'amener S et R à ne différer que d'une petite quantité, qu'on mesure avec une grande précision.

» Dans ce but, on ajuste un certain nombre de bobines de maillechort, de façon à ce qu'elles représentent 1, 2, 4, 8, ... 512 unités arbitraires égales à la centième partie de A ou C. On donne à ces bobines une disposition qui permet d'introduire une quelconque d'entre elles entre les barres III<sub>1</sub> et JJ<sub>1</sub>.

» Une bobine unique, égale à une de ces mêmes unités arbitraires, peut être introduite entre les barres LL<sub>1</sub> et MM<sub>1</sub>. Le diagramme montre cette bobine dans sa position, et la tige F<sub>1</sub> retirée. On retire de même la tige F d'entre II et J, et la bobine 1 relie  $a$  et  $b$  dans les barres III<sub>1</sub> et JJ<sub>1</sub>. Si on

(1) Diamètre = 0<sup>mm</sup>,25.

ne place pas d'autres bobines entre  $HH_1$  et  $JJ_1$ , les bras de la balance seraient alors respectivement 101 et 101 au lieu de 100 et 100; mais leur rapport serait encore celui de l'égalité. Supposons maintenant que, le circuit de la pile étant fermé, le galvanomètre montre par sa déviation que  $R$  est plus grand que  $S$ , on peut réduire la résistance du bras entre  $D$  et  $Y$  par petites quantités variables, graduées et définies, en intercalant les bobines 2, 4, 8, etc. entre  $HH_1$  et  $JJ_1$ . Introduisons d'abord la bobine 2. La résistance entre  $H$  et  $J$  sera la réciproque ou l'inverse de 1,5 ou 0,6667; car si l'on ajoute diverses résistances en arc multiple, la résistance (1) de l'arc composé est l'inverse de la somme de leurs pouvoirs conducteurs, et le pouvoir conducteur d'un fil est l'inverse de sa résistance. Le rapport des deux bras sera donc celui de 101 à 100 : 6667. Supposons qu'en complétant le circuit le galvanomètre dévie encore dans la même direction; le bras entre  $D$  et  $Y$  doit être encore réduit en intercalant de nouvelles bobines entre  $HH_1$  et  $JJ_1$ . On trouve facilement par tâtonnements la combinaison qui maintient le galvanomètre au zéro quand on ferme le circuit. Admettons, comme le représente le diagramme, que les bobines intercalées soient 1, 2, 4, 8 et 64. Les réciproques de ces nombres sont 1; 0,5; 0,25; 0,125 et 0,015625. Le pouvoir conducteur des résistances qui relient  $H$  et  $J$  est donc 1,890625, somme de ces nombres. La résistance entre  $H$  et  $J$  est 0,52893, réciproque de ce dernier nombre, et le rapport des deux bras sera 101 : 100 52893. Un peu de réflexion montrera qu'avec des bobines ayant les résistances indiquées, on peut obtenir un rapport quelconque compris entre ceux de 101 à 100,5 et de

(1) Vol. I, p. 551.

101 à 101, par degrés ne dépassant pas 0,00195, réciproque de 512, qui est la plus grande bobine de résistance, ou la bobine du plus petit pouvoir conducteur, que l'on puisse intercaler entre les barres de cuivre  $IIH_1$  et  $JJ_1$ . En remplaçant la bobine 1 entre  $LL_1$  et  $MM_1$  par la tige  $F_1$ , l'observateur obtiendra une nouvelle série de rapports avec les mêmes degrés de variation, et compris entre ceux de 101 à 100 et de 100,5 à 100. On voit ainsi que si les bobines R et S ne diffèrent pas de plus de 1 pour 100, on pourra par ce procédé mesurer leur rapport avec une approximation de 0,002 pour 100.

» On observera encore qu'il n'est pas nécessaire que les bobines 1, 2, 4, etc., soient réglées avec une extrême précision, car une erreur de 1 pour 100 dans la somme de leurs résistances, comparée à leur véritable valeur par rapport à la bobine C, n'affecterait le résultat final que de 0,01 pour 100.

» On peut évidemment intervertir la position de R et S dans la balance par rapport à A et C.

» Le diagramme n'a pas la prétention de représenter l'arrangement pratique de cette expérience; il indique simplement les communications. Les bobines 1, 2, 4, etc., ont leurs extrémités en cuivre amalgamé, qui plongent simplement dans les coupes à mercure des barres de cuivre; les observations pouvaient être faites très rapidement et très exactement, car le galvanomètre était assez sensible pour qu'avec une pile de 4 éléments Daniell l'effet de l'addition ou de la soustraction de la bobine 512 fût très nettement marqué.

» La réduction des observations pour trouver le rapport des bras sembla au premier abord un peu compliquée; mais en ayant soin de se munir d'une table de récipro-

ques elle prend peu de temps. Il ne semble pas qu'il y ait aucun perfectionnement à apporter dans cette partie de l'appareil. L'idée de se servir de grandes bobines combinées avec des bobines plus petites en arc multiple, pour obtenir des différences de résistance extrêmement petites, appartient au professeur [aujourd'hui sir] W. Thomson, et pourra être avantageusement utilisée dans une foule de circonstances. »

#### LA CLEF DE CONTACT

« Dans toutes les expériences de pont il est nécessaire d'établir le contact dans le circuit de la pile avant de l'établir dans celui du galvanomètre, afin d'éviter l'extracourant (1) qui se développe au moment de la fermeture.

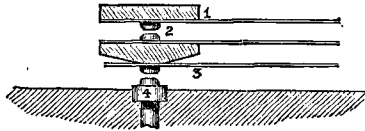


FIG. 170.

Il importe aussi que le courant de la pile ne passe pas plus longtemps qu'il n'est nécessaire, car l'échauffement des bobines altère leur résistance. La clef représentée (fig 170) a été imaginée pour établir le contact de pile un instant avant le contact du galvanomètre, et pour le rompre un instant après. Les ressorts supérieurs 1, 2, donnent le contact de pile ; les ressorts inférieurs 3, 4, celui du galvanomètre. Le dessin s'explique de lui-même (2).

(1) Voir chap. xxix.

(2) Pour la théorie mathématique des expériences, voir *Reports on Electrical Standards*, p. 101.



## DÉTAILS

« Voici quelques détails des expériences faites à King's College en juin 1863 (1) :

- $n$ , le nombre de tours, était de 307,
- $l$ , la longueur effective du fil, de 302 063 mètres,
- $l$ , la distance du miroir à l'échelle, de 2<sup>m</sup>,9853.

## DÉTERMINATION DE LA DÉVIATION

«  $\delta$  est la différence entre la lecture de l'échelle prise quand l'aimant est actionné seulement par la terre, et celle prise quand il est actionné, en outre, par les courants induits dans la bobine. Pour déterminer  $\delta$ , on fait la lecture de l'échelle quand l'aiguille est au repos ou quand le circuit est interrompu. On fait une autre lecture quand les communications sont établies et que la bobine est en mouvement. Si la *direction* du magnétisme terrestre reste la même, la différence des deux lectures donne la véritable valeur de  $\delta$ ; mais comme la direction de l'action magnétique de la terre varie continuellement, il faut connaître la différence de *déclinaison* entre les moments des deux lectures réelles, et calculer la valeur qu'aurait dû avoir la lecture de l'échelle à l'instant où la déviation a été observée, s'il n'y avait pas eu de perturbation. Dans les expériences en question, cette correction était faite par comparaison avec les résultats de l'enregistrement photographique de la déclinaison magnétique obtenus à Kew, au moment même des expériences sur la bobine tournante (2). »

(1) *Reports on Electrical Standards*, p. 104.

(2) Voir vol. I, p. 398.

## CORRECTIONS

On faisait les corrections suivantes : A. pour les dimensions des sections de la bobine ; B. pour le niveau. Dans les expériences, pour vérifier que l'axe était vertical, on opérait avec un niveau à esprit-de-vin, dont la lecture donnait la valeur cherchée à 12'' près, et dont les indications étaient exactes au moins à ce degré d'appréciation.

C. Correction pour l'induction exercée par l'aimant suspendu sur la bobine. L'intensité de l'aimant, comparée à celle du champ magnétique, était mesurée au moyen d'un magnétomètre de Kew, par la méthode ordinaire (1).

D. Correction pour la torsion du fil (2). Cette correction dépend de la relation entre la raideur du fil et la force directrice de l'aimant suspendu. Le fil de suspension était un simple fil de cocon, de 2<sup>m</sup>,15 de long ; l'aimant était une sphère d'acier de 7<sup>mm</sup>,8 de diamètre, non aimantée à saturation. La correction pour la torsion était, par conséquent, beaucoup plus grande que si on avait employé un aimant plus puissant (3).

E. Correction pour la position de l'aimant suspendu.

F. Correction pour les irrégularités, dans le champ magnétique, provenant du fer ou des aimants se trouvant dans le voisinage de l'instrument.

On vérifia que cette correction était assez petite pour qu'on pût la négliger.

G. Correction pour la lecture de l'échelle.

(1) Voir vol. I, p. 361.

(2) Voir vol. I, p. 372.

(3) *Reports on Electrical Standards*, p. 105.

L'échelle était censée divisée en millimètres; mais si elle avait éprouvé un allongement ou un retrait, elle aurait cessé d'être exacte. L'erreur étant mesurée, on appliquait la correction G. .

H. Correction pour la capacité électro-magnétique de la bobine.

#### AUTRES DÉTAILS

Le compte rendu des expériences continue ainsi (1) :

« On peut exposer comme il suit la nature de l'action électrique mise en jeu dans l'expérience :

» Supposons que le plan de la bobine coïncide avec le plan magnétique nord et sud, et que la bobine tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Le côté nord de la bobine se déplacera alors de l'ouest à l'est, et, par conséquent, sera le siège d'une force électromotrice tendant à produire un courant dirigé *vers le haut* (2). Le côté sud de la bobine se meut de l'est à l'ouest, et, par conséquent, est le siège d'une force tendant à produire un courant dirigé vers le bas. Si le circuit est fermé, il y aura dans la bobine un courant dirigé vers le haut dans le côté nord, et un courant dirigé vers le bas dans le côté sud.

» Ce courant tendra à dévier vers l'est le côté nord de l'aimant suspendu, mais la force magnétique de la terre tend à le ramener vers le nord; il en résulte que la position définitive prise par l'aimant dépend de la relation qui existe entre l'intensité du courant et l'intensité du magnétisme terrestre. Mais l'intensité du courant dépend seulement de la vitesse de rotation, de la résistance de la bobine et de l'intensité du magnétisme terrestre. Par suite,

(1) *Reports on Electrical Standards*, p. 106.

(2) Comparez vol. I, p. 624 : « demi-cercle tournant. »

la position de l'aimant ne dépendra pas de l'intensité du magnétisme terrestre; elle ne dépendra que de la vitesse et de la résistance de la bobine.

» Observons que, dans sa révolution, la bobine passe par d'autres positions que celles que nous avons mentionnées. Lorsque son côté nord se meut vers l'est, le courant va en diminuant d'une façon continue et cesse quand ce côté arrive à l'est. Le courant commence alors à passer dans la direction inverse par rapport à la bobine; mais comme la bobine elle-même est maintenant dans une position inverse, l'effet du courant sur l'aimant suspendu est encore de dévier le pôle nord de l'aiguille vers l'est. L'action du courant sur l'aimant est, par conséquent, d'une nature intermittente, et la position que prend l'aimant n'est pas fixe, mais oscille continuellement. L'étendue de ces oscillations est néanmoins extrêmement petite.

» L'étendue totale de la vibration n'atteint pas  $\frac{1}{100}$  d'un millimètre sur l'échelle.

» Cette vibration n'était jamais observée et ne gênait pas la netteté de la vision.

» Les seules oscillations observées étaient les oscillations franches de l'aimant. Celles-ci provenaient, au commencement de l'expérience, de causes accidentelles, et leur amplitude était sujette à de légères altérations dues à la vitesse de rotation, au passage de steamers en fer dans la Tamise, etc. (1).

» La durée d'une vibration était d'environ 9,6 secondes, et en notant la division de l'échelle aux extrémités de chaque vibration, on obtenait une série de lectures. Les in-

(1) Ces expériences ont été exécutées avant l'époque de la construction du quai, alors que le Kings' College était situé près de l'eau.

tervalles, entre chaque lecture, étaient à peu près égaux. Il n'y a alors qu'à observer la déviation à chaque oscillation, à déterminer le nombre exact de tours pendant le temps de l'observation, et à noter exactement le commencement et la fin de ce temps. C'est ce qu'on faisait comme il suit :

#### CONDUITE DE L'EXPÉRIENCE

» On faisait tourner la bobine au moyen du moteur, et sa vitesse était réglée par le régulateur. Lorsque la vitesse voulue était atteinte, on réduisait les oscillations de l'aimant dans des limites convenables, au moyen d'un barreau amortisseur placé à distance. Le barreau amortisseur occupant une position convenable, on commençait l'observation.

» Un observateur A faisait la lecture de l'échelle vue dans la lunette et inscrivait la déviation à l'extrémité de chaque oscillation : il obtenait ainsi une lecture toutes les 9,6 secondes.

» Un autre observateur B, avec un chronomètre, inscrivait les temps à chaque troisième coup du timbre. Les temps ainsi notés correspondaient aux intervalles de 300 révolutions. Lorsque l'observateur B notait le temps, l'observateur A faisait une marque sur son papier, de telle sorte qu'après l'expérience on pouvait comparer les lectures de déviation aux lectures du chronomètre prises au même instant.

» On obtenait ainsi la durée moyenne de révolution entre deux moments d'observation, et on la comparait à la déviation moyenne entre les mêmes limites de temps : toute portion d'expérience accidentellement viciée pouvait ainsi être rejetée.

» On commençait les expériences de chaque jour par une comparaison, au moyen de la balance électrique, entre la résistance de la bobine (tournante) en expérience et la résistance d'une bobine de maillechort. On prenait alors une série de lectures de l'échelle pour déterminer la position que prenait l'aimant non dérangé; on notait les temps correspondant au commencement et à la fin de cette série, et que l'on appelait temps du premier zéro.

» Puis on faisait tourner la bobine et on inscrivait les lectures de déviation et de temps, comme on l'a déjà dit : on appelait cette série premier tour.

» On changeait alors la direction de la rotation et on obtenait une seconde série de lectures, désignée sous le nom de deuxième tour.

» Puis on observait de nouveau la position de l'aimant non dérangé et on notait le temps : on appelait cette observation le deuxième zéro.

» Enfin, on comparait de nouveau la résistance de la bobine tournante avec celle de l'étalon. On recommençait cette série d'expériences si on en avait le loisir.

» Des valeurs du premier et du deuxième zéro, combinées avec les renseignements fournis par les enregistreurs photographiques de Kew, on déduisait la véritable valeur de la lecture correspondant à la position non dérangée de l'aimant pendant le premier et le deuxième tour. La différence entre cette valeur et la lecture effectivement faite est la déviation  $\delta$ , uniquement due aux courants électriques. »

#### RÉSULTAT

De ces expériences on déduit, par un calcul mathématique, la valeur en mesure absolue des résistances des bo-

bines arbitraires en maillechort. Connaissant la résistance absolue de l'une d'elles, les méthodes ordinaires permettent de construire des bobines de résistance données. La résistance absolue de la bobine de maillechort marquée « 4 juin, 101 » (unités arbitraires), a été trouvée de 107 620 116 mètres par seconde.

#### ÉMISSION DES UNITÉS B. A.

Cette détermination achevée, le comité a procédé à la construction de copies matérielles, ayant chacune une résistance de 1000 millions de centimètres par seconde, c'est-à-dire de

10<sup>9</sup> unités C. G. S.

Cette unité plus grande est appelée quelquefois l'« unité de l'Association britannique », et on l'écrit « B. A. U. » ; quelquefois le « ohm », du nom de celui qui a découvert la loi de la résistance électrique.

#### CHOIX DES MÉTAUX ET ALLIAGES

Une importante question était de savoir quelle était la matière qui convenait le mieux pour la construction des bobines.

Ce qui suit est la réponse du comité (1), extraite du rapport de 1865, appendice A, par le docteur A. Matthiessen, F. R. S., et M. Ch. Hockin :

« Quelques bobines de l'unité de résistance ont été construites et émises.

» Nous nous proposons d'exposer la méthode employée pour leur construction, et les raisons qui ont motivé le

(1) *Reports on Electrical Standards*, p. 135.

choix de l'alliage spécial qui a été adopté pour le conducteur.

» Cet alliage se compose de 66 pour 100 d'argent et 33 de platine.

» Cet alliage possède un certain nombre de propriétés qui le rendent très propre à l'usage auquel on l'a destiné.

» Quant à ses propriétés électriques :

» I. Les changements de température affectent moins sa résistance électrique que celle de tout autre alliage connu.

» Ce point a une importance qui n'échappera pas à ceux qui ont fait usage de bobines de résistance.

» L'accroissement de résistance de cet alliage, pour une variation de température de 0 à 100 degrés centigrades, est seulement de 3,2 pour 100.

» II. Le pouvoir conducteur de cet alliage est très faible, plus faible que celui du maillechort.

» III. Le pouvoir conducteur de cet alliage n'est point altéré par la cuisson, c'est-à-dire quand on l'expose pendant plusieurs jours à une température d'environ 100 degrés centigrades.

» C'est là une propriété d'une grande importance, car on a observé que les conducteurs qui ne s'altèrent pas par la cuisson ne s'altèrent pas non plus avec le temps. Les expériences qui établissent ce fait ont été publiées dans les précédents rapports.

» IV. Le pouvoir conducteur d'un fil de cet alliage est très peu altéré par le recuit. De plus, cet alliage ne s'oxyde pas par l'exposition à l'air ; il ne s'allie pas facilement au mercure ; il donne un fil suffisamment flexible, et peut être étiré à un grand degré de finesse. Vingt et une



bobines ont été construites avec cet alliage et envoyées aux principaux électriciens de la Grande-Bretagne et de l'étranger. La forme de bobine adoptée pour recevoir le fil (figurée dans la planche XXIII) a été trouvée très commode, car on peut l'immerger dans l'eau pendant l'observation. Le fil est recouvert d'une double couche de soie, et protégé par de la paraffine solide dans laquelle il est noyé.

» Outre les bobines dont nous venons de parler, on a construit encore six bobines-unité, qui seront déposées à l'observatoire de Kew.

» Tout possesseur d'une copie de l'unité B. A. pourra, à l'avenir, la comparer avec une de ces bobines moyennant une modique redevance.

» Parmi les bobines que l'on doit envoyer à Kew, deux sont en alliage de platine-argent, deux en alliage de platine-iridium, et deux en platine pur du commerce.

» On a aussi préparé deux unités de mercure.

» Avec les termes de comparaison fournis par un pareil nombre de bobines, faites de métaux si différents, il semble tout à fait improbable que l'unité actuellement proposée puisse jamais se perdre.

» En même temps que les bobines précédemment mentionnées, on conservera aussi la bobine étalon qui a servi aux premières expériences que nous avons rapportées, la bobine qui a servi aux expériences analogues faites par le comité en 1863, et plusieurs copies de ces bobines.

» On a construit deux copies en maillechort de la bobine désignée sous le nom de « 4 juin » dans le rapport de 1863. Enfin, on a fait deux copies en maillechort, deux en or-argent, et une en platine-argent de l'autre bobine dont on s'est servi en 1864. »

## ACHÈVEMENT DE L'ÉTALON ET SON DÉPÔT A KEW

« Ces bobines ont été, à deux reprises, comparées de nouveau entre elles à des intervalles de trois mois, et le seront encore; et si on trouve qu'elles n'ont subi aucune altération, elles seront déposées à l'observatoire de Kew comme termes de comparaison, avec leurs valeurs gravées sur elles.

» Toutes les bobines destinées à être émises seront comparées de nouveau quelques semaines après la construction, et rejetées si on trouve une altération de 0,01 pour 100 dans leur résistance.

» Toutes les bobines qui seront expédiées seront exactes à la température indiquée sur la bobine, à moins de 0,01 pour 100; et cette température sera, dans tous les cas, comprise entre 14,5 et 16,5 degrés centigrades. »

Pour les usages ordinaires, les unités sont faites en maillechort, dont les propriétés diffèrent peu de celles de l'alliage de platine et qui est beaucoup moins cher.

## NOTES

## UNITÉ ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE DE RÉSISTANCE

Dans la figure 165, supposons que les rails et l'arc galvanométrique n'aient pas de résistance; la résistance R du circuit fermé par le conducteur mobile ne changera pas, malgré le déplacement de ce dernier. Or W étant le travail du courant induit, on a :

$$W = E C t = \frac{E^2 t}{R},$$

Si  $W = 1$ ,  $E = 1$  et  $t = 1$ , on a  $R = 1$ ; d'où une définition de l'unité de résistance, dont l'énonciation est assez longue.

Appelons  $L$  la longueur du mobile,  $l$  celle de l'arc de cercle formant galvanomètre des tangentes,  $a$  le rayon de cet arc. Si on mesure l'intensité  $C$  par la déviation de ce galvanomètre, on a :

$$C = \frac{HLV}{R} = \frac{Ha^2}{l} \tan \theta;$$

d'où

$$R = \frac{Vl.l}{a^2 \tan^2 \theta}.$$

Faisons  $L = l$  et  $l = a$  (c'est-à-dire prenons un arc de  $57^\circ 1/4$ , dont la longueur est égale au rayon); on a :

$$R = \frac{V}{\tan^2 \theta},$$

et si  $\theta = 45^\circ$ ,

$$R = V.$$

*La résistance en unités électro-magnétiques est donc mesurée par une vitesse. On a encore  $R = V$ , si  $Ll = a^2$ .*

Plus généralement, si

$$L = \frac{na^2}{l}, \quad R = \frac{nV}{\tan^2 \theta}, \quad \text{et si } \theta = 45^\circ, \quad R = nV.$$

La résistance est donc mesurée par  $n$  fois la vitesse nécessaire pour que la déviation soit de  $45^\circ$ .

Il est clair que l'expérience est impossible à faire avec les rails; car ils ont toujours une résistance appréciable, et la résistance du circuit changerait à chaque instant avec leur longueur. On a recours alors à la rotation d'un circuit.

#### COURANT INDUIT PAR LA ROTATION D'UN CIRCUIT VERTICAL

Considérons un fil formant un circuit fermé circulaire, dont l'axe  $AB$  est perpendiculaire aux lignes de force  $NS$  du champ horizontal de la terre. Ce circuit est dans un plan vertical  $OE$ . Faisons tourner ce circuit avec une vitesse angulaire  $\omega$ , et appelons  $a$  son rayon et  $H$  l'intensité horizontale du champ. Quand le plan du cercle est perpendiculaire aux lignes de force, le nombre de ces lignes qui le traversent est égal à  $\pi a^2 H$ . Dans une demi-révolution, chaque moitié du cercle coupe un nombre de lignes de force  $N = \pi a^2 H$ ; et comme les

courants engendrés par chaque moitié du cercle circulent dans le même sens, ils s'ajoutent. Le nombre total de lignes coupées par le cercle entier est donc de  $2\pi a^2 H$  dans une demi-révolution. Le sens du courant dans le cercle mobile varie à chaque demi-révolution : pour faire passer le courant dans un circuit extérieur constamment dans le même sens, il faudra faire aboutir les extrémités du fil enroulé sur le cercle à deux anneaux métalliques sur lesquels appuient des frotteurs reliés à ce circuit et disposés de façon qu'ils forment un commutateur renversant le sens du courant à chaque demi-révolution. Le nombre des lignes de force coupées par le cercle entier dans une révolution entière est  $4\pi a^2 H$ .  $n$  étant le nombre de tours par seconde,  $n = \frac{\omega}{2\pi}$ ; et le mouvement de rotation étant uniforme, le nombre total de lignes de force coupées dans chaque seconde est  $4\pi a^2 H \times \frac{\omega}{2\pi} = 2\omega a^2 H$ . Telle sera l'expression de la force électromotrice.  $R$  étant la résistance du circuit, on aura pour l'intensité :

$$C = \frac{2\omega a^2 H}{R}.$$

Si au lieu d'un seul tour de fil on a  $m$  tours sur un cadre ou bobine, et si  $L$  est la longueur du fil enroulé, on a  $L = 2\pi am$ , et l'aire totale des cercles est  $\pi a^2 m = \frac{aL}{2}$ . La force électromotrice devient alors :

$$E = 2\omega a^2 H m = \frac{\omega La H}{\pi},$$

et l'intensité :

$$C = \frac{\omega La H}{\pi R}.$$

Connaissant  $H$  et mesurant  $C$  avec un galvanomètre, il n'y aura plus d'inconnu dans cette formule que la résistance *totale*  $R$  du circuit ( $R$  comprenant évidemment la résistance de l'appareil de mesure.

MÉTHODE DE SIR W. THOMSON, ADOPTÉE PAR L'ASSOCIATION  
BRITANNIQUE

En suspendant un petit aimant au centre de la bobine tournante, celle-ci devient son propre galvanomètre. Les courants induits dévient tous l'aimant dans la direction de la rotation.  $M$  étant le moment

magnétique de l'aiguille aimantée, le moment du couple exercé quand l'aiguille est déviée de  $\delta$  est :

$$\frac{\omega L^2 H}{4aR} M \cos \delta.$$

Le moment du couple égal et opposé exercé par la terre est :

$$MH \sin \delta,$$

d'où on déduit :

$$\frac{\omega L^2}{4aR} = \tan \delta$$

et

$$R = \frac{\omega L^2}{4a \tan \delta}.$$

Supposons une bobine de 0<sup>m</sup>,30 de diamètre, contenant une longueur de 300 mètres d'un certain fil et faisant 5 tours par seconde :

La vitesse angulaire sera :  $\omega = 2\pi \times 5 = 31,42$ .

Dans le système C. G. S., on prendra  $a = 15$  et  $L = 30\,000$ .

Supposons  $\delta = 3^\circ$ ; soit  $\tan \delta = 0,0524$ .

On aura :  $R = 9 \times 10^9$  unités absolues magnétiques C. G. S.

ou 9 ohms.

Donc 1 ohm est représenté par  $\frac{300}{9}$  mètres du fil employé dans l'expérience.

J. R.

## CHAPITRE XXVII

### ACTION MUTUELLE DES COURANTS ENTRE EUX ET ENTRE COURANTS ET AIMANTS

On a constaté que si deux fils conducteurs traversés par des courants sont librement suspendus, on observe entre ces fils une force qui sera attractive si les courants sont de même sens, répulsive s'ils sont de sens contraires.

On observe ces actions en suspendant les fils de telle sorte qu'ils puissent tourner et se mouvoir sans beaucoup de frottement et sans interrompre les courants de pile.

L'expérience a démontré que l'action d'un petit circuit plan à des distances grandes par rapport au diamètre du circuit est la même que celle d'un petit aimant intérieur au circuit, dont le pôle aurait la position qu'il prendrait sous l'influence du courant, s'il était préalablement aimanté, et dont le moment magnétique serait égal au produit de l'intensité du courant par l'aire de sa petite surface (1).

Ainsi, un circuit plan quelconque très petit peut être regardé comme équivalent à une couche magnétique limitée par le fil et dont l'intensité magnétique serait égale à l'intensité du courant. Le côté marqué de la couche se trouve sur le côté vers lequel se tournerait l'extrémité marquée d'un petit aimant placé à l'intérieur du circuit.

(1) Voir page 586.

La démonstration suivante est du professeur Maxwell (1).

L'action magnétique d'un circuit fermé quelconque est la même que celle d'une couche magnétique limitée par le fil, et dont l'intensité serait égale à l'intensité du courant.

Supposons d'abord que l'aire limitée par le fil soit entièrement remplie par de très petits courants circulaires (fig. 171), c'est-à-dire par de petits anneaux placés aussi près que possible les uns des autres, puis par des anneaux plus petits dans les espaces vides qu'ils laissent entre eux, par d'autres plus petits encore dans les vides qui restent, et ainsi de suite jusqu'à ce que la surface soit entièrement recouverte; supposons qu'un courant de même intensité et de même sens que le courant principal circule dans chacun d'eux; alors chaque courant est équivalent à une couche magnétique d'une aire égale à la sienne et d'une intensité égale à celle du courant; et toutes ces couches ajoutées ensemble forment une couche de même intensité que le courant, et dont l'aire est égale à celle du circuit original.

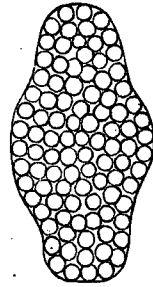


FIG. 171

Mais l'effet magnétique de ce système de circuits est égal à celui du circuit original, car « l'effet magnétique de deux courants contigus égaux et de sens contraires est absolument nul ». Or chaque courant, dans ces anneaux, à l'exception des courants qui circulent dans la portion extérieure des anneaux extérieurs, est contigu à un autre

(1) *Electricity*, 483, vol. II, p. 131.

courant égal et de sens contraire, et, par conséquent, l'effet magnétique de tout le système se réduit à celui d'un courant de même intensité que le courant primitif, et dont la forme, en augmentant le nombre et diminuant les dimensions des anneaux imaginaires, ne différera, en définitive, de celle du courant originaire que d'une quantité aussi petite qu'on le voudra.

Et comme deux choses égales à une même troisième sont égales entre elles, il est ainsi démontré qu'un courant formant un circuit fermé est équivalent à une couche magnétique de même intensité et dont le contour coïncide avec le fil.

Nous avons constaté dans la II<sup>e</sup> partie (1) que l'action magnétique d'une couche magnétique sur un point extérieur dépend seulement de son intensité et de l'angle solide sous-tendu par les limites de son contour, et nullement de la forme de la couche; nous voyons maintenant qu'on arrive au même résultat en considérant le courant équivalent; car des petits circuits égaux à la couche et aussi au courant originaire continueront à être égaux à ce dernier, quelle que soit la façon dont ils soient tracés, que ce soit sur une surface plane ou une surface courbe. La seule condition est que chacun d'eux soit contigu à un petit circuit voisin, condition qui peut être remplie également bien par une surface de forme quelconque.

Pour calculer le potentiel magnétique développé en un point par un courant formant un circuit fermé, substituez au circuit sa couche magnétique équivalente. On effectuera alors le calcul comme pour une couche magnétique.

(1) Vol. I, p. 296.



## NOTES

## CHAMP MAGNÉTIQUE PRODUIT PAR UN COURANT

Puisqu'un courant exerce une force sur un pôle d'aimant placé dans son voisinage, on peut dire qu'il produit un champ magnétique, et, en explorant ce champ avec un aimant, on peut tracer les lignes de force et les surfaces équipotentiellles du champ.

Si le courant passe dans un conducteur en ligne droite, d'une longueur indéfinie, comme un fil télégraphique, un pôle magnétique voisin est sollicité par une force qui tend à le faire tourner autour du fil : cette force est en chaque point perpendiculaire au plan passant par ce point et l'axe du courant.

Les surfaces équipotentiellles sont constituées par une série de plans passant par l'axe du courant, et les angles formés par deux plans consécutifs sont égaux entre eux.  $C$  étant l'intensité du courant, le nombre de ces plans est  $4\pi C$ .

Les lignes de force sont des cercles ayant leurs centres sur l'axe du courant et situés dans des plans perpendiculaires à cet axe. L'intensité de la force magnétique à une distance  $d$  du courant est l'inverse de la distance qui sépare deux surfaces équipotentiellles.

Cette distance est donnée par  $\frac{2\pi d}{4\pi C} = \frac{d}{2C}$ . L'intensité de la force est donc  $\frac{2C}{d}$ .

Le travail développé par une unité de pôle faisant un tour complet autour du courant est  $4\pi C$ , quel que soit le chemin décrit par le pôle.

## ACTION MÉCANIQUE D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UN CONDUCTEUR FERMÉ TRAVERSÉ PAR UN COURANT

Si un conducteur traversé par un courant se déplace dans un champ magnétique, le travail développé par ce conducteur sous l'action des forces électro-magnétiques est égal au produit de l'intensité du courant par le nombre de lignes de force qu'il coupe dans son mouvement.

L'action mécanique d'un champ magnétique sur un conducteur fermé traversé par un courant sera donc déterminée par la loi suivante :

Tracez les lignes de force magnétique. Comptez le nombre de ces

(1) *On the Elementary Relations between Electrical measurements*, by professor Maxwell and M. Jenkin, Brit. assoc. Report, 1863, appendix G.

lignes qui traversent le circuit du conducteur; tout mouvement qui augmentera ce nombre sera aidé par les forces électro-magnétiques, et le travail développé pendant le mouvement sera le produit de l'intensité du courant par le nombre des lignes de force ajoutées.

Considérons, par exemple, les lignes de force dues à un pôle magnétique unique d'intensité  $m$ . Ce seront des lignes droites rayonnant du pôle dans toutes les directions également, et leur nombre sera  $4\pi m$ . Décrivons une sphère autour du pôle, et projetons le circuit sur sa surface par des lignes joignant au pôle ses divers points. La surface de l'aire ainsi découpée sur la sphère mesure l'angle solide d'où le circuit est vu du pôle. Soit  $\omega$  cet angle solide; le nombre des lignes coupées par la surface limitée par le circuit sera  $m\omega$ ; et si  $C$  est l'intensité du courant, la quantité de travail développée pour amener le circuit d'une distance infinie du pôle à sa position actuelle sera  $Cm\omega$ . Par conséquent, le potentiel magnétique d'un circuit fermé traversé par l'unité de courant, par rapport à l'unité de pôle magnétique placée en un point, est égal à l'angle solide sous lequel le circuit est vu de ce point.

En recherchant la série des points d'où le circuit est vu sous des angles solides égaux, on aura une idée des surfaces équipotentielles. Elles forment une série de surfaces ayant toutes pour intersection commune le circuit lui-même, qui forme la limite de chacune de ces surfaces. Leur nombre est  $4\pi C$ . Les lignes de force magnétique coupent ces surfaces à angles droits, et forment par conséquent un système d'anneaux entourant chaque point du circuit.

#### LOI GÉNÉRALE DE L'ACTION MÉCANIQUE DES COURANTS ENTRE EUX ET ENTRE COURANTS ET AIMANTS

Tracez les lignes de force magnétique dues à tous les courants et aimants du champ, en supposant l'intensité de chaque courant ou aimant réduite de sa valeur actuelle à l'unité. Appelez le nombre de lignes de force dues à un circuit ou à un aimant qui traverse un autre circuit, le *coefficient potentiel* de l'un sur l'autre. Ce nombre sera regardé comme positif lorsque les lignes de force traversent le circuit dans la même direction que celles dues au courant passant dans ce circuit, et négatif lorsqu'elles le traversent en sens contraire.

Déterminant ensuite la variation du coefficient potentiel résultant d'un déplacement, cette variation multipliée par le produit des intensités des courants ou aimants donnera la somme de travail développée par l'action mutuelle de ces deux corps pendant le déplacement.

J. R.

## CHAPITRE XXVIII

### RELATION ENTRE LA VARIATION DU POTENTIEL ET L'INTENSITÉ DU COURANT

La loi de Ohm nous apprend que, dans un fil conducteur de résistance constante, le courant varie proportionnellement à la différence de potentiel des extrémités du fil.

Tirons une ligne horizontale AB (fig. 172, 173, 174),

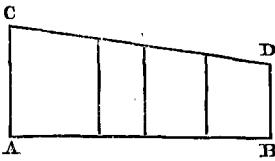


FIG. 172.

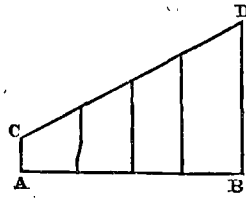


FIG. 173.

dont la longueur représente la résistance d'un fil traversé par un courant, et par divers points de cette ligne menons des verticales dont les longueurs représentent les potentiels de ces points, les potentiels positifs étant portés au-dessus de l'horizontale, et les potentiels négatifs au-dessous.

D'après la loi de Ohm, les extrémités de ces ordonnées se trouveront toutes sur la même ligne droite CD. S'il y a une grande différence de potentiel entre les extrémités, la ligne CD sera très inclinée; si cette différence est petite, la ligne CD sera presque horizontale. En d'autres

termes, l'inclinaison de la ligne CD représente le *taux de variation du potentiel* le long du fil de A en B.

Mais comme CD est une ligne droite, son inclinaison est en raison directe de la différence de hauteur de ses extrémités, et en raison inverse de la longueur de la ligne AB.

En vertu de la loi de Ohm, l'intensité du courant varie en raison directe de la différence de potentiel des extrémités du fil et en raison inverse de sa résistance. Il en ré-

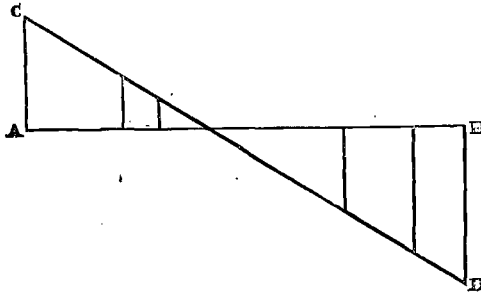


FIG. 174.

sulte que l'inclinaison de la ligne CD représente l'intensité du courant dans le fil.

Mais nous venons de dire que cette inclinaison représente le *taux de variation du potentiel*. Donc, l'intensité du courant dans AB est proportionnelle au *taux de variation du potentiel* dans ce conducteur; et comme on peut faire AB aussi petit qu'on le veut, on peut dire que l'intensité du courant en un point d'un fil est proportionnelle au *taux de la variation du potentiel* quand on commence à s'écarter de ce point.

Finalement, en choisissant nos unités comme nous l'avons indiqué à propos du système C. G. S., la proportion devient une égalité, et

*L'intensité du courant en un point d'un conducteur est égale au taux de la variation du potentiel quand on commence à s'écarter de ce point (1).*

Il est évident que la direction du courant est donnée par la direction de l'inclinaison de la ligne CD.

(1) C'est-à-dire : si  $V$  est le potentiel à ce point, l'intensité du courant est  $\frac{dV}{ds}$ ,  $s$  étant une longueur mesurée le long du fil.

## APPENDICE AU TOME PREMIER

---

### ÉLECTROMÈTRE SYMÉTRIQUE DE M. MASCART

La planche XXV *bis* représente la dernière forme de cet électromètre, construit par M. Carpentier, successeur de Ruhmkorff.

Le principe de l'électromètre symétrique a été indiqué page 240. Pour obtenir une symétrie parfaite au point de vue des effets électriques, on donne aux deux paires de quadrants des charges égales et de signes contraires, en les mettant séparément en communication avec les deux pôles d'une pile à courant constant, dont le milieu communique avec le sol (par exemple, 40 éléments zinc, cuivre et eau pour des essais de courte durée, ou des éléments au chlorure d'argent de Warren de la Rue, pour des essais prolongés. Cette pile doit être isolée avec soin). L'aiguille est mise en communication avec la source dont on veut mesurer le potentiel : cette communication s'établit à l'aide d'un fil de platine partant de l'aiguille, qui plonge dans un vase rempli d'acide sulfurique concentré, et dans lequel plonge également un second fil de platine relié à la source. L'aiguille est supportée par une suspension bifilaire.

Les quadrants, l'aiguille et le vase de verre sont renfermés dans un cylindre métallique qui, tout en les protégeant contre les courants d'air, les met à l'abri de toute influence électrique extérieure. Ce cylindre est fermé à sa partie supérieure par une plaque mobile de cuivre qui porte les principaux organes de l'appareil et qui est retenue par deux boutons à vis R, R'.

Les quadrants sont fixés à cette plaque par des tiges isolantes en verre, et l'un d'eux peut être déplacé en poussant légèrement dans un sens ou dans l'autre la tête de vis V. Ils communiquent avec l'extérieur par deux bornes B, B', dont la tige traverse librement un trou percé dans la plaque.

Un petit chapeau C, glissant à frottement doux sur la tige, permet de relier chaque borne avec la cage ou de l'isoler à volonté. Il suffit de maintenir le chapeau relevé dans la position C pour que la borne et la paire de quadrants qui lui correspond soient isolés, et de le baisser

dans la position  $C'$  ou  $C''$  pour que la borne et sa paire de quadrants soient en communication avec la cage métallique de l'instrument et, par suite, avec le sol.

Une troisième borne A, disposée comme les précédentes, est en relation avec la tige de platine P destinée à électriser l'aiguille.

Pour que l'on puisse amener l'aiguille dans une position convenable, le tube de verre qui supporte la suspension est commandé à sa partie inférieure par une vis tangente qui permet de le faire tourner d'une très faible quantité à la fois.

En débrayant cette vis, on peut également tourner le tube à la main, lorsqu'il est nécessaire de faire parcourir rapidement à l'aiguille un angle un peu grand.

La suspension est formée par un fil de cocon dont les deux bouts sont noués ensemble; ce fil passe dans un crochet à la partie supérieure et dans un autre crochet attaché à l'aiguille.

Le crochet supérieur peut être monté ou baissé en tournant à droite ou à gauche le bouton H; en outre, ce crochet est formé de deux branches que l'on peut écarter à volonté, de manière à éloigner plus ou moins les deux points d'attache de la suspension bifilaire. Une petite clef, qui passe par un trou pratiqué dans le tube de verre, permet de régler l'écartement des branches du crochet.

La cage de l'appareil est percée de plusieurs ouvertures, qui comprennent une porte S, permettant d'observer le dessous des secteurs et servant à introduire le vase rempli d'acide sulfurique, huit fenêtres placées à la partie supérieure, fermées par un verre cylindrique, qui laissent voir les quadrants et l'aiguille, et une lentille placée en face du miroir M et destinée à donner de la netteté à l'image réfléchie. Le miroir est plan. La tige de platine qui porte le miroir et plonge dans l'acide sulfurique est traversée à la partie inférieure par deux ou trois petites aiguilles plantées normalement et dans le même plan. Ces aiguilles constituent une sorte de grille qui amortit les oscillations d'une manière remarquable.

Enfin l'instrument est placé sur un trépied à vis calantes et à plaque tournante, au moyen duquel on peut l'orienter et le mettre d'aplomb avec la plus grande facilité.

*Réglage et mise en expérience.* — Lorsqu'on veut se servir de l'électromètre, il faut d'abord mettre de l'acide sulfurique (1) dans le vase de verre.

Cela fait, on pose l'instrument en face de l'échelle de réflexion, et

(1) Cet acide doit être concentré et pur; il ne doit contenir, par exemple, aucune trace d'acide hypoazotique, qui oxyderait les quadrants. Il est bon de le faire bouillir.

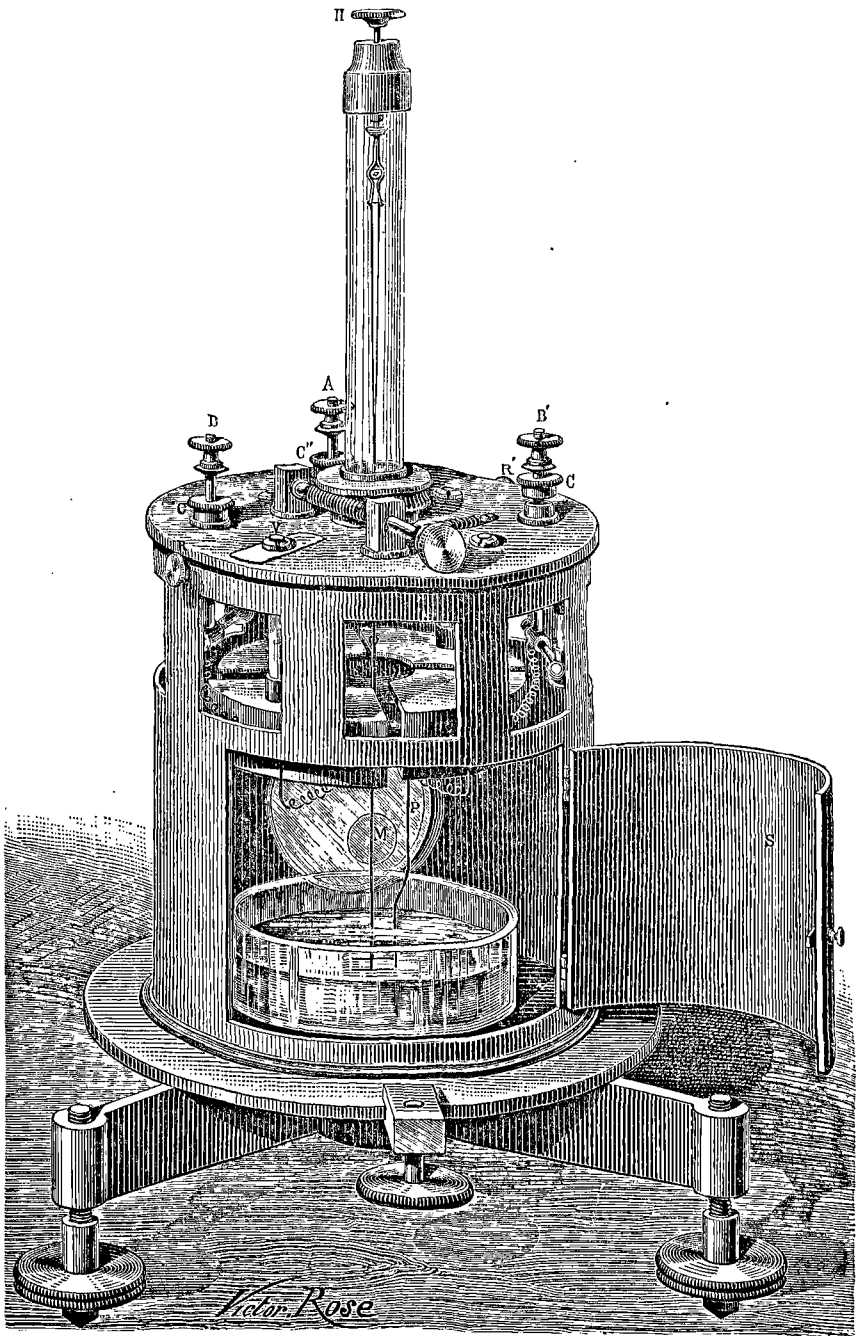
après avoir, à l'aide de la plaque tournante, amené la lentille en face de l'échelle, on tourne le bouton H, jusqu'à ce que l'aiguille vienne se placer à peu près à égale distance des faces supérieures et inférieures des quadrants. On agit ensuite sur les vis calantes de manière à amener l'axe de rotation de l'aiguille aussi exactement que possible au centre des quadrants et l'on procède à la mise au zéro de l'aiguille.

La première précaution à prendre pour cela consiste à mettre la cage métallique de l'instrument en communication avec le sol, ce que l'on fait en attachant, par exemple, à l'un des pieds un fil de cuivre dont l'autre extrémité est fixée à une conduite d'eau ou de gaz. On baisse alors les trois chapeaux C, C', C'', afin que les quadrants et l'aiguille soient parfaitement déchargés, et, d'abord à la main, puis à l'aide de la vis tangente, on amène l'aiguille dans la ligne de séparation des secteurs. Le miroir se trouve alors tourné du côté de l'échelle, et c'est à ce moment que l'on peut régler la hauteur de cette dernière, de façon que la tache lumineuse se projette bien sur la graduation ; on règle aussi sa position dans le sens horizontal, de telle sorte qu'en regardant par la fenêtre qui est au-dessus de la porte de l'électromètre on voie le zéro de la division dans le prolongement de l'autre séparation des secteurs. Il ne reste plus qu'à ramener la tache lumineuse complètement sur le zéro en tournant un peu la vis tangente. Cette mise au zéro n'est pourtant pas définitive, car l'électrisation des quadrants peut faire varier un peu la position de l'aiguille. Pour charger les quadrants, on relie les bornes B et B' aux fils venant des deux pôles de la pile, et l'on relève en même temps les deux chapeaux correspondants C et C', en ayant bien soin de tenir baissé le troisième chapeau C''. Si la tache lumineuse resté immobile, l'électromètre est complètement réglé et l'on peut procéder aux expériences ; si la tache se meut à droite ou à gauche, on peut la ramener au zéro en déplaçant légèrement le quadrant mobile.

Lorsqu'on veut faire une observation, on met la borne A en relation avec la source d'électricité destinée à charger l'aiguille, on relève le chapeau C' et l'on note la division de l'échelle sur laquelle s'arrête la tache lumineuse. Pour ramener l'aiguille au zéro, on la fait communiquer avec le sol, et l'on peut ensuite recommencer une nouvelle détermination.

Il est nécessaire de vérifier par expérience l'isolement des différents organes. On isole une des paires de quadrants seulement ; on l'électrise très faiblement ; on approche, par exemple, de l'électromètre un corps électrisé jusqu'à ce que l'image dévie de la moitié de l'échelle, on touche avec le doigt la borne B ou B' qui a été isolée :





PL. XXV bis. — Électromètre symétrique de M. Mascart.



l'image revient au zéro. On enlève le doigt, puis le corps influent : l'image dévie de l'autre côté.

L'isolement est d'autant meilleur que l'image, après s'être fixée, se rapproche plus lentement du zéro de l'échelle. On répète la même épreuve sur l'autre paire de quadrants; puis on fait communiquer l'aiguille avec une paire de quadrants (il suffit pour cela de réunir les bornes A et B). Ce système étant isolé et l'autre paire de quadrants réunie au sol, on fait une expérience semblable, laquelle indique la déperdition qui a lieu par l'ensemble de l'aiguille et d'une paire de quadrants.

Lorsqu'on emploie l'électromètre comme appareil de démonstration dans un cours, on peut rendre les déviations visibles à un nombreux auditoire, en projetant sur le miroir un rayon lumineux qui se trouve réfléchi vers un écran et va y former une large tache lumineuse.

Pour cela, on place l'électromètre en face de l'écran et à une assez grande distance, et l'on dispose latéralement une lanterne de Duboscq; cette lanterne envoie un rayon lumineux qui est reçu sur un prisme à réflexion totale et renvoyé par celui-ci sur le miroir et en-

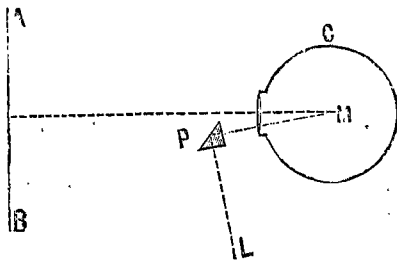


FIG. 175.

suite sur l'écran. Pour que le prisme à réflexion totale n'intercepte pas le rayon réfléchi lorsque la déviation est un peu grande, il faut placer ce prisme un peu plus bas que le miroir et donner à la face réfléchissante une inclinaison convenable, afin que la lumière réfléchie d'abord à la partie supérieure du prisme, tombe ensuite sur le miroir et passe au retour un peu au-dessus du prisme réflecteur. La figure 175, dans laquelle C représente la cage de l'électromètre, M le miroir, P le prisme, L la source lumineuse et AB l'écran, donnera d'ailleurs une idée de cette disposition.

Dans les expériences, il est souvent utile de charger l'aiguille de l'électromètre successivement avec chacun des pôles d'un couple ou

APPENDICE AU TOME PREMIER.

d'une pile. Dans ce cas, il est commode de se servir de la double clef à inversion (fig. 98, p. 474).

Le même commutateur permet d'invertir les signes des deux

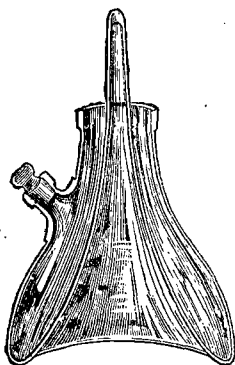


FIG. 176.

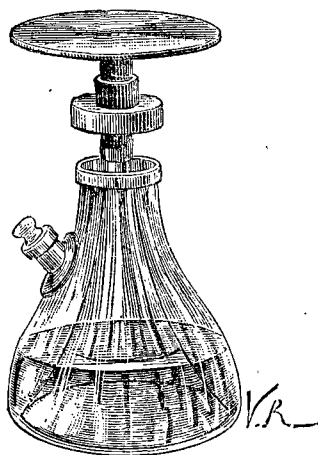


FIG. 177.

systèmes de quadrants, et l'on peut ainsi vérifier de plusieurs manières la symétrie électrique de l'électromètre.

Enfin, les fils qui vont de l'électromètre aux autres appareils devant être parfaitement isolés, il est bon de les supporter sur des flacons isoloirs à acide sulfurique.

*Isoloirs Mascart.* — Ces flacons (fig. 176 et 177) dont il a été question (p. 251), se composent d'une sorte de carafe dont le fond se prolonge à l'intérieur en une tige qui vient ressortir à travers le goulot. Le fond du vase contient une couche d'acide sulfurique concentré, et un coulant glissant le long de la tige permet de fermer presque entièrement l'ouverture du flacon. De cette façon, la tige est desséchée complètement par l'acide et constitue un support parfaitement isolant, sur lequel on peut fixer en toute sécurité les fils de communication. Toutefois il est nécessaire de vérifier le bon isolement de ces flacons, parce que la nature du verre a une grande influence.

FIN DU TOME PREMIER

# TABLE DES MATIÈRES

## DU TOME PREMIER

INTRODUCTION par M. A. CORNU, membre de l'Institut.....	v
PRÉFACE DE L'AUTEUR.....	xi

### PREMIÈRE PARTIE

#### ÉLECTRO-STATIQUE (1)

##### CHAPITRE PREMIER

###### PRÉLIMINAIRES

Propriétés des corps électrisés.....	1
Attractions et répulsions.....	2
Électricités (+) et (-).....	3
Attraction des corps légers.....	4
Électrisation du frotteur.....	4
Transport de l'électrisation.....	5
Conducteurs et isolants.....	6
Électrisation par induction.....	7
Écrans métalliques.....	7
Nature de la charge induite.....	8
Explication de l'attraction des corps légers.....	10
Communication à la terre.....	10

##### CHAPITRE II

###### MACHINES ÉLECTRIQUES

Machine à frottement.....	12
Machine de Holtz.....	14
Électrophore.....	18

##### CHAPITRE III

###### QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ

L'électricité envisagée comme une quantité.....	20
Conducteurs creux.....	22
Quantité totale d'électricité produite par induction.....	23
Production de quantités toujours égales d'électricité (+) et (-).....	25

(1) Les articles ajoutés à la traduction anglaise sont marqués d'un astérisque.

## CHAPITRE IV

## FORCE ÉLECTRIQUE

Loi de la force électrique.....	26
Preuve indirecte.....	27
Proportionnalité de la force aux charges.....	27
Nature physique de la force électrique.....	28
Nécessité d'un milieu.....	29
L'éther.....	31
Conducteur en pointe.....	33
Conducteurs des paratonnerres.....	34

## CHAPITRE V

DENSITÉ.....	36
--------------	----

## CHAPITRE VI

## POTENTIEL

Définitions.....	38
Électro-statique et électro-cinétique.....	41
Points, lignes et surfaces équipotentiels.....	42
Ligne de force.....	43
Relation entre le potentiel et la force.....	44
Potentiel et charge.....	44

## CHAPITRE VII

## ÉLECTROMÈTRES

Électromètre de Cavendish.....	46
Électromètre de Lane.....	46
Électromètre à feuilles d'or.....	47
Balance de torsion de Coulomb.....	48
Électromètres à quadrants de Sir W. Thomson.....	53
Modèle de démonstration.....	55
Modèle d'Elliott.....	56
La lampe, l'échelle et le miroir.....	58
Modèle de White.....	59
La jauge.....	66
Le rechangeur.....	67
La suspension.....	67
La plaque d'induction.....	70
Réduction de la sensibilité.....	74

## CHAPITRE VIII

## SUR LA THÉORIE DE LA MESURE ABSOLUE

Mesure absolue.....	74
Unités absolues.....	75
Instruments absolus.....	75

TABLE DES MATIÈRES.

667

Choix des unités.....	76
Système Centimètre-Gramme-Seconde (C. G. S.).....	76
Longueur.....	77
Masse.....	78
Unités dérivées C. G. S.....	79
Densité.....	79
Vitesse.....	80
Accélération.....	80
Force.....	81
Travail.....	82
Application des unités C. G. S. à l'électro-statique.....	83
Quantité.....	83
Potentiel.....	84

CHAPITRE IX

ÉLECTROMÈTRES ABSOLUS

Nouvel électromètre absolu de Sir W. Thomson.....	87
Détermination des potentiels par l'électromètre absolu.....	90
Électromètre portatif de Sir W. Thomson.....	92
But de la charge du disque.....	96

CHAPITRE X

BOUTEILLE DE LEYDE

Bouteille de Leyde.....	98
Charge résiduelle.....	100
Comparaison mécanique.....	101
Effet des chocs.....	101
Superposition de différentes charges.....	104
Analogie mécanique.....	105
Effet de la température.....	105
Analogie entre la bouteille de Leyde et une tige déformée.....	106
Autres condensateurs.....	106
Capacité.....	107
Unité C. G. S. de capacité.....	108
Capacité de deux sphères concentriques.....	108

CHAPITRE XI

CAPACITÉ INDUCTIVE SPÉCIFIQUE

Introduction.....	109
Expériences de Cavendish.....	112
Comparaison des « plateaux d'épreuve ».....	114
Comparaison du plateau d'épreuve et de la sphère.....	116
Diffusion de l'électricité par les bords.....	117
Les expériences.....	118
Condensateurs cylindriques.....	124
Effet de la température.....	125

Effet des variations de charge.....	126
Expériences de Faraday.....	126
Expériences de Gibson et Barclay.....	130
Le platymètre.....	130
Conduite de l'expérience.....	136
Le condensateur à glissement.....	136
Les condensateurs à paraffine.....	138
Expériences de Boltzmann. — Méthode du condensateur.....	139
Durée de la charge.....	143
Condensateur à mercure.....	144
Matières imparfaitement isolantes.....	144
Résultats.....	144
Expériences de Boltzmann. — Méthode d'attraction.....	144
Théorie générale.....	145
Instruments perfectionnés.....	148
Réglage de la charge.....	150
Électromètre à décharges.....	151
Charges de courte durée.....	151
Charges alternatives rapides.....	152
Manière de couler les balles.....	152
Corrections.....	153
L'électrisation.....	154
Effet d'une charge prolongée.....	155
Résultats.....	155
Soufre cristallisé.....	157
Continuation, par Romich et Fajdiga, des expériences de Boltzmann (effet de la surface des balles).....	158
Continuation, par Romich et Nowak, des expériences de Boltzmann (effet de la durée de charge).....	159
Expériences de Schiller.....	161
Expériences de Silow.....	162
Expériences de Wüllner.....	165
Conclusions générales de Wüllner.....	166
Expériences de Hopkinson.....	167
Le condensateur à anneau de garde.....	168
Comparaison des condensateurs.....	169
Résultats.....	170
Expériences de Gordon.....	171
La balance d'induction statique.....	171
Théorie de la balance d'induction.....	172
Formule de calcul.....	175
Les inversions de courant.....	177
Détails des communications.....	178
Détails de la balance d'induction.....	179
Le mécanisme du chariot.....	182
Le couvercle de laiton.....	182



TABLE DES MATIÈRES.

669

Le compas d'épaisseur.....	190
Les diélectriques.....	190
La force électro-motrice.....	190
Spécimen d'observations.....	190
Résultats.....	191
Résumé des expériences sur l'ébonite.....	192
Cavités de la paraffine.....	192
Sulfure de carbone.....	194
Changements lents dans la capacité inductive spécifique du verre....	194
Capacité inductive spécifique des gaz.....	198
Expériences de Boltzmann.....	198
Le condensateur.....	198
Théorie des expériences.....	199
Formule de calcul.....	200
Effet de la densité du gaz.....	202
Détails d'expérience.....	203
Pouvoir isolant de l'air.....	204
Conduite des expériences.....	205
Résultats.....	205
Expériences d'Ayrton et Perry.....	207
Le condensateur ouvert.....	207
Le condensateur fermé.....	208
Méthode de comparaison.....	209
Résultats.....	212
TABLE GÉNÉRALE DES CAPACITÉS INDUCTIVES SPÉCIFIQUES.....	214

APPENDICES AU CHAPITRE XI

I. — THÉORIE MATHÉMATIQUE DE LA MÉTHODE D'ATTRACTION DE BOLTMANN.	216
* II. — EXPÉRIENCES DE M. GAUGAIN SUR LA CAPACITÉ INDUCTIVE SPÉCIFIQUE ET LA CHARGE RÉSIDUELLE.....	225
Appareils.....	225
Expériences : Condensateurs à air.....	226
Condensateurs à diélectrique solide.....	226
Étude de la charge maxima.....	227
Étude de la charge minima.....	229
Charge résiduelle.....	233

\* APPENDICES A LA PREMIÈRE PARTIE

I. — SUR L'ÉTHER.....	236
II. — REMARQUE SUR L'ÉLECTROMÈTRE A QUADRANTS.....	238
Électromètre symétrique.....	240
III. — ÉLECTROMÈTRE CAPILLAIRE.....	240
Principe.....	241
Description.....	243
Mesure des différences de potentiel.....	245
Application.....	247

Constance et sensibilité de l'instrument.....	247
Mesure de très petites forces électromotrices.....	247
Applications diverses.....	248
ÉLECTROMÈTRE CAPILLAIRE DE M. DEBRUN.....	248
V. — APPAREILS POUR L'ÉTUDE DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.....	250
Collecteurs.....	250
Électromètres.....	251
Électromètre enregistreur.....	252
Résultats.....	253
— DES MACHINES TRANSFORMANT EN ÉLECTRICITÉ LE TRAVAIL MÉCANIQUE.....	254
Principe.....	254
Multiplicateurs d'induction.....	255
Rechargeur de Thomson.....	256
Multiplicateur à gouttes d'eau.....	257
Machine de Holtz.....	257
I. — DÉFINITIONS ET FORMULES ÉLECTRO-STATIQUES. — APPLICATIONS	
NUMÉRIQUES.....	258
Champ électrique.....	258
Force électrique résultante.....	258
Potentiel électrique.....	258
Surfaces équipotentiellles.....	259
Lignes de force.....	260
Relation entre les lignes de force et les surfaces équi- potentiellles.....	261
Densité électrique.....	261
Relation entre la densité et la force résultante à la surface d'un conducteur.....	261
Pression ou tension électrique.....	262
Force électro-motrice.....	262
Capacité d'un conducteur.....	262
Accumulateurs et condensateurs.....	262
Formules pour la capacité des condensateurs absolus à air.....	263
Condensateurs à diélectrique quelconque.....	264
Équation de l'équilibre électrique.....	264
Condensateurs chargés par la pile.....	264
Condensateurs reliés en surface.....	265
Condensateurs reliés en cascades.....	265
Énergie électrique.....	266
Unité d'énergie.....	267
Unité de chaleur.....	267
Équivalent mécanique de la chaleur.....	267
Applications numériques.....	267
Potentiel d'un élément Daniell.....	267
Attraction de deux disques électrisés.....	268
Capacités de divers condensateurs.....	269
Potentiel des machines électriques.....	270

Disques et sphères chargés avec les machines.....	270
Énergie d'un condensateur.....	271
Mesure des effets mécaniques et calorifiques de la décharge..	272

## DEUXIÈME PARTIE

## MAGNÉTISME

## CHAPITRE XII

## MAGNÉTISME. — EXPÉRIENCES PRÉLIMINAIRES

Expériences.....	273
* Dénominations diverses des pôles.....	274
Aimantation.....	275
* Touche séparée et double touche.....	276
Inséparabilité des pôles.....	277
Égalité d'intensité des pôles.....	278
Champ magnétique.....	279
* Définition précise des pôles.....	279
* Intensité d'un champ magnétique.....	280
Couple.....	280
Moment.....	281
Détermination du moment magnétique d'un aimant.....	282
Cas de l'aimant brisé en morceaux.....	284
Potentiel magnétique.....	285
Induction magnétique.....	286
* Armatures et contact.....	287
Intensité d'aimantation.....	288
Aimants Jamin.....	289
Unités magnétiques dans le système C. G. S.....	289
Unité de pôle.....	289
Unité de moment.....	290
Notation de l'exposant.....	290
Unité d'intensité d'aimantation.....	292
Unité d'intensité de champ.....	293
Maximum d'aimantation permanente.....	293
Force exercée par la terre sur une aiguille de boussole.....	294
Solénoïdes magnétiques.....	294
Couches magnétiques.....	296
Angle solide.....	297
Détermination expérimentale des lignes de force magnétique.....	299
..... * CHAPITRE XII (suite).	
Loi de la force magnétique.....	303
Balance de torsion.....	303

Méthode des oscillations .....	304
Vérifications de la loi .....	305
Preuves indirectes de la loi de l'inverse carré .....	305
Aimants de Gauss .....	306
Fantômes magnétiques .....	307
Mesure des moments magnétiques .....	307
Balance de torsion .....	307
Méthode des oscillations .....	307
Moments d'inertie .....	308
Méthode des déviations .....	309
Méthode de M. Bouty .....	310
Distribution du magnétisme .....	311
Méthodes et résultats de Coulomb .....	311
Méthodes modernes .....	314
Procédé d'aimantation .....	314
Méthodes d'observation .....	315
Constitution des aimants d'après M. Jamin .....	316
Rôle de la section moyenne et des surfaces polaires ..	316
Rôle des armatures .....	319
Faisceaux magnétiques .....	320
Armatures appliquées à des faisceaux tout formés ..	321
Contact. — Force portative .....	322
Règles pour la construction des aimants .....	323
Grand aimant de M. Jamin .....	323
Conductibilité magnétique .....	324
Aimants circulaires et elliptiques .....	326
Distribution intérieure du magnétisme .....	328
Aimantations superposées .....	330

## \*APPENDICE AU CHAPITRE XII

Aimantation par induction .....	333
Aimantation temporaire et permanente .....	334
Substances paramagnétiques et diamagnétiques .....	334
Coefficient d'aimantation induite .....	335
Applications numériques .....	336
Limite d'aimantation .....	337
Travaux de Müller, Weber, Maxwell et Rowland .....	337
Résultats et conséquences numériques .....	339
Expériences de M. Bouty .....	341
Influence de la température .....	342
Influence des actions moléculaires .....	344
Effets moléculaires déterminés par l'aimantation .....	345
Magnétisme et torsion .....	346
Explication de l'aimant de Galilée .....	347

CHAPITRE XIII

MAGNÉTISME TERRESTRE. — NOTICE HISTORIQUE

Intrôduction.....	349
Observations anciennes de déclinaison.....	350
— — d'inclinaison.....	352
— — d'intensité.....	355

CHAPITRE XIV

MAGNÉTISME. — MÉTHODES EXPÉRIMENTALES MODERNES

Quantités à observer.....	356
Instruments. — Le magnétomètre unifilaire.....	357
Détermination de la force horizontale avec le magnétomètre unifilaire..	357
Théorie.....	357
Observations de déviation.....	361
Observations d'oscillation.....	366
Corrections.....	371
Spécimen d'observations.....	372
Détermination de la déclinaison au moyen du magnétomètre unifilaire..	37
Ramener au repos un aimant qui oscille.....	380
Inclinaison et force totale. — Cercle de Barrow.....	383
Détermination de l'inclinaison au moyen du cercle de Barrow.....	383
Détermination de la force totale au moyen du cercle de Barrow.....	386
Observations à la mer. — Cercle de Fox.....	390
Manière de se servir du cercle de Fox.....	393
Détermination de l'inclinaison avec le cercle de Fox.....	394
— — l'intensité.....	395

CHAPITRE XV

MAGNÉTOMÈTRES ENREGISTREURS

�l�ments à enregistrer.....	398
Enregistrement de la déclinaison.....	398
— de la force horizontale.....	400
— de la force verticale.....	403
Détails.....	404
Spécimen des résultats.....	404

CHAPITRE XVI

OBSERVATIONS RELATIVES AU MAGNÉTISME TERRESTRE

Variations séculaires de la déclinaison.....	406
— de l'inclinaison.....	409
— de la force.....	409
Variations périodiques.....	410
Séparation de différentes périodes.....	411
Variations périodiques de la déclinaison.....	411
— de l'inclinaison.....	412
GORDON. �lectricit�.....	I. — 43

Inégalités diurnes .....	412
Inégalités diurnes lunaires.....	413
Effet des taches du soleil.....	414
Aurores boréales.....	415
Observations de Broun.....	415

## \*APPENDICE AU CHAPITRE XVI

Observations sur le magnétisme terrestre en France.....	417
Déclinaison.....	418
Inclinaison.....	418
Carte de la déclinaison magnétique en France.....	421
Force horizontale.....	421
Force totale.....	421
Moyennes mensuelles aux heures d'observation en janvier 1879.....	422
Changements horaires moyens de la déclinaison en 1875-76.....	422

## CHAPITRE XVII

COURANTS TERRESTRES.....	423
--------------------------	-----

## TROISIÈME PARTIE

## ÉLECTRO-CINÉTIQUE

## CHAPITRE XVIII

## LA PILE VOLTAÏQUE

Courant électrique.....	425
La pile voltaïque est une machine qui maintient une différence de potentiel constante.....	426
Les deux théories de son action.....	426
Élément voltaïque simple.....	428
Zinc amalgamé.....	429
Vis d'attache.....	430
Élément de Smée.....	431
Élément au bichromate de potasse.....	431
Élément à deux liquides.....	433
Élément de Grove.....	433
Élément de Bunsen.....	435
Élément de Daniell.....	436
Élément à auge de Thomson.....	440
Élément Leclanché.....	442
Élément au bichromate à deux liquides.....	443
Élément au chlorure d'argent.....	443
Élément de Poggendorff.....	448
Élément de Byrne.....	449

TABLE DES MATIÈRES.

675

Élément étalon de Latimer Clark.....	450
Température .....	450
Construction .....	451
Piles à plusieurs éléments.....	452
Accouplement en « série ».....	452
Entretien d'une pile de Grove.....	453
Effets des courants : électriques, calorifiques, chimiques, magnétiques.	454
Représentation conventionnelle d'une pile.....	455
Table des forces électro-motrices de divers éléments .....	456

\* APPENDICE AU CHAPITRE XVIII

Autres formes de l'élément Daniell.....	457
Modèle ordinaire .....	457
Élément étalon .....	458
Pile Reynier .....	458
Autres formes de la pile de densité.....	461
Élément Minotto .....	461
Élément Callaud .....	462
Élément Marié-Davy.....	463
Élément Leclanché perfectionné .....	463
Élément au chlorure de chaux.....	464
— au calomel.....	464
— Clark et Muirhead.....	465
— Füller.....	465
— Cloris Baudet.....	465

CHAPITRE XIX

ACTION DES COURANTS SUR LES AIMANTS. — COMMUTATEURS.

GALVANOMÈTRES

Action sur les aimants .....	437
Commutateurs.....	438
Commutateur à chevilles.....	471
— à rouleau.....	472
Cleps à ressort .....	474
Commutateur rapide.....	477
Galvanomètres.....	478
Classification.....	478
Le galvanomètre des tangentes.....	478
Théorie.....	479
Forme pratique .....	485
Galvanomètres sensibles .....	488
Aiguille astatique.....	488
Galvanomètres à réflexion de Sir W. Thomson.....	493
Galvanomètre à trépied.....	493
— astatique.....	495
— marin.....	495

Galvanomètre balistique .....	496
— différentiel .....	497

## \*APPENDICE AU CHAPITRE XIX

Commutateur carré .....	498
Électro-diapason interrupteur .....	498
Mesure des courants .....	502
Galvanomètres des tangentes (formule de correction).....	503
Boussole de Gaugain .....	503
Boussole des tangentes ordinaire (correction).....	504
Sensibilité de la boussole des tangentes.....	505
Boussole des sinus .....	505
Construction des galvanomètres sensibles.....	506
Galvanomètres aperiodiques .....	508
Galvanomètre différentiel .....	508
Galvanomètre Deprez .....	509
Mesure des courants instantanés .....	510
Courants successifs .....	511
Mesure de la capacité électrique .....	511
Résistance de l'air.....	512

## CHAPITRE XX

## RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE ET UNITÉS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

Loi de Ohm .....	513
Mesure électro-statique de résistance .....	514
Mesure électro-magnétique de courant .....	515
— — quantité.....	516
— — potentiel et force électro-motrice.....	516
— — résistance.....	517
— — capacité.....	517
Unités électro-magnétiques pratiques. — Weber, Volt, Ohm, Microfarad.	517
Relations entre les unités pratiques.....	519

## \*APPENDICE AU CHAPITRE XX

Force électro-motrice et énergie.....	520
Loi de Joule.....	521
Relations entre les grandeurs électriques.....	521
Système électro-statique.....	522
Système électro-magnétique.....	522
Unités pratiques.....	523
Transformations des formules et applications numériques.....	524

## CHAPITRE XXI

## DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE RÉSISTANCES

Pont de Wheatstone.....	526
Théorie.....	528



TABLE DES MATIÈRES.

677

Formes pratiques du pont de Wheatstone.....	532
Pont à curseur.....	532
Bobines de résistance.....	534
Boîte de résistances avec pont.....	537
Mode d'attache des fils fins.....	541
Clefs de contact.....	541
Fractions d'unité.....	542
Boîte de résistance, modèle à cadrans.....	542
Résistance à curseur de Thomson et Varley.....	544
Résistance spécifique.....	546
Tables de résistances en unités C. G. S.....	547
Dérivations des galvanomètres.....	548
Théorie des dérivations.....	549
Construction d'une série de dérivations.....	552
Résistance de compensation.....	555
Méthode de Sir W. Thomson pour la détermination de la résistance d'un galvanomètre.....	556
Méthode de Mance pour la détermination de la résistance d'une pile...	558
De la meilleure manière d'accoupler les éléments de pile pour un objet déterminé.....	559
Unité de résistance Siemens.....	567

\* APPENDICE AU CHAPITRE XXI

Lois de Ohm.....	568
Courants dérivés.....	568
Dérivations des galvanomètres.....	569
Formule de mérite d'un galvanomètre à réflexion.....	570
Constante d'un galvanomètre à réflexion.....	570
Mesures de très grandes résistances.....	570
Lois de Kirchhoff.....	571
Méthode de compensation.....	571
Potentiomètre de Clark.....	572
Comparaison des forces électro-motrices.....	573
Résistance intérieure des piles.....	574
Corollaires de Bosscha.....	575
Résistances spécifiques.....	576
Résistance spécifique rapportée à l'unité de volume.....	576
— — — — — à l'unité de masse.....	576
Effet de la température.....	577
Résistance des diélectriques.....	578

CHAPITRE XXII

ÉLECTRO-MAGNÉTISME. — NOTIONS PRÉLIMINAIRES

Aimant équivalent à un courant.....	580
Électro-aimant.....	580
Action mutuelle de deux courants.....	581

Induction électro-magnétique d'un aimant sur un fil mobile.....	581
— — — d'un aimant mobile sur une bobine fixe..	582
— — — d'une bobine mobile traversée par un courant sur une bobine fixe.....	583

## \* NOTES

Équivalence des aimants et des courants.....	585
Extension aux courants finis.....	585
Solénoïdes.....	586
Aimantation.....	586
Aimants et solénoïdes.....	587
Action mutuelle de deux courants.....	588

## CHAPITRE XXIII

## LE TÉLÉPHONE ET LE MICROPHONE

Téléphone de Bell.....	589
Microphone de Hughes.....	591

## \* APPENDICE AU CHAPITRE XXIII

Communications téléphoniques.....	593
Téléphone de Gower.....	594
Description.....	594
Installation.....	595
Signal visible d'avertissement de M. Ader.....	596
Téléphone Edison.....	598
Description.....	598
Installation.....	600
Lignes téléphoniques.....	601
Emploi du téléphone comme galvanoscope.....	601
Micro-tasimètre ou thermoscope d'Edison.....	602

## CHAPITRE XXIV

BALANCE D'INDUCTION VOLTAÏQUE DE HUGHES.....	605
--	-----

## \* APPENDICE AU CHAPITRE XXIV.

Balance d'induction.....	608
Expériences.....	609
Sonomètre électrique.....	612
Coefficients d'induction spécifiques.....	612

## CHAPITRE XXV

DÉTERMINATION DE L'INDUCTION ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE.....	614
--	-----

## \* NOTES

Force électro-magnétique.....	616
Force électro-motrice d'induction.....	617

TABLE DES MATIÈRES.

679

CHAPITRE XXVI

UNITÉ DE RÉSISTANCE DE L'ASSOCIATION BRITANNIQUE

Théorie — Rails et curseur.....	619
Méthodes pratiques de détermination.....	622
Demi-cercle tournant.....	623
Anneau tournant.....	625
Rapport du comité.....	626
Description de l'appareil.....	627
Le mécanisme moteur.....	627
La bobine tournante.....	628
Le compteur.....	630
L'aimant suspendu.....	630
L'échelle et la lunette.....	631
La balance électrique.....	632
La clef de contact.....	636
Détails.....	637
Détermination de la déviation.....	637
Corrections.....	638
Conduite de l'expérience.....	641
Résultat.....	642
Émission des unités B. A.....	643
Choix des métaux et alliages.....	643
Achèvement de l'étalon et son dépôt à Kew.....	646

\* NOTES

Unité électro-magnétique de résistance.....	646
Courant induit par la rotation d'un circuit vertical.....	647
Méthode de Sir W. Thomson.....	648

CHAPITRE XXVII

ACTION MUTUELLE DES COURANTS ET ACTION ENTRE COURANTS ET AIMANTS	650
--	-----

\* NOTES

Champ magnétique produit par un courant.....	653
Action d'un champ magnétique sur un conducteur fermé.....	653
Loi générale de l'action mécanique des courants entre eux et entre courants et aimants.....	654

CHAPITRE XXVIII

RELATION ENTRE LA VARIATION DU POTENTIEL ET L'INTENSITÉ DU COURANT.	655
---	-----

\* APPENDICE AU TOME PREMIER

Électromètre symétrique de M. Mascart.....	658
Description.....	658
Réglage et mise en expérience.....	659
Isoloirs Mascart.....	664

# TABLE DES PLANCHES

## DU TOME PREMIER

I.	Balance de torsion de Coulomb.....	49
II.	} Electromètre à quadrants de Thomson.....	61 et 63
III.		
IV.	Électromètre absolu de Thomson.....	86
V.	Électromètre portatif de Thomson.....	93
VI.	} Appareil de Gibson et Barclay pour la détermination des capacités inductives spécifiques.....	132 et 133
VII.		
VIII.	Diagramme de la balance d'induction statique.....	173
IX.	Communications de la balance d'induction.....	184
X.	Balance d'induction.....	187
XI.	Lignes de force magnétique.....	301
XII.	} Magnétomètre unifilaire { disposé pour la déviation.....	360
XIII.		
XIV.	} Cercle de Barrow { disposé pour l'inclinaison.....	382
XV.		
XVI.	Cercle de Fox.....	391
XVII.	} Magnétomètres enregistreurs.....	400 et 401
XVIII.		
XIX.	Graphique magnétométrique.....	405
*XIX bis.	Carte de la déclinaison magnétique en France.....	420
XX.	Action des courants sur les aimants.....	469
XXI.	Commutateur rapide.....	476
XXII.	Galvanomètre à réflexion de Thomson.....	492
XXIII.	Bobine-étalon de résistance.....	535
XXIV.	Balance d'induction voltaïque de Hughes.....	604
XXV.	Appareil d'induction pour la détermination de l'unité B. A. ...	627
*XXV bis.	Électromètre symétrique de M. Mascart.....	661

### FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES DU TOME PREMIER

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