

Auteur ou collectivité : Piérard, Émile

Auteur : Piérard, Émile

Titre : Cours d'électricité et de magnétisme. Tome I, Théories générales : électrostatique, magnétisme, électromagnétisme, unités et mesures

Adresse : Bruxelles : Ramlot ; Paris : Dunod et Pinat, 1907

Collation : 1 vol. (358 p.) ; 24 cm

Cote : CNAM-BIB 8 Ca 398

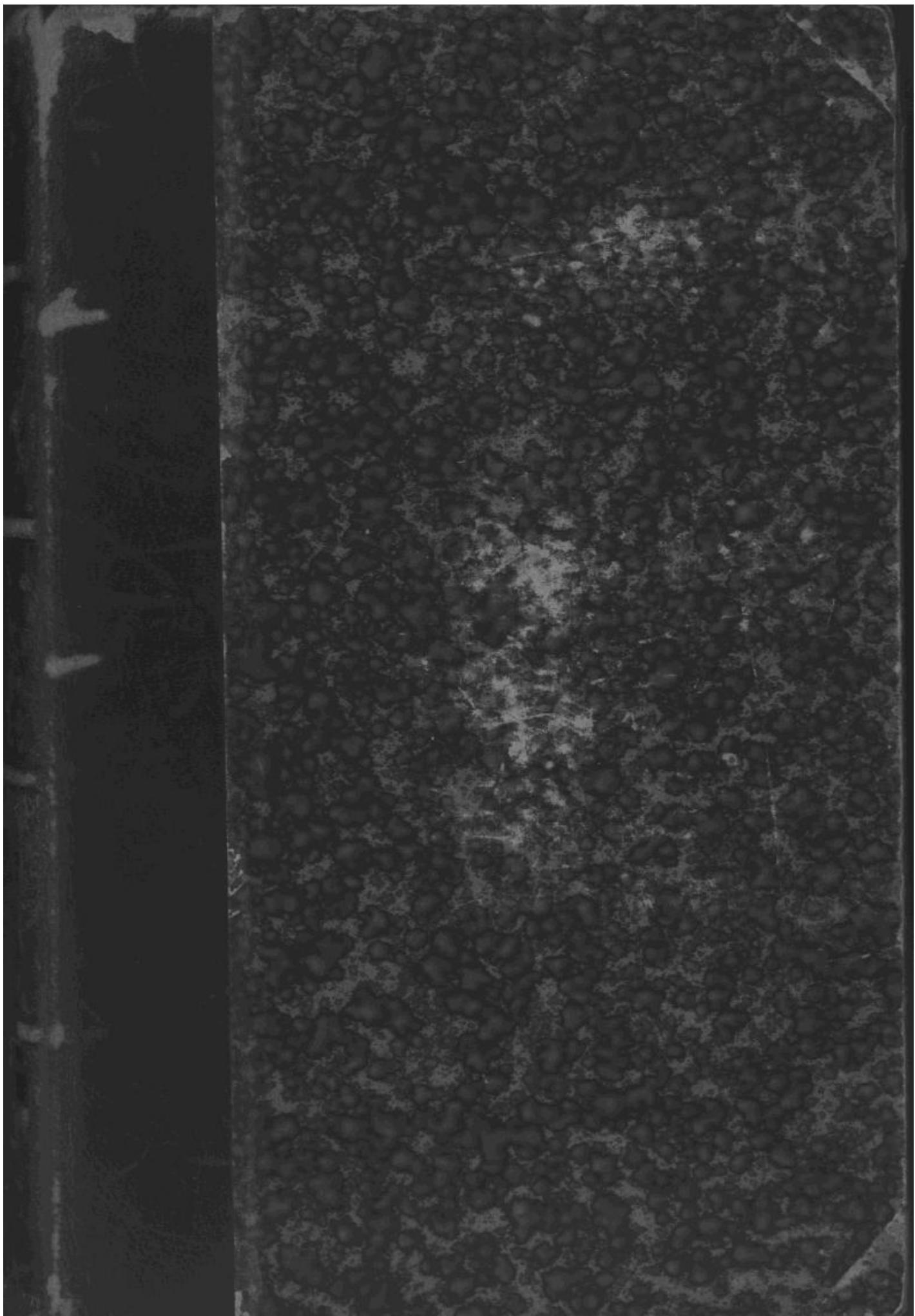
Sujet(s) : Électricité ; Magnétisme ; Électrostatique ; Électromagnétisme

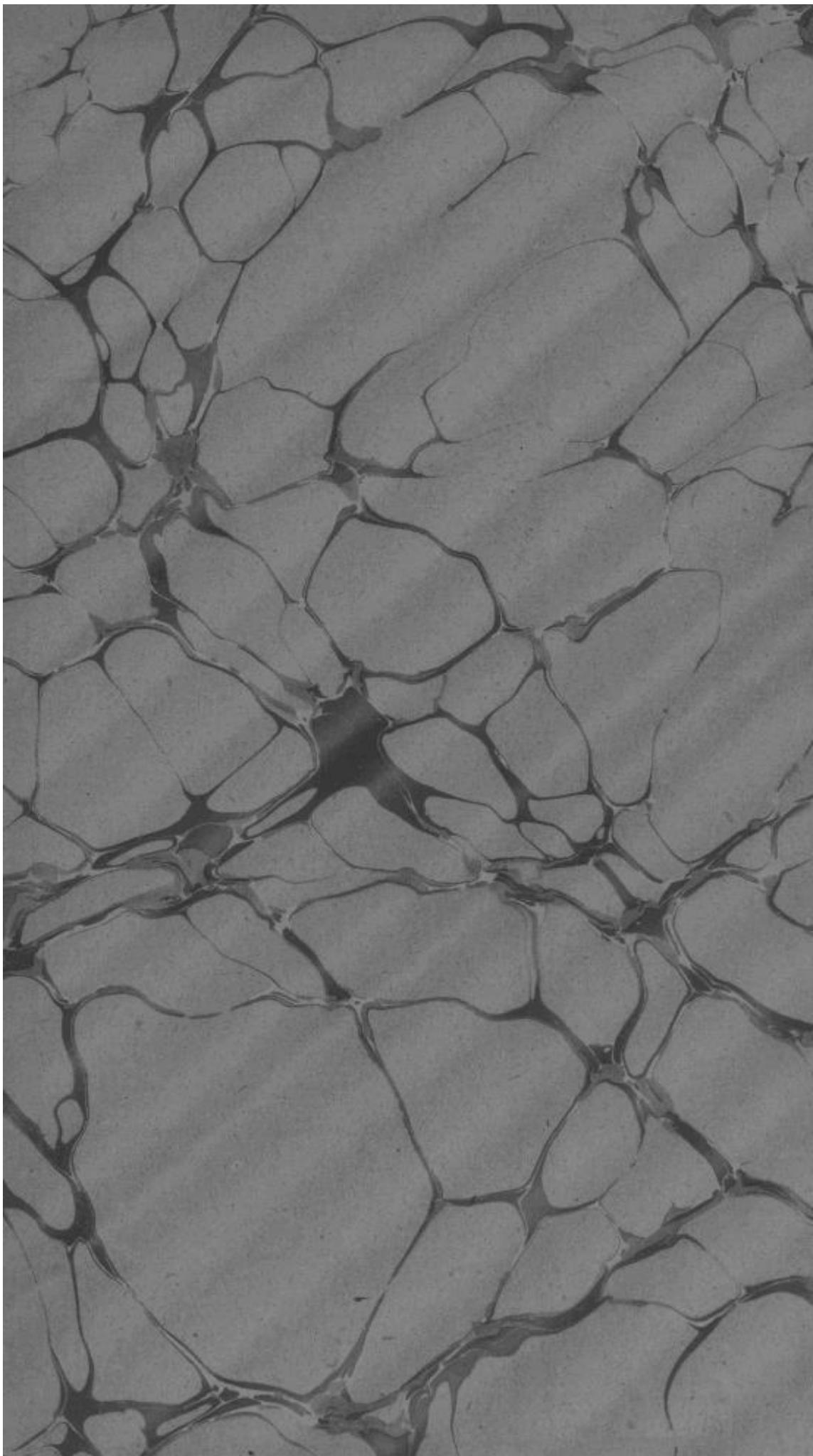
Langue : Français

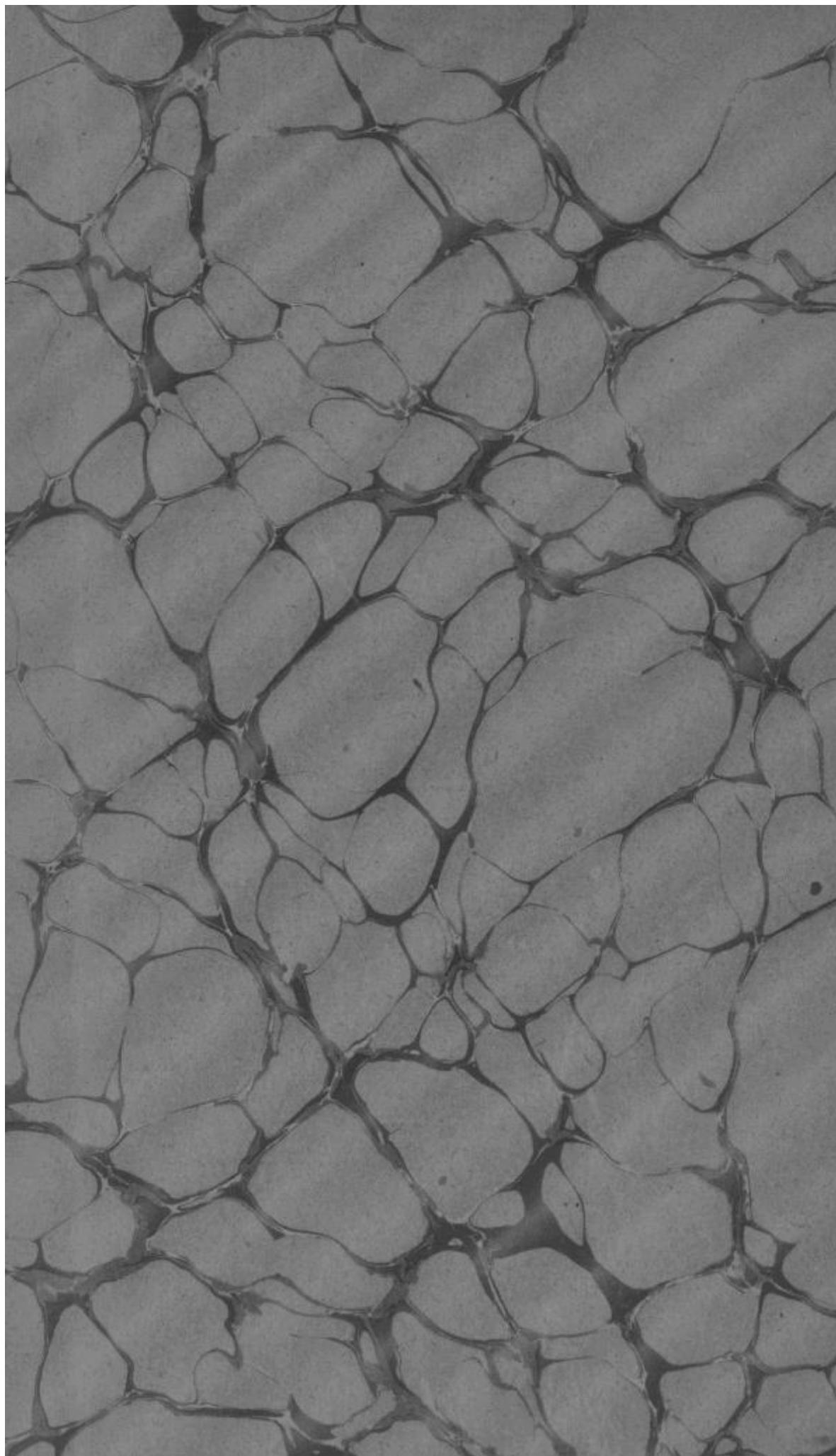
Date de mise en ligne : 18/07/2018

Date de génération du document : 18/7/2018

Permalink : http://cnum.cnam.fr/redir?8CA398_TOME1







Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

COURS
d'Électricité et de Magnétisme

8- Ca 398

COURS D'ÉLECTRICITÉ & DE MAGNÉTISME

PAR

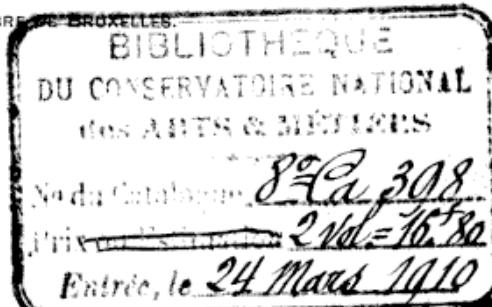
EMILE PIERARD,

INGÉNIEUR HONORAIRE DES MINES,
INGÉNIEUR-ÉLECTRICIEN SORTI DE L'INSTITUT MONTEFIORE,
DIRECTEUR DE SERVICE TECHNIQUE A L'ADMINISTRATION DES TÉLÉGRAPHES BELGES,
PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES.

AVEC UNE PRÉFACE DE

M. JAMES VANDRUNEN,

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES.



THÉORIES GÉNÉRALES

Electrostatique. — Magnétisme. — Electromagnétisme.

Unités et mesures.



Prix : DIX francs

RAMLOT,
25, rue Grétry, 25
BRUXELLES

DUNOD & PINAT,
49, Quai des Grands Augustins, 49
PARIS

1907

Impr. H. Vaillant-Carmanne (s. a.), Liège.

PRÉFACE.

Le nombre des ouvrages qui, sous la forme de manuels élémentaires ou de traités développés, prétendent exposer certaines parties de la science de l'électricité est devenu si considérable, et ces travaux sont de conceptions si diverses que, vraiment, l'apparition d'un nouveau volume dans cette littérature spéciale n'est point sans inquiéter ou alarmer.

Le lecteur conscientieux, celui qui, par profession ou par intérêt, essaie de se tenir au courant du mouvement et des nouveautés, reste effaré devant la persistante continuité de productions devenues encombrantes et surtout déconcertantes par leur nombre comme par leur variété.

Pour se faire une place sérieuse, un traité d'électricité, actuellement, doit justifier de qualités toutes spéciales, avoir un objectif bien déterminé, répondre à des exigences nouvelles et particularisées.

Ces qualités marquent très heureusement et sans aucun doute, le *Cours d'Électricité et de Magnétisme* que M. Émile Pierard, professeur à l'Université Libre de Bruxelles, se décide à livrer à l'attention publique.

Nous n'insisterons pas sur l'utilité impérieuse que présente pour tous, ingénieurs, industriels, étudiants, un traité condensé qui soit, en cette matière, nettement et clairement pratique.

Des considérations générales sur la science de l'électricité et sur le nombre toujours croissant de ses applications dans tous les domaines de l'activité humaine, sont devenues banales. Le fait est, pour tous, l'évidence. Affirmer que l'électricité sera

le facteur premier et souverain de notre organisation industrielle, c'est reprendre un lieu commun. Pour tous, il est manifeste que l'électricité prépare la révolution la plus grande qui aura jamais transformé notre effort producteur. Toutes les industries, les transports comme la chimie appliquée, la force motrice comme l'éclairage, les mines comme les manufactures, sont dès à présent tributaires de la machine dynamo-électrique; la métallurgie sera, au cours de ce siècle, intégralement renouvelée; déjà, elle abandonne peu à peu ses anciens procédés pour prendre, par l'électrolyse et le four électrique, un développement que nous devinons extraordinaire.

Par cette action universelle, le nouveau facteur exercera naturellement une action capitale sur les faits économiques toujours connexes à la science appliquée, et, par conséquent, l'électricité, devenue usuelle, étendra ses résultantes dans les questions sociales, — puisqu'une nouvelle forme de travail sera créée.

Cette conquête de l'industrie justifie l'ardeur et la curiosité avec lesquelles se poursuivent les études et se publient ces innombrables volumes qui embarrassent l'attention.

Le lecteur est hésitant par ce que, malheureusement, peu de ces ouvrages sont inspirés par un sentiment vrai de l'utilité générale et de la mise en pratique des connaissances ainsi acquises. Parmi les auteurs, les uns sont des hommes trop spécialistes, qui localisent leurs études; d'autres sont, avant tout, des théoriciens: ils font œuvre de docteurs et de savants et non d'ingénieurs ou de praticiens. Dans l'amas de ces œuvres compliquées et transcendantes, manque un ouvrage sans hautes prétentions à la doctrine académique et qui soit intermédiaire entre la science solennelle et la pratique toute sèche.

Pour réaliser cette œuvre si désirable, il fallait un esprit qui, tout en étant fortement documenté, possédât, en même

temps, la pratique usuelle, — et aussi l'habitude de l'enseignement. M. Émile Pierard réunit excellement ces conditions peu habituées à voisiner. Le succès de ses leçons autant que la juste renommée de ses ouvrages antérieurs, le désignaient pour nous donner le traité utile élaboré effectivement pour ceux qui ne sont pas des spécialistes exclusifs.

L'impression que nous a laissée la lecture de ce *Cours d'Électricité et de Magnétisme*, nous a convaincu que l'auteur a pratiquement compris ce programme et l'a exécuté avec une méthode et une clarté qui touchent à la perfection.

Dans cet exposé, où les complications sont nombreuses et profondes, les mathématiques interviennent comme un auxiliaire précieux et sûr, comme un moyen : c'est le levier qui soulève l'obstacle, l'écarte et permet le passage.

M. Pierard s'est gardé avec soin de ces dissertations et discussions algébriques où se complaissent des théoriciens qui voient surtout dans les phénomènes des sujets à développement d'équations originales. Le défaut de ces livres est, pour la généralité des esprits, un excès de science.

Si, par contre, le même phénomène est exposé par un physicien pur, par un homme de laboratoire, les lois et leurs démonstrations sont données d'une façon égale et uniforme, sans souci de l'importance plus ou moins grande que ces lois doivent avoir dans la pratique. C'est ainsi, par exemple, que les lois de Kirchoff, exposées par un expérimentateur, passent sans être suffisamment soulignées. On comprend ces lois, mais on ne sait pas leur rôle notable dans la plupart des problèmes. L'étudiant restera même incapable de faire de ces principes des courants dérivés une application, — qui sera probablement un des premiers écueils auxquels il se heurtera, quand il se trouvera seul devant la pratique.

M. Pierard qui, par expérience, a constaté ces faiblesses,

veut armer ses élèves pour vaincre de pareilles difficultés. Pour cela, il marque nettement les valeurs respectives des faits et des lois; il indique les points essentiels; il insiste sur leur utilité; il développe particulièrement les notions capitales en donnant des exemples qui montrent bien le maniement des formules.

L'élève, qui aura suivi les avis de ce sage enseignement, possèdera à fond ce qui constituera plus tard, pour lui, les notions fondamentales, essentielles à toutes résolutions de problèmes.

Nous signalerons encore, parmi les chapitres heureusement élucidés et simplifiés par cet habile professeur, la question complexe et si souvent confuse de la détermination et de la précision des signes dans le potentiel, question délicate que trop souvent les auteurs ne détaillent pas suffisamment et qui, dans le présent ouvrage, est indiquée avec une clarté affirmant bien le talent d'exposition et la netteté démonstrative de l'auteur.

C'est de cette façon lumineuse et attrayante que M. Pierard fait connaître les théories principales de l'électrostatique et du magnétisme, décrit les appareils de mesure, montre leur usage, définit les unités et enseigne la détermination des intensités, des résistances, des forces électromotrices, capacités et coefficients d'induction.

En résumé: ouvrage clair, contenant les notions essentielles, fondamentales, vitales même, que dès maintenant tout ingénieur, tout aspirant-électricien (et qui ne l'est plus aujourd'hui?) doit posséder.

JAMES VANDRUNEN.

PRÉFACE DE L'AUTEUR.

Indiquons nos principales sources, auxquelles le lecteur pourra toujours utilement recourir. Nous avons mis à contribution, pour mettre le présent ouvrage sur pied : le livre « *Électricité* » de M. EDOUARD DACREMONTE, les « *Leçons sur l'Électricité* » 7^e édition, de M. ERIC GERARD et plus particulièrement l'excellent « *Traité élémentaire d'Électricité* » 3^e édition, de JOUBERT. Citons aussi le très clair « *Précis de la théorie du magnétisme et de l'Électricité* » de M. A. NOUGUIER, enfin « *Résistance, inductance et capacité* » de M. J. RODET.

* * *

On remarquera que, dès le début, nous avons rappelé les deux dogmes proclamant la disparité et l'indestructibilité de la matière et de l'énergie, bien qu'ils aient été fortement battus en brèche ces dernières années, depuis l'étude des substances radio-actives.

Mais à la vérité, la dématérialisation de la matière et sa transformation en énergie⁽¹⁾ sont d'une lenteur telle, qu'elles n'interviennent pas d'une manière appréciable dans les phénomènes immédiats ou de durée restreinte que nous aurons à examiner.

Dans les limites pratiques où nous nous cantonnerons, on peut donc continuer à les admettre sans restriction, tout particulièrement le fécond principe de la conservation de l'énergie, que nous aurons plus d'une fois l'occasion d'appliquer.

E. P.

⁽¹⁾ Dr GUSTAVE LE BOY. *L'Évolution de la Matière*. Ernest Flammarion, Paris, 1906.

DU MÊME AUTEUR :

La Téléphonie. Ouvrage couronné par l'Association des Ingénieurs sortis des Écoles spéciales de Liège. Deuxième édition, in-8°, 491 pages, 318 figures dans le texte. Prix fr. 10 00

Principes d'Électrotechnie. Cours d'électricité industrielle professé à l'École polytechnique de Bruxelles. In-8°, 440 pages, 297 figures dans le texte. Prix fr. 10 00

La Télégraphie sans fil à travers les âges (Conférence). Brochure raisin de 31 pages, avec 24 figures dans le texte. Prix fr. 1 50

La pose des lignes en bronze, cuivre, aluminium. Abaques générales des tensions et des flèches. Brochure raisin de 16 pages avec 8 figures et abaques dans le texte. Prix fr. 1 00

L'Électricité et quelques-unes de ses applications. Généralités. Téléphonie. Télégraphie avec et sans fil, Rayons Röntgen et matières radioactives. Syllabus du cours d'Extension universitaire. Deuxième édition. Brochure de 31 pages. Prix fr. 0 75

EN VENTE CHEZ

RAMLOT,
25, rue Grétry, 25
BRUXELLES

DUNOD & PINAT,
49, Quai des Grands Augustins, 49
PARIS

CHAPITRE I.

Généralités. — Unités fondamentales et dimensions.

Matière et énergie. Leur indestructibilité. — Le monde extérieur se manifeste à nos sens par la *matière* et l'*énergie* que celle-ci est capable d'acquérir : énergie *mécanique*, s'il s'agit de masses en mouvement; énergie *thermique* si des phénomènes calorifiques sont en jeu; énergie *chimique*, manifestations provoquées par des modifications de composition; énergie *électrique*, phénomènes dans lesquels l'électricité intervient.

Les anciens avaient établi le principe de l'*indestructibilité de la matière*; les modernes ont démontré que le même principe s'applique à l'énergie : *rien ne se perd, rien ne se crée dans la nature.*

Transformation de l'énergie. — Les diverses espèces d'énergie peuvent se transformer l'une dans l'autre. Par exemple l'énergie mécanique d'une roue hydraulique en mouvement peut être transformée par l'intermédiaire de *générateurs* appropriés en énergie électrique laquelle, envoyée dans des *récepteurs*, pourra se manifester par des phénomènes calorifiques et lumineux dans les lampes électriques; par des effets chimiques dans des cuves électrolytiques; par des effets mécaniques dans des électromoteurs.

La caractéristique de l'énergie électrique est de se prêter avec la plus grande aisance à toutes les transformations et surtout à la distribution et au transport à longue distance de l'énergie, en n'exigeant qu'une installation simple et peu coûteuse représentée par quelques fils métalliques.

Mesure de l'énergie. — Pour se rendre compte des diverses grandeurs énergétiques, il faut pouvoir les comparer, trouver leurs rapports, les mesurer.

Nous nous occuperons d'abord des grandeurs mécaniques. Elles sont en effet les plus usuelles et se présentent à chaque pas dans le domaine de l'électricité.

Évaluation des grandeurs. Mesures directes et indirectes. — L'évaluation d'une grandeur quelconque ne peut se faire qu'en adoptant des unités, dont le rapport à cette grandeur donne la mesure de celle-ci.

Par exemple pour mesurer une longueur, on prend l'unité de longueur et on la porte bout à bout entre les extrémités de la longueur à mesurer. On a effectué ainsi une mesure *directe* ou *relative*.

S'il s'agit d'une surface ou d'un volume, la mesure directe au moyen de l'unité est impossible. On doit alors recourir à une mesure *indirecte* ou *absolue*, en utilisant les propriétés géométriques existant entre les côtés et la forme de la surface ou du volume. Pour un cube, par exemple, la géométrie nous apprend que son volume est égal au cube de son côté. La mesure de ce volume se ramène par conséquent à celle d'une longueur.

Grandeurs mécaniques fondamentales. Système C. G. S. — En parcourant le domaine de la mécanique, on constate que toutes les mesures peuvent se ramener, en dernière analyse, à l'évaluation des trois grandeurs fondamentales : la longueur, la masse, le temps, que l'on représente par les symboles L, M, T.

Leurs unités sont, pour les physiciens, le *centimètre*, la *masse du gramme*, la *seconde*.

L'unité de longueur, le centimètre est la billionième partie du quadrant terrestre et la centième partie du mètre, dont l'étalon est conservé à l'établissement international de Sèvres.

La masse du gramme est représentée sensiblement par celle d'un centimètre cube d'eau distillée au maximum de densité, soit à 4° c. C'est la millième partie du kilogramme étalon également conservé à Sèvres.

La seconde est la 86 400^e partie du jour solaire moyen.

Ces unités sont représentées par les symboles [L], [M], [T], et la désignation du système dont elles forment la base a été tirée des initiales de leurs noms.

REMARQUE. — On prenait naguère, au lieu de la *masse du gramme*, le *gramme-force* comme unité fondamentale.

On a abandonné ce système, parce que d'une part, le *gramme-poids* n'est pas une unité invariable et, d'autre part, parce que la notion de *masse* caractérise mieux la matière que la notion de *force*.

Relation entre la valeur numérique et la grandeur de l'unité employée. — Les quantités que l'on a à mesurer en fonction des unités sont représentées par leur rapport numérique à ces unités ou par le nombre de fois qu'elles les contiennent.

Un temps exprimé en secondes se représente par t [T]. Si l'on adopte une autre unité [T'] la même quantité s'exprimera par $t' [T'] = t [T]$

$$\text{d'où } \frac{t'}{t} = \frac{[T]}{[T']}$$

et l'on voit que *la valeur numérique d'une quantité est en raison inverse de la grandeur de l'unité employée.*

Le simple raisonnement montre, qu'il doit en être ainsi. Si par exemple on adopte une unité de longueur deux fois plus grande, comme elle sera contenue deux fois moins dans une longueur donnée, la valeur numérique de celle-ci se trouvera nécessairement réduite de moitié.

Unités dérivées. Équations de dimensions. — Les unités fondamentales servent à exprimer toutes les autres quantités appelées pour cette raison *quantités dérivées*. La fonction qui les relie porte le nom d'*équation de dimensions*. Cette fonction étant connue, permet de déduire des *unités dérivées* qui serviront à supputer les grandeurs dérivées.

Par exemple l'équation de dimensions pour le volume d'un cube de côté c est

$$V = kc^3.$$

Le facteur k est arbitraire et varie avec les unités choisies pour c et V . Si par exemple c est exprimé en décimètres et V en mètres cubes, $k = \frac{1}{1000}$.

Dans le système C. G. S. si $c = 1$ cm, $V = k$. k est donc le volume d'un cube ayant 1 cm de côté; c'est l'unité dérivée de volume. Cette unité admise, $V = c^3$ cm³, c étant exprimé en cm.

Changement d'unités dérivées. — L'équation

$$[V] = [L^3]$$

est l'équation de dimensions de l'unité dérivée de volume. Cette équation permet de déterminer aisément ce que devient l'unité

dérivée quand on change d'unité fondamentale. Adoptons une autre unité de longueur $[L_1]$ et cherchons quel sera le rapport de la nouvelle unité de volume $[V_1]$ qui en dérive, au centimètre cube. On aura également, la relation précédente étant générale,

$$[V_1] = [L_1^3]$$

d'où en divisant de part et d'autre

$$\frac{[V_1]}{[V]} = \frac{[L_1^3]}{[L^3]}.$$

Si par exemple nous adoptons comme unité de longueur le mètre, c'est-à-dire si $L_1 = 100 L$ on aura

$$\frac{[V_1]}{[V]} = \frac{[(100 L)^3]}{[L^3]} = 1\ 000\ 000.$$

ou

$$[V_1] = 10^6 [V].$$

La nouvelle unité dérivée, le mètre cube, vaut donc un million de fois le centimètre cube.

Réiproquement quel est le rapport entre le mètre et le centimètre étant donné qu'un $m^3 = 10^6 \text{ cm}^3$?

$$\left[\frac{V_1}{V} \right] = 10^6 = \frac{[L_1^3]}{[L^3]} = \text{D'où } \frac{L_1}{L} = 10^2.$$

Le mètre vaut donc 100 cm.

Multiples et sous-multiples. — En plus des multiples et sous-multiples du système métrique : myria, kilo, hecto, déci, centi, milli, on emploie les préfixes *meg* ou *méga* pour indiquer un million de fois plus grand et *micr* ou *micro* qui veut dire un million de fois plus petit.

Principales quantités et unités dérivées géométriques et mécaniques. — **SURFACE S, s.** — Une surface plane à côtés rectilignes se mesure par le produit de deux grandeurs $s = kab$, k étant un coefficient numérique. Equation de dimensions : $[S] = [L] \times [L] = [L^2]$.

L'unité de surface est le centimètre carré. L'unité usuelle la plus employée est le mètre carré.

VOLUME V. — Equation de dimensions

$$[V] = [L^3].$$

L'unité de volume est le centimètre cube ; unité usuelle, le mètre cube.

ANGLE (α , β , ...). — Un angle se mesure par le rapport de l'arc de cercle décrit de son sommet comme centre et intercepté entre ses côtés, au rayon du cercle.

$\alpha = k \frac{l}{r}$; l et r étant toutes deux des longueurs, c'est donc un simple rapport numérique; un angle n'a pas de dimensions. *L'angle unité, appelé radian, est celui pour lequel l'arc est égal au rayon.*

La longueur de la circonférence étant $2\pi r$, l'angle auquel elle correspond est en radians

$$\alpha = \frac{2\pi r}{r} = 2\pi \text{ radians.}$$

Les unités pratiques sont le degré, la minute, la seconde. On a
 $2\pi \text{ radians} = 360^\circ$

d'où $1 \text{ radian} = \frac{360}{2\pi} = 57^\circ 14' 44''$

et $1^\circ = \frac{2\pi}{360} \text{ radian} = 0,01746 \text{ radian.}$

VITESSE (v). — La vitesse d'un mobile animé d'un mouvement uniforme est l'espace parcouru par unité de temps. C'est donc le quotient de l'espace parcouru par le temps correspondant. $v = k \frac{l}{t}$. Si l et t sont égaux à l'unité, $v = k$. k représente la vitesse d'un mobile parcourant l'unité de longueur pendant l'unité de temps. C'est l'unité de vitesse. Dimensions :

$$[v] = \frac{[L]}{[T]} = [L T^{-1}].$$

L'unité C. G. S. de vitesse est le centimètre par seconde (cm : s).

Les unités pratiques sont le mètre par seconde ($m : s$) le mètre par minute ($m : m$) et le kilomètre par heure ($km : h$).

VITESSE ANGULAIRE (w). — La vitesse angulaire d'un mobile tournant d'un mouvement uniforme autour d'un axe est le déplacement angulaire par unité de temps. $w = k \frac{\alpha}{t}$. k représente la vitesse angulaire d'un mobile tournant de l'unité d'angle dans l'unité de temps. C'est l'unité de vitesse angulaire.

$$[\omega] = \frac{[\alpha]}{[T]} = [\alpha][T^{-1}].$$

L'unité d'angle étant le radian, l'unité de vitesse angulaire est celle d'un corps tournant d'un radian par seconde.

Les unités pratiques sont le tour par seconde ($t : s$) et le tour par minute ($t : m$).

1 tour par seconde = 2π radians par seconde,

$$1 \text{ } " \text{ } " \text{ } \text{minute} = \frac{2\pi}{60} = 0,1047 \text{ radian par seconde.}$$

Un axe faisant n tours en t minutes, possède une vitesse angulaire de $\frac{n \cdot 2\pi}{60 \cdot t}$ radians par seconde.

ACCÉLÉRATION (a). Dans le mouvement uniforme, la vitesse reste constante. Il n'en est plus de même dans le mouvement varié. En particulier on appelle accélération dans le mouvement uniformément varié, le quotient de l'accroissement de vitesse par l'accroissement de temps $a = \frac{dv}{dt}$. C'est donc aussi l'accroissement de vitesse par unité de temps. L'unité d'accélération, est l'accélération d'un corps dont la vitesse s'accroît de l'unité de vitesse en l'unité de temps. Dimensions de l'accélération [LT^{-2}].

L'unité C. G. S. d'accélération est l'accélération d'un corps dont la vitesse s'accroît en une seconde de l'unité C. G. S. de vitesse c'est-à-dire de un centimètre par seconde. C'est donc le (centimètre par seconde), par seconde ($cm : s^2$).

L'accélération due à la pesanteur se représente par g . Elle varie faiblement sur la surface du globe, sa valeur étant à l'équateur $978,10 \text{ cm : } s^2$ et au pôle $983,11 \text{ cm : } s^2$, soit une variation positive de l'équateur aux pôles de $0,512 \text{ \%}$ environ.

FORCE (F, f). La force est l'agent physique capable de mettre des masses en mouvement. Une force f est reliée à l'accélération a imprimée à une masse m , par la formule $f = ma$. Dimensions de la force $[F] = [M L T^{-2}]$.

L'unité C. G. S. de force est la force qui, appliquée à la masse d'un gramme, lui imprime l'accélération de (un centimètre par seconde) par seconde; c'est la dyne.

Les unités pratiques de force sont le gramme et le kilogramme. Cherchons leur rapport à la dyne. Nous savons qu'en vertu de la formule $f = ma$, deux forces agissant sur une même masse sont entre elles comme les accélérations communiquées.

Le gramme-force et la dyne agissant sur la même masse, voyons quelle est l'accélération due au gramme, celle due à la dyne étant de un cm : s². Sous notre latitude, la pesanteur imprime à la masse du gramme une accélération d'environ 9,81 mètres, soit 981 cm : s². Conformément à ce que nous avons dit précédemment, faisons le rapport des équations de dimensions. Nous aurons :

$$\frac{\text{gramme-force}}{\text{dyne}} = \frac{[\text{M}' \text{ L}' \text{T}'^{-2}]}{[\text{M} \text{ L} \text{T}^{-2}]}$$

[M'] est la masse du gramme = [M], [L'] = 981 cm = 981 [L], enfin [T'] = une seconde = [T].

On en déduit après substitution, que le gramme = 981 dynes et, réciproquement, que la dyne vaut $\frac{1}{981}$ gramme. La mégadyne vaudra $\frac{10^6}{981} = 1019,37$ grammes = 1,019 kg. Enfin, le kilogramme correspondra à 981 000 dynes = $g \times 10^5$ dynes.

ÉNERGIE (W). a. ÉNERGIE MÉCANIQUE OU TRAVAIL. *On appelle travail, le produit d'une force par le chemin que parcourt, dans la direction de la force, son point d'application.* W = F L. Équation de dimensions du travail ou de l'énergie [W] = [M] [L²] [T⁻²].

L'unité C. G. S. de travail, appelée erg, est le travail développé par une force d'une dyne, dont le point d'application se déplace d'un centimètre dans la direction de la force.

L'unité usuelle de travail est le kilogrammètre kgm = 1 kg × 1 m.

$$\frac{1 \text{ kgm}}{1 \text{ erg}} = \frac{1 \text{ kg} \times 1 \text{ m}}{1 \text{ dyne} \times 1 \text{ cm}} = \frac{981000 \text{ dynes} \times 100 \text{ cm}}{1 \text{ dyne} \times 1 \text{ cm}} = \\ 98,1 \text{ mégergus.}$$

On arrive naturellement au même résultat par l'application des équations de dimensions. En effet :

$$\frac{1 \text{ kgm}}{1 \text{ erg}} = \frac{[\text{M}' \text{ L}'^2 \text{T}'^{-2}]}{[\text{M} \text{ L}^2 \text{T}^{-2}]}.$$

Or dans le système pratique des mécaniciens, les unités sont la force du kg, le mètre et la seconde. [T'] = [T]. Le mètre vaut 100 centimètres, donc [L'] = 100 [L]. Quant à M', qui représente par

définition l'unité de masse (dans le système unité de force = kg , unité de longueur = m , unité de temps = s) puisque $p = mg$, d'où $m = \frac{p}{g}$, on voit que $m = 1$, si $p = 9,81 \text{ kg}$. Donc [M'] unité de masse dans ce système = la masse de $9,81 \text{ kg} = 9810$ grammes-masses [M]. Remplaçons il vient :

$$1 \text{ kgm} = \frac{9810 [M] \times 100^2 [L^2] \times [T^{-2}]}{[M L^2 T^{-2}]} = 98100000 \text{ ergs.}$$

$$1 \text{ mégerg} = \frac{1 \text{ kgm}}{98,1} = 0,01019 \text{ kgm.}$$

Dans le système d'unités pratiques des électriciens, l'unité pratique de travail est le *joule* qui vaut 10^7 ergs. $1 \text{ kgm} = 9,81$ joules ; $1 \text{ joule} = \frac{1 \text{ kgm}}{9,81}$.

b. ÉNERGIE THERMIQUE. Quand l'énergie revêt la forme thermique, l'unité pratique de chaleur est la *calorie*. Celle-ci est la quantité de chaleur capable d'élever de 1° c la température de la masse d'un kilogramme d'eau. Le kgm et la calorie n'ont entre eux aucun rapport théorique. Mais en vertu du principe de la conservation de l'énergie, une calorie doit nécessairement correspondre à un nombre défini de kgm. En d'autres termes il doit exister un *équivalent mécanique de la chaleur*. On a en effet trouvé par expérience que : $1 \text{ calorie} = 425 \text{ kgm} = 41692 \text{ mégergs}$. Inversement $1 \text{ kgm} = \frac{1}{425} \text{ calorie}$, coefficient que l'on appelle *équivalent calorifique du travail*. On utilise également la *petite calorie*, qui est la *millième partie de la précédente*, c'est-à-dire qui correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° c la température de la masse d'un gramme d'eau. $1 \text{ petite calorie} = 41,7 \text{ mégergs} = 4,17 \cdot 10^7 \text{ ergs}$. Comme le $\text{kgm} = 9,81 \text{ joules}$, on voit que le $\text{joule} = \frac{1}{425 \times 9,81} = 0,00024$ grande calorie = $0,24$ petite calorie.

c. ÉNERGIE CHIMIQUE. Dans les combinaisons chimiques une partie de l'énergie se transforme en chaleur que l'on mesure au moyen de la calorie.

d. ÉNERGIE ÉLECTRIQUE. On la mesure au moyen d'une des unités précédentes : erg, kgm, calorie ou, de préférence, avec des unités spéciales que nous verrons plus loin.

PUISANCE (P). Une quantité d'énergie déterminée peut être produite pendant un temps plus ou moins long et le générateur qui la développe sera d'autant plus puissant, qu'il pourra la créer pendant un temps plus court. Ou encore, un générateur sera d'autant plus puissant, qu'il produit plus d'énergie pendant un temps donné. La puissance se mesurera donc par le quotient de l'énergie par le temps nécessaire pour sa production, soit

$$P = \frac{W}{t}.$$

La puissance est donc un travail divisé par un temps, ou le travail développé pendant l'unité de temps. Dimensions $[P] = [M L^2 T^{-3}]$. L'unité C. G. S. de puissance n'a pas reçu de nom spécial : c'est l'*erg par seconde*.

Les unités pratiques usuelles sont le *kilogrammêtre par seconde* ($kgm : s$) et le *cheval* qui vaut 75 kgm par seconde.

Enfin, le Congrès international de mécanique appliquée de 1889 a adopté une unité décimale, le *poncelet*, qui vaut 100 $kgm : s$.

$$1 \text{ kgm : s} = 98,1 \text{ mégergus : s}$$

$$1 \text{ mégergus : s} = 0,01019 \text{ kgm : s}$$

$$1 \text{ cheval} = 7357,5 \text{ mégergus : s}$$

enfin $1 \text{ poncelet} = 9810 \text{ mégergus : s}$.

Dans le système pratique des électriciens, l'unité de puissance est le *watt*, qui correspond à *un joule par seconde*.

$$1 \text{ watt} = \frac{1 \text{ kgm}}{9,81} = \frac{1 \text{ cheval}}{75 \times 9,81} = \frac{1 \text{ cheval}}{736}.$$

Utilité des équations de dimensions. — Les équations de dimensions servent, non seulement à déterminer la valeur des unités dérivées en fonction des unités fondamentales, mais à vérifier l'homogénéité des formules et même, comme l'a démontré M. Bertrand, à prévoir la forme d'une fonction quand on connaît les facteurs physiques qui la composent.

APPLICATION. I. On sait, par exemple, que la vitesse de propagation dans un milieu, est liée au coefficient d'élasticité E et à la densité d par la formule

$$v = \sqrt{\frac{E}{d}} \quad (1)$$

Vérifions l'homogénéité. Pour cela, cherchons d'abord l'équation de dimensions du coefficient d'élasticité longitudinale. a étant l'allongement, l la longueur du corps élastique tendu par la force f , s la section et E le coefficient d'élasticité longitudinale, on a

$$a = \frac{fl}{sE}$$

d'où

$$E = \frac{fl}{sa} = \frac{FL}{sa}.$$

or,

$$F = MLT^{-2}, \quad s = L^2, \quad a = L,$$

donc

$$E = \frac{MLT^{-2} \cdot L}{L^2 \cdot L} = \frac{MT^{-2}}{L} = ML^{-1}T^{-2}.$$

L'équation de dimensions de la vitesse étant $v = \frac{L}{T}$ et celle de la densité $D = ML^{-3}$ remplaçons les symboles par leur valeur dans l'équation (1) :

$$v = LT^{-1}, \quad E = ML^{-1}T^{-2}, \quad D = ML^{-3} \quad \text{il vient :}$$

$$LT^{-1} = \sqrt{\frac{ML^{-1}T^{-2}}{ML^{-3}}} = \text{effectivement } LT^{-1}.$$

Réiproquement, sachant que $v = f(E, d)$ en remplaçant v , E et d par leurs dimensions, il est aisé de conclure que la fonction $f = \sqrt{\frac{E}{d}}$.

II. *Dans le système de Gauss et Weber, les unités étaient la masse du milligramme, le millimètre et la seconde. A combien de dynes correspondait l'unité de force de ce système?*

Soient $[F']$ cette unité, $[M']$, $[L']$, $[T']$ les unités de masse, de longueur et de temps correspondantes; $[F]$, $[M]$, $[L]$ et $[T]$ les mêmes quantités dans le système C. G. S. on a

$$\left[\frac{F'}{F} \right] = \left[\frac{M'L'T'^{-2}}{MLT^{-2}} \right].$$

Or, $[M'] = \frac{[M]}{1000}$, $[L'] = \frac{[L]}{10}$, $T' = T$,

remplaçant il vient

$$\left[\frac{F'}{F} \right] = \frac{1}{10000} \text{ d'où l'unité de force, dans le système Gauss et}$$

Weber est égal à $\frac{1}{10000}$ de dyne.

III. *Dans un système on mesure les temps en heures et les longueurs en kilomètres. a) Quelle est la valeur de l'unité d'accélération? b) Quel est son rapport à l'unité C. G. S?*

a) Par définition l'unité d'accélération sera, dans le système considéré, l'accélération d'un corps dont la vitesse s'accroît d'un kilomètre par heure en une heure.

b)
$$\left[\frac{a'}{a} \right] = \left[\frac{L'T'^{-2}}{LT^{-2}} \right].$$

Or $L' = 1 \text{ km} = 100 \text{ 000 L}$, $T' = 1 \text{ h} = 3600 \text{ T}$

donc

$$[a'] = \left[\frac{100 \text{ 000 L} \cdot T'^{-2} a}{(3600)^2 L \cdot T^{-2}} \right] = \frac{100 \text{ 000} [a]}{12 \text{ 960} \text{ 000}} = \frac{[a]}{129,6}$$

CHAPITRE II.

§ 1. — **Électricité statique**

Phénomènes généraux.

Electrisation par frottement. — On reconnut dès la plus haute antiquité, qu'un morceau d'ambre frotté acquiert la propriété d'attirer les corps légers comme les barbes de plumes, feuilles sèches, etc... L'ambre s'appelle en grec *electron*, c'est de là qu'est venu le mot **électricité**.

L'ambre dans cet état, est dit **électrisé**, et l'on donne le nom d'**électricité** à la cause inconnue, qui produit les attractions constatées. L'ambre non frotté ne manifestant pas la propriété électrique est dit à l'état **neutre**.

Tous les corps peuvent s'électriser par frottement, mais on constate immédiatement une différence essentielle dans leur façon de se comporter.

Corps isolants, corps conducteurs, corps semi-conducteurs.

— Alors que l'ambre, le verre, la résine, le caoutchouc peuvent être tenus directement en main quand on les électrise par frottement, il n'en est pas de même avec d'autres corps comme les métaux. Pour que ceux-ci manifestent les propriétés attractives, il faut qu'ils soient soutenus ou tenus par l'intermédiaire des premiers, par exemple au moyen d'un manche en verre ou d'un cordon de soie secs.

En analysant de plus près le phénomène, on constate que le gâteau de résine frotté en un point n'attire les corps légers qu'en ce point, tandis que, dans les mêmes conditions, les métaux manifestent la vertu attractive en tous leurs points.

Dans les premiers, dits *mauvais conducteurs*, l'électricité ne se propage que difficilement et avec une extrême lenteur; dans les seconds, dits *bons conducteurs*, elle passe instantanément avec la plus grande facilité. Enfin une classe intermédiaire de corps *semi-conducteurs* peut être faite avec les corps

médiocrement conducteurs. En réalité, ces derniers constituent des mélanges en diverses proportions, des corps des deux premières classes. Voici une liste de quelques corps de ces diverses catégories.

Conducteurs	Semi-conducteurs	Isolants
Argent	Air raréfié	Verre
Cuivre	Fibre vulcanisée	Mica
Or	Ardoise	Gutta-percha
Aluminium	Stéatite	Gomme laque
Zinc	Marbre blanc	Caoutchouc
Platine	Sapin	Paraffine
Fer	Acajou	Air sec
.....

Transmission de l'électricité par contact. — L'électricité se transmet d'un corps à l'autre par simple contact. Si le contact du corps électrisé supposé isolant se fait par un point, avec un corps isolant, ce point seul est électrisé. Au contraire si c'est un conducteur que l'on amène en contact, la charge du *point* électrisé touché se distribue sur tout le conducteur. Enfin, s'il s'agit de deux corps bons conducteurs, dès que leur proximité est suffisante, une étincelle jaillit et l'électricité se répartit sur tous les deux. En les séparant ensuite, ils restent électrisés.

On n'arrive pas à électriser un corps conducteur par frottement en le tenant à la main parce que, le corps humain étant lui-même conducteur et reposant sur le sol, l'électricité produite passe dans le sol, conducteur indéfini, où elle devient inappréciable.

Pour garder l'électricité dans un corps il faut donc le soutenir, par exemple au moyen d'un pied isolant en verre sec, l'humidité étant conductrice. Mais le verre étant hygrométrique, il conviendra de le recouvrir d'une couche de vernis à la gomme laque ou encore, de le faire passer à travers une atmosphère confinée maintenue sèche au moyen d'acide sulfurique (fig. 1).

Attractions et répulsions électriques. Deux espèces d'électricité. Leur recognition. — Soit

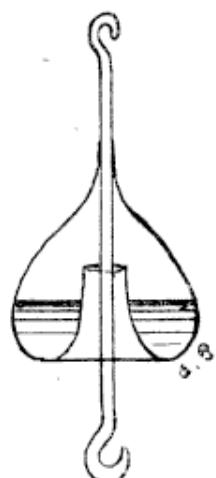


FIG. 1.

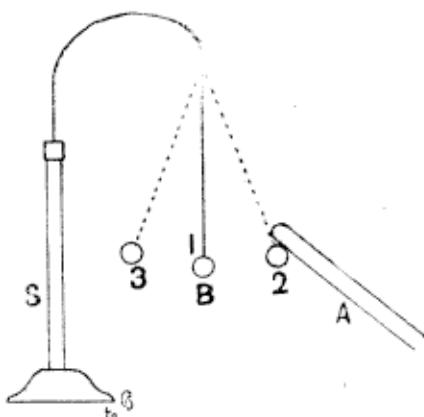


FIG. 2.

un pendule, appelé *pendule électrique*, constitué d'une petite balle en moelle de sureau B, fig. 2 (position 1) suspendue par un cordon de soie à un support pourvu d'une tige en verre S. Approchons de lui un corps électrisé, soit un bâton de résine (en pratique de la cire à cacher) frotté avec une peau de chat.

Nous constatons que le pendule est vivement attiré jusqu'au contact (position 2) puis repoussé non moins vivement (position 3).

Si nous substituons au bâton de cire une tige de verre électrisé, la balle B, qui était repoussée par le bâton de résine, est attirée par la tige de verre. Elle vient en contact avec elle, puis est repoussée de nouveau.

Quel que soit le corps électrisé que l'on approche, il se comporte, soit comme le bâton de cire, soit comme la tige de verre. On en conclut qu'il existe deux espèces d'électricité et deux seulement, l'une développée par la résine et appelée *électricité négative* (anciennement *électricité résineuse*); l'autre produite par le verre, appelée *électricité positive* (anciennement *électricité vitrée*).

Par son contact avec le bâton de résine ou la tige de verre, la balle a pris l'électricité du point touché. Comme elle est alors repoussée, on peut conclure que : *les électricités de mêmes noms se repoussent*.

En outre, puisque la balle électrisée négativement est attirée par la tige de verre frotté : *les électricités de noms contraires s'attirent*.

Le pendule électrique permet donc de reconnaître la nature de l'électricité que porte un corps électrisé, en lui donnant au préalable une électrisation connue soit négative, soit positive. S'il est chargé négativement (résine) et repoussé par le corps approché, celui-ci est chargé négativement; il est attiré dans le cas contraire.

Electroscopé à feuilles d'or. — On réalise un appareil beaucoup plus sensible que le pendule électrique, en appliquant à l'extrémité inférieure d'une tige métallique fig. 3 traversant

un bouchon de paraffine qui ferme un flacon à large tubulure F , deux feuilles d'or f_1 , f_2 pendent parallèlement tant qu'elles sont à l'état neutre.

Si l'on met en rapport l'extrémité B avec un corps électrisé, les feuilles d'or, se recouvrant d'électricités de mêmes noms se repoussent et divergent.

Afin d'empêcher les feuilles d'or de venir se coller contre les parois du flacon, on place dans leur plan d'oscillation deux tiges terminées par des boules ou l'on applique sur les parois opposées deux bandes d'étain.

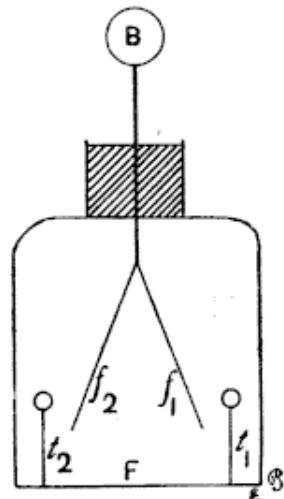


FIG. 3.

Production simultanée des deux électricités.— On reconnaît par expérience que les deux électricités se produisent toujours simultanément et en quantités équivalentes.

Prenons un plateau métallique M , fig. 4, supporté par un manche en verre; un plateau en verre V , et frottions-les l'un contre l'autre en les maintenant en contact. Si nous approchons d'eux un pendule électrique, aucune trace d'électricité ne se manifeste. Mais, dès qu'on sépare les plateaux, le pendule décèle la présence d'électricité positive sur le plateau en verre, négative sur le plateau métallique. Puisque quand les plateaux sont en contact, aucun effet ne se manifeste, c'est que *les deux électricités ont été développées en quantités exactement équivalentes*.

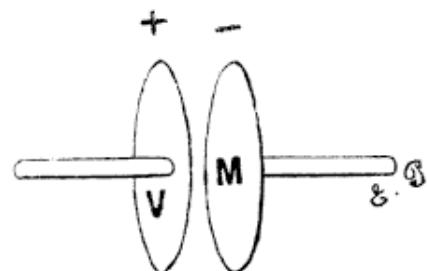


FIG. 4.

L'espèce d'électricité qui se développe sur un corps déterminé dépend de la nature du corps frottant. Toutefois, l'état des surfaces joue un rôle important, ainsi que le montre la liste suivante, dans laquelle les corps sont positifs quand on les frotte avec ceux qui suivent et négatifs par rapport à ceux qui précèdent.

Poil de chat vivant	Soie
Verre poli	Gomme laque
Etoffes de laine	Résine
Plumes	Verre dépoli
Bois	Soufre
Papier	Métaux.

Electrisation par influence. Corps inducteur et induit. —

Soit un cylindre C, fig. 5, isolé par un pied en verre, et portant à ses extrémités et vers le centre des pendules électriques p_1 , p_2 , p_3 .

Approchons une sphère S électrisée positivement et suspendue au moyen d'un cordonnet de soie. Nous voyons immédiatement les pendules extrêmes diverger. Et si nous approchons d'eux un bâton de cire électrisé, nous reconnaissons que p_1 est électrisé négativement et p_3 positivement. Entre les deux, existe une *région neutre* qui n'est le siège d'aucune électrisation.

On voit que la charge électrique de S a attiré, sur l'extrémité voisine de C, une charge d'électricité de nom contraire et a repoussé à l'extrémité opposée une charge d'électricité de même nom. S est le corps *inducteur*, C le corps *induit*.

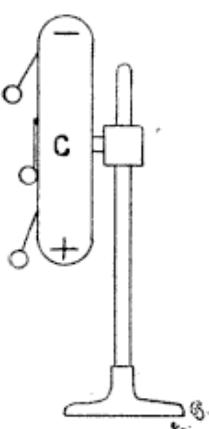


FIG. 5.

Si maintenant nous touchons, ne fut-ce qu'un instant, le cylindre C avec le doigt en *un point quelconque*, le pendule p_3 retombe, tandis que p_1 diverge davantage, ce qui montre que la charge positive induite sur C s'est écoulée dans le sol.

Retirons le corps influençant S, le cylindre reste chargé négativement. Cette charge disparaîtra si nous touchons de nouveau le cylindre avec le doigt.

Ces phénomènes d'influence se manifestent toujours. En approchant la sphère de la boule métallique terminant l'électroscopie fig. 3 à sa partie supérieure, on verrait les feuilles d'or diverger et d'autant plus que le corps influençant est plus rapproché.

On conclut de cette expérience que l'attraction du pendule électrique se produit parce que la balle en moelle de sureau se

recouvre, par influence, d'une charge électrique de nom contraire du côté du corps inducteur, une charge égale et de même signe se portant du côté opposé. Les charges de noms contraires étant plus rapprochées, l'attraction prédomine sur la répulsion, jusqu'au moment où, la neutralisation s'étant faite par le contact, la boule reste chargée d'électricité de même nom que l'inducteur, ce qui provoque sa répulsion.

L'attraction des corps légers se produit en vertu du même mécanisme.

Electrophore. — Le phénomène d'influence permet de construire des machines renforçant les effets électriques. La plus simple est l'électrophore, constituée par un gâteau de résine ou un plateau d'ébonite, fig. 6, sur lequel peut venir s'appliquer un disque métallique CD manié par un manche isolant V. On charge négativement la surface du gâteau en la battant avec une peau de chat bien sèche.

Si on y dépose alors le disque CD, la surface inférieure de celui-ci se recouvre d'une charge positive et sa surface supérieure d'une charge négative égale. En le retirant ensuite il revient à l'état neutre et ne donne lieu à aucune manifestation électrique.

Mais si, pendant qu'il est sous l'influence du gâteau on le touche avec le doigt, la charge négative s'écoule dans le sol et, en retirant le plateau, il reste chargé positivement.

Après décharge de cette électricité, on peut recommencer l'opération et ainsi de suite un grand nombre de fois, l'électricité du gâteau restant fixée à sa surface plus ou moins rugueuse.

Philipps a rendu automatique l'envoi dans le sol de la charge de même nom que celle du gâteau, en munissant le socle métallique supportant ce dernier d'une pointe p fig. 7, venant presque effleurer à sa surface. Après électrisation de celle-ci, si l'on y dépose le plateau CD, une étincelle jaillit entre p et CD neutralisant la charge négative repoussée, de sorte que le plateau reste chargé positivement.

L'électricité se porte à la surface des conducteurs. — Lorsqu'un conduc-

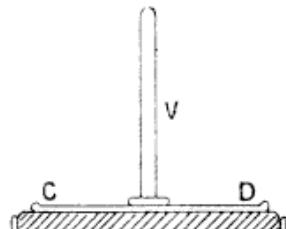


FIG. 6.

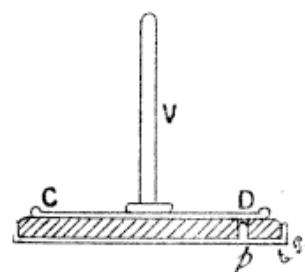


FIG. 7.

teur est en équilibre, l'électricité existe exclusivement à sa surface.

Prenons en effet une sphère creuse isolée électrisée S fig. 8, percée d'un trou *t*. A l'aide d'un *plan d'épreuve*, c'est-à-dire d'une petite feuille de clinquant portée sur un manche isolant,

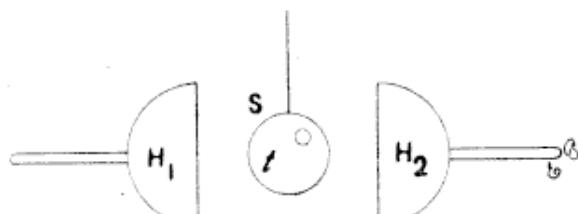


FIG. 8.

touchons la sphère en divers points intérieurs et présentons alors ce plan à un électroscop. Aucune trace d'électricité ne peut être décelée. L'inverse se produit si l'on touche la surface extérieure.

Entourons la sphère de deux hémisphères métalliques creux *H*₁ et *H*₂ placés en contact sur leur circonference diamétrale. Déplaçons-les de manière à toucher intérieurement la sphère avant de les séparer; nous constatons que celle-ci a perdu toute trace d'électricité, tandis que les hémisphères sont électrisés.

Il est à remarquer qu'il n'est pas nécessaire que le corps soit continu pour la manifestation du phénomène. En employant un léger filet métallique fig. 9, que l'on peut retourner brusquement au moyen d'une ficelle, Faraday a montré qu'après chaque retournement, on retrouve l'extérieur seul du filet électrisé.

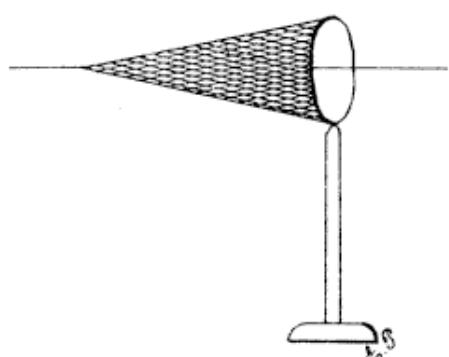


FIG. 9.

Enfin, en se plaçant dans une grande cage métallique qu'il faisait électriser aussi fortement que possible, le même savant ne put déceler à l'intérieur de la cage aucune trace d'électrisation, quelque sensibles que fussent ses appareils.

Étincelle électrique. Pouvoir des pointes. — L'étincelle électrique se produit chaque fois que l'électricité passe d'un corps à un autre à travers l'isolant. C'est notamment l'indice de la neutralisation, l'une par l'autre, des électricités de noms contraires.

On remarque que l'électricité ne peut se maintenir sur un corps pourvu de pointes. On met en évidence ce *pouvoir des*

pointes par l'expérience du *vent électrique*, en approchant de la pointe d'un conducteur chargé, la flamme d'une bougie. On voit celle-ci dévier sous l'effet du courant d'air produit par la répulsion des molécules d'air sur lesquelles la pointe décharge son électricité.

Quantités ou masses électriques. — Apportons dans la sphère creuse de la fig. 8, à l'aide du plan d'épreuve, une certaine charge électrique. En touchant l'intérieur de la sphère à l'aide du plan, la charge apportée passera immédiatement à la surface et un électroscopie placé à distance donnera une certaine déviation. Apportons une seconde charge égale, l'électroscopie déviera davantage.

Il en résulte qu'une masse électrique peut se définir par l'action qu'elle exerce à distance; elle est susceptible de mesure. La masse sera double quand son action sera double, et ainsi de suite.

Loi de Coulomb. — A l'aide de sa balance de torsion constituée par deux petites sphères de même volume en moelle de sureau, l'une fixe B_1 , fig. 10, l'autre mobile B_2 à l'extrémité d'une aiguille suspendue à un fil auquel on peut imprimer une torsion connue, Coulomb a démontré que la loi régissant les attractions et répulsions électriques est la suivante : *L'action a lieu en raison directe des masses et en raison inverse du carré de leur distance.*

En appelant f la force, $\pm q$ et $\pm q'$ les charges

$$f = K \frac{(\pm q)(\pm q')}{r^2}$$

le signe $+$ du produit correspondant à une répulsion, le signe $-$ à une attraction.

Le coefficient K dépend du milieu au sein duquel les actions s'exercent. Il est constant dans un milieu homogène et différent pour les divers milieux homogènes. Dans le système dit *électrostatique*, on le suppose égal à l'unité dans l'air.

Dès lors *l'unité électrostatique de quantité se définit : la quantité qui, agissant sur une quantité égale placée à l'unité*

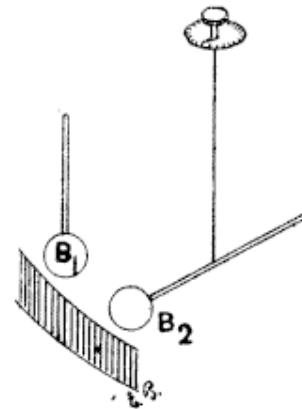


FIG. 10.

de distance, la repousse ou l'attire avec l'unité de force, c'est-à-dire avec la force d'une dyne.

En remplaçant f et r par leurs dimensions nous trouverons pour les dimensions de la masse ou quantité électrique

$$[Q] = \left[F^{\frac{1}{2}} L \right] = \left[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{5}{2}} T^{-1} \right].$$

L'action exercée sur une des masses réduite à l'unité sera

$$H = \pm \frac{q}{r^2}.$$

Dimensions $M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}$

L'unité électrostatique C. G. S. étant beaucoup trop petite, on emploie comme unité pratique de quantité *le coulomb international qui correspond à une quantité d'électricité 3.10⁹ fois plus grande*. Un coulomb = 3.10⁹ unités C. G. S. électrostatiques de quantité.

Pour nous faire une idée de la grandeur du coulomb, remarquons qu'en vertu de la loi de Coulomb, deux sphères chargées chacune d'un coulomb et placées à un centimètre de distance se repousseraient avec une force de 9 175 000 000 000 kilogrammes ou autrement, ces sphères devraient se trouver à 30 000 km de distance pour ne plus se repousser qu'avec la force d'une dyne.

Densité électrique. — La charge d'un conducteur en équilibre réside toute entière à sa surface. Si sa valeur est dq en un point déterminé de surface ds , la charge moyenne par unité de surface ou *densité électrique* en ce point sera $\frac{dq}{ds}$, c'est-à-dire *la charge par unité de surface dans le voisinage immédiat de ce point*. On la représente d'habitude par σ .

Dimensions : $[\sigma] = \left[\frac{Q}{S} \right] = \left[\frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{5}{2}} T^{-1}}{L^2} \right] = M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}$

Champ et potentiel électriques.

Champ électrique. — On appelle *champ électrique, toute portion de l'espace dans laquelle se manifestent des forces électriques.*

Une masse électrique placée en un point, exerce autour d'elle dans toutes les directions, sur la masse positive unité, une action donnée par l'équation $H = \pm \frac{q}{r^2}$. Si plusieurs masses agissent, l'action en chaque point sera la résultante des diverses actions individuelles. On appelle *intensité du champ électrique, en un point, la force exercée en ce point sur l'unité positive de masse électrique*, tandis que *la direction du champ* est donnée par *la direction de la force en ce point*.

Dimensions du champ :

$$[H] = \left[\frac{f}{q} \right] = \left[\frac{q}{L^2} \right] = M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

Potentiel électrique. — Un système de corps électrisés en présence possède une certaine quantité d'énergie qui le caractérise et qu'il est utile de connaître. La loi de Coulomb nous permet de préciser un des facteurs de cette énergie, en déterminant la force qui sollicite chacun des corps en présence ; le *potentiel* nous permettra de la définir complètement.

On appelle *potentiel en un point du champ, le travail qu'il faut exercer sur l'unité positive d'électricité, pour l'amener de la limite du champ au point considéré ou inversement, c'est le travail que fournit l'unité d'électricité se déplaçant du point considéré aux limites du champ.*

Considérons un champ électrique dû à une charge q concentrée en P fig. 11 et cherchons quel sera le travail effectué pendant qu'une masse q' passe du point A

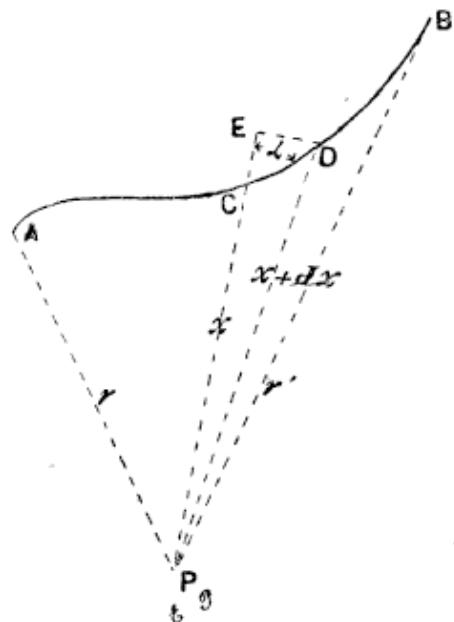


FIG. 11.

au point B en suivant une trajectoire quelconque entre ces deux points.

Pendant le déplacement élémentaire C D = dl de q' située en C à une distance x de P, la charge q' sera soumise à la force

$$f = \frac{q q'}{x^2}.$$

Le travail élémentaire correspondant sera

$$dT = \frac{q q'}{x^2} dl \cos \alpha,$$

$dl \cos \alpha$ étant la projection du chemin parcouru sur la direction de la force. Mais en négligeant un infiniment petit du second ordre, $dl \cos \alpha = dx$, donc

$$dT = \frac{q q'}{x^2} dx$$

et entre A et B le travail effectué sera

$$T = \int_{x=r}^{x=r'} q q' \frac{dx}{x^2} = -\frac{q q'}{r'} + \frac{q q'}{r}.$$

Il ne dépend que de la position des points extrêmes et non du chemin parcouru.

Par unité de masse positive transportée, le travail est

$$\frac{T}{q'} = -\frac{q}{r'} + \frac{q}{r}$$

et si le point B est choisi à la limite du champ, c'est-à-dire dans le cas qui nous occupe à l'infini,

$$\frac{T}{q'} = \frac{q}{r} = V.$$

C'est l'expression du potentiel.

Examinons maintenant le cas où le champ est développé par un certain nombre de charges q_1, q_2, \dots placées en des points quelconques.

La charge q' sera soumise à une force qui est la résultante des forces exercées par q_1, q_2, \dots . Par conséquent le travail de cette résultante étant égal à la somme algébrique des travaux des composantes

$$\frac{T}{q'} = \Sigma \left(-\frac{q}{r'} + \frac{q}{r} \right) = -\Sigma \frac{q}{r'} + \Sigma \frac{q}{r}.$$

Si le point B est à l'infini

$$\frac{T}{q'} = \Sigma \frac{q}{r} = V. \quad (1)$$

Le potentiel en un point du champ est donc égal au quotient du travail nécessaire pour amener une charge positive de l'infini jusqu'à ce point par la valeur de cette charge.

En remplaçant dans la dernière équation q et r par leurs dimensions $M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{5}{2}} T^{-1}$ et L , nous trouvons pour les dimensions du potentiel

$$[V] = \left[\frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{5}{2}} T^{-1}}{L} \right] = \left[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1} \right].$$

Un point de l'espace est au potentiel unité quand il faut dépenser un erg pour amener une unité d'électricité positive, des limites du champ en ce point.

Le signe du potentiel est celui du travail effectué pendant le déplacement. Si les forces électriques poussent l'unité positive du point considéré aux limites du champ en développant un travail de 15 ergs, le potentiel du point est positif et égal à + 15 unités C. G. S. de potentiel. Si, au contraire, les forces électriques attirent l'unité de masse positive, le travail rendu par le système, du point considéré jusqu'aux limites du champ ou, inversement, le travail effectué pour amener l'unité positive de l'infini au point considéré est négatif; sa valeur étant 15 ergs, le potentiel sera — 15.

D'après les expressions trouvées plus haut, on remarquera que, connaissant le potentiel, il suffit de prendre sa différentielle en signe contraire, pour obtenir le travail élémentaire des forces du champ. En effet on tire de (1)

$$- dV = \Sigma \frac{q dr}{r^2}.$$

Appelons H l'intensité du champ dans la direction r . Le second membre représentant le travail élémentaire des forces du champ, nous pourrons écrire

$$H dr = - dV$$

$$\text{ou } H = - \frac{dV}{dr}.$$

La valeur de l'intensité du champ dans une direction r déterminée, est donc représentée par la dérivée, prise en signe contraire, du potentiel dans cette direction.

REMARQUE. — Le potentiel dans la direction de l'intensité du champ variant en chaque point de l'espace, sera exprimé par une fonction des coordonnées par rapport à trois axes rectangulaires

$$V = \varphi(x, y, z).$$

Différence de potentiel. — Si nous intégrons l'équation différentielle écrite en dernier lieu entre deux points A et B pour lesquels le potentiel est V_1 et V_2 nous aurons

$$\int_A^B H \, dr = - \int_{V_1}^{V_2} dV = V_1 - V_2.$$

Le travail accompli par les forces du champ sur l'unité de masse positive est mesuré par la différence des valeurs que prend la fonction potentielle quand on y substitue successivement les coordonnées des points A et B.

On ne peut évaluer expérimentalement la valeur du potentiel en un point : on mesure sa *différence de potentiel* avec un autre point. Tous les phénomènes que nous aurons à étudier ne dépendent d'ailleurs que de différences de potentiel. En effet, supposons qu'on augmente d'une même quantité le potentiel en tous les points d'un champ, la force électrique $H = - \frac{dV}{dr}$ garde en chaque point sa direction et son intensité primitives puisque pour un même déplacement dr , l'accroissement dV du potentiel reste le même. L'action du champ reste partout semblable à elle-même et rien n'est changé aux phénomènes auxquels il donne lieu.

La différence de potentiel entre deux points est donc égal au quotient du travail nécessaire pour transporter une charge positive q d'un point à l'autre, par cette charge q.

L'unité C. G. S. électrostatique de potentiel est égale à la différence de potentiel existant entre deux points quand il faut dépenser un travail d'un erg, pour transporter une unité électrostatique C. G. S. de quantité entre ces deux points [V] = $\left[\frac{W}{Q} \right]$

L'unité pratique de potentiel ou volt international correspondra d'autre part à la différence du potentiel existant entre deux points quand il faut dépenser un travail d'un joule pour transporter un coulomb entre les deux points considérés.

$$1 \text{ volt} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}}.$$

Or nous avons vu que l'unité pratique de travail ou joule vaut 10^7 ergs, tandis que l'unité pratique de quantité le coulomb correspond à 3×10^9 unités C. G. S. électrostatiques.

L'unité pratique de différence de potentiel, le volt international vaudra d'après cela $\frac{10^7}{3 \times 10^9} = \frac{1}{3 \times 10^2}$ unités électrostatiques C. G. S. de potentiel.

Analogie avec les surfaces de niveau. Potentiel zéro. — En somme, le potentiel électrique correspond à la hauteur ou au niveau en mécanique. De même que le niveau moyen de la mer au point où l'on se trouve y est pris pour zéro, de même en électricité on admet que *le potentiel du sol à l'endroit où l'on opère est nul*.

Surfaces équipotentielles. — Si nous posons $V = \varphi(x, y, z) = c^{\text{te}}$, nous obtiendrons une surface en chaque point de laquelle le potentiel possède la même valeur. Puisqu'en passant d'un point à un autre de cette surface le travail accompli par les forces du champ est nul, c'est que la résultante de ces forces est elle-même nulle en tous ses points. Une telle surface est dite *équipotentielle*.

En appelant dn une longueur infiniment petite dirigée suivant la normale, l'intensité du champ en chaque point s'exprimera, conformément à l'équation générale précédemment trouvée, par

$$H = - \frac{dV}{dn}.$$

REMARQUE. — La direction de la normale à la surface équipotentielle représentera précisément la direction du champ au point considéré puisque les composantes suivant deux axes perpendiculaires à cette direction (pris dans la surface) en un point quelconque, sont nulles.

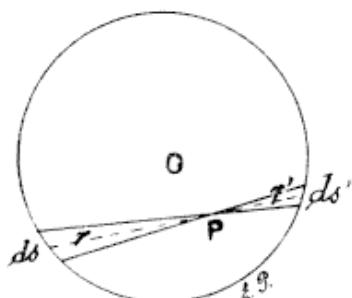


FIG. 12.

Champ électrique dû à une couche sphérique homogène. — I. A L'INTÉRIEUR DE LA COUCHE, L'INTENSITÉ DU CHAMP EST NULLE. Du point P (fig. 12), où nous supposons concentrée l'unité positive d'électricité, traçons un cône élémentaire découpant sur la sphère deux surfaces ds et ds' . Les charges qui les recouvrent et agissent sur le

point P sont, en appelant σ la densité : $ds\sigma$ et $ds'\sigma$.

En vertu de la loi de Coulomb, la force exercée par ds sur P est $\frac{ds\sigma}{r^2}$; celle exercée en sens inverse par ds' est $\frac{ds'\sigma}{r'^2}$ soit une force résultante

$$dH = \frac{ds\sigma}{r^2} - \frac{ds'\sigma}{r'^2} = \sigma \left(\frac{ds}{r^2} - \frac{ds'}{r'^2} \right).$$

Or les plans tangents aux points où l'axe de cône perce la surface sphérique considérée, faisant avec l'axe de cône élémentaire des angles égaux, les éléments ds , ds' sont entre eux comme leurs projections sur les plans perpendiculaires à l'axe mené par ces points et ces projections sont elles-mêmes proportionnelles aux carrés de leurs distances au sommet du cône.

On a donc

$$\frac{ds}{r^2} = \frac{ds'}{r'^2} \text{ et } dH = 0.$$

L'action totale due à la surface de la sphère est donc nulle puisque celle-ci peut être partagée en couples d'éléments semblables à ds et ds' . Donc *la force est nulle en un point intérieur quelconque*. Il en résulte que *le potentiel est constant en tous les points intérieurs de la couche sphérique*. Nous le connaîtrons si nous pouvons le calculer en un point quelconque. Or au centre

$$V = \Sigma \frac{q}{R} = \frac{Q}{R} = 4\pi R\sigma.$$

II. L'ACTION D'UNE COUCHE SPHÉRIQUE HOMOGÈNE SUR UN POINT EXTÉRIEUR EST LA MÊME QUE SI TOUTE LA MASSE ÉTAIT CONCENTRÉE AU CENTRE DE LA SPHÈRE. Cherchons l'action sur un point P (fig. 13) où se trouve condensée l'unité positive de quantité

d'électricité. Joignons au centre O de la sphère uniformément chargée à la densité σ le point P. Par raison de symétrie, la force sera dirigée suivant cette droite.

Un élément de surface ds placé en A, situé à une distance r de P, exerce sur l'unité placée en ce dernier point une force dirigée suivant AP, dont la valeur est

$$\frac{ds\sigma}{r^2}.$$

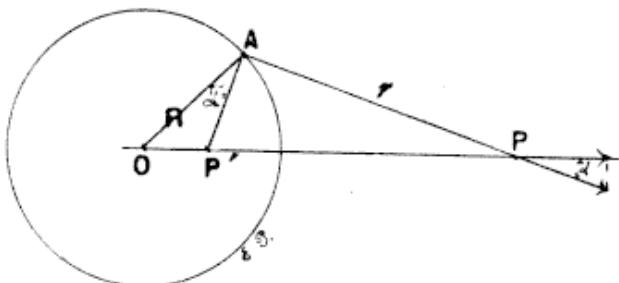


FIG. 13.

α étant l'angle de AP avec OP, la composante de cette force suivant OP sera

$$dH = \frac{ds\sigma}{r^2} \cos \alpha.$$

Pour intégrer cherchons à remplacer les variables r et α en fonction d'autres quantités fixes et notamment du rayon R de la sphère et de la distance OP. Pour cela, construisons sur le rayon OA un triangle semblable au triangle OAP. Le côté OA et l'angle AOP étant communs, il suffira de tracer un angle OAP' = α . On aura :

$$\frac{r}{OP} = \frac{AP'}{R}$$

d'où $r = \frac{OP \cdot AP'}{R}$.

En remplaçant il vient

$$dH = \frac{\sigma ds \cos \alpha \cdot R^2}{OP^2 \cdot AP'^2}.$$

Mais $\frac{ds \cos \alpha}{AP'^2}$ mesure l'angle solide $d\omega$ sous lequel on voit l'élément ds du point P'. Donc

$$dH = \frac{\sigma d\omega \cdot R^2}{OP^2}.$$

L'action totale de la sphère sera

$$H = \frac{\sigma R^2}{OP^2} \int_0^{4\pi} d\omega = \frac{4\pi R^2 \sigma}{OP^2} = \frac{Q}{OP^2}.$$

La forme de cette fonction montre que l'action est la même que si la masse était concentrée au point O.

Sur un point rapproché de la surface, on a sensiblement $OP = R$ *et l'action est* $H = 4\pi\sigma$.

Action exercée par un disque infiniment mince, uniformément chargé d'un côté. Par raison de symétrie, l'action totale du disque sera dirigée suivant son axe. La force exercée par la quantité σds recouvrant la surface infiniment petite ds (fig. 14), sur l'unité positive située en P sera $\frac{\sigma ds}{r^2}$.

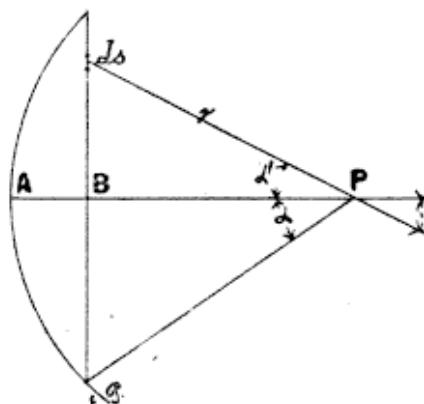


FIG. 14.

Projetée suivant l'axe elle donnera la composante

$$dH = \frac{\sigma ds}{r^2} \cos \alpha'.$$

Mais $\frac{ds \cos \alpha'}{r^2}$ mesure l'angle solide $d\omega$, sous lequel on voit l'élément ds du point P, donc $dH = \sigma d\omega$ et l'intensité du champ en P dû au disque entier sera $H = \sigma \omega$.

Pour un point infiniment rapproché du disque $\omega = 2\pi$ d'où $H = 2\pi\sigma$.

Si l'on remarque que par raison de symétrie, deux surfaces infiniment petites ds également éloignées du centre exercent sur l'unité positive placée en B des actions égales et contraires se détruisant, on en conclut que $H = 2\pi\sigma$ est uniquement due à la charge de l'élément infiniment voisin du point.

On peut encore donner une autre forme à l'expression de l'intensité du champ. L'angle solide ω est mesuré par le rapport de la surface de la calotte sphérique qu'il intercepte au carré du rayon.

$$\omega = \frac{2\pi \cdot PA \cdot AB}{PA^2} = \frac{2\pi \cdot AB}{PA} = \frac{2\pi (PA - PB)}{PA} = 2\pi (1 - \cos \alpha).$$

donc

$$H = 2\pi (1 - \cos \alpha) \sigma.$$

Conducteur en équilibre. — Sur un conducteur en équilibre, la force électrique est dirigée normalement à la surface, car s'il en était autrement, l'équilibre ne pourrait exister. La surface

du conducteur est donc une surface équipotentielle et le potentiel à l'intérieur de celui-ci, égal à celui de la surface, est constant. En d'autres termes, *il n'existe aucune force électrique à l'intérieur du conducteur.*

Energie potentielle d'un système de masses électriques. — Puisque des masses électriques mises en présence exercent l'une sur l'autre des actions réciproques, les diverses masses libres de se mouvoir s'écarteraient ou se rapprocheraient simultanément l'une de l'autre en effectuant un certain travail. L'ensemble possède donc une certaine énergie potentielle que nous allons évaluer.

Dans le cas de deux masses $+q, +q'$, le travail élémentaire étant $dT = \frac{qq'}{r^2} dr$, le travail total de r à ∞ est $\int_r^\infty \frac{qq'}{r^2} dr = \frac{qq'}{r}$.

Telle est l'énergie totale des deux masses amenée à la distance r l'une de l'autre puisque c'est le travail que le système peut restituer de r à ∞ où l'énergie est nulle.

Libres de se mouvoir, les deux masses se déplaceraient des points qu'elles occupent jusqu'à l'infini, en effectuant chacune le même travail. L'énergie potentielle de *chaque* masse est conséquemment $\frac{1}{2} \frac{qq'}{r}$.

Si l'on a un système de masse $q, q', q'' \dots$ en présence, l'énergie totale sera la somme de termes semblables à celui relatif à deux masses $\Sigma \frac{qq'}{r}$.

Mais comme le signe Σ indique la somme de chaque masse prise successivement avec les autres, chaque produit est compté deux fois et nous devons prendre la moitié de l'expression, puisque en réalité les masses sont supposées amenées successivement et une fois pour toutes de ∞ au point qu'elles occupent.

L'énergie potentielle qu'elles possèdent est donc

$$W = \frac{1}{2} \Sigma \frac{qq'}{r} = \frac{1}{2} \Sigma q \Sigma \frac{q'}{r}.$$

Mais $\Sigma \frac{q'}{r}$ est le potentiel au point occupé par la masse q donc

$$W = \frac{1}{2} \Sigma q V.$$

Lignes de force. — *Une masse positive d'électricité libre de se mouvoir, se déplacera suivant une trajectoire appelée ligne de force.* Cette trajectoire sera, en chaque point, normale aux surfaces de niveau, d'après ce que nous savons de celles-ci.

Représentation d'un champ électrique. — On pourra se faire une idée nette d'un champ électrique, en y traçant un certain nombre de surfaces équipotentielles. On choisira des surfaces dont le potentiel varie en progression arithmétique, d'unité en unité, par exemple. On peut aussi le représenter par des lignes de force.

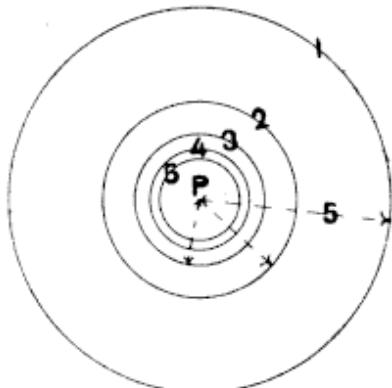


FIG. 15.

CHAMP DÛ A UNE MASSE UNIQUE. — Considérons une masse électrique q de 5 unités C. G. S. concentrée en un point P (fig 15).

Le potentiel en un point quelconque est $V = \frac{q}{r}$.

La surface équipotentielle de potentiel 1 aura pour équation $1 = \frac{5}{r}$ d'où $r = \frac{5}{1}$. Ce sera une sphère de 5 cm de rayon, dont la trace avec le plan de la feuille de papier sera une circonference de rayon de 5 cm.

La surface équipotentielle 2 aura pour équation $2 = \frac{5}{r}$ d'où $r = \frac{5}{2} = 2,5$ cm.... la surface de potentiel 5 aura pour rayon 1 cm, celle du potentiel 10 un rayon $r = \frac{5}{10} = 0,5$ cm et ainsi de suite.

Les lignes de force, perpendiculaires aux surfaces équipotentielles seront des rayons équidistants, dans ce cas particulier.

CAS DE PLUSIEURS MASSES. — On tracera par le procédé précédent, le champ électrique dû à chaque masse considérée isolément. Les points de potentiel 1 seront donnés par les sphères individuelles de potentiel 1; ceux de potentiel 2 par les intersections des lignes de potentiel 1 dû à une des masses avec celles de potentiel 1 dû à une autre, ainsi que par les sphères de potentiel 2 dues à chaque masse; ceux de potentiel 3 par les

intersections des lignes de potentiel $1 + 2$, $2 + 1$, et par les sphères de potentiel 3 et ainsi de suite...

Champ uniforme. — *Un champ est dit uniforme, quand la force électrique y est constante en grandeur et en direction.*

De ce que $H = -\frac{dV}{dn} = \text{cste}$

on conclut que dV et dn restent proportionnels, c'est-à-dire qu'en portant partout à partir d'une surface équipotentielle suivant les normales, des longueurs égales, on retombe sur une autre surface équipotentielle. Ces surfaces sont en conséquence parallèles. En outre puisque la direction de la force reste constante, les lignes de force perpendiculaires aux surfaces équipotentielles sont parallèles et ces surfaces sont donc des plans. *Un champ uniforme est caractérisé par des surfaces équipotentielles planes et également distantes. On pourra le représenter par des lignes de force parallèles et équidistantes.*

Tube de force. — Considérons un contour fermé quelconque situé dans un champ électrique. Les lignes de force passant en tous les points de ce contour forment une surface fermée qu'on appelle *tube de force* (fig. 16). Dans un champ uniforme, les tubes de force sont cylindriques; dans le champ divergent dû à une masse agissante unique, ils sont coniques.

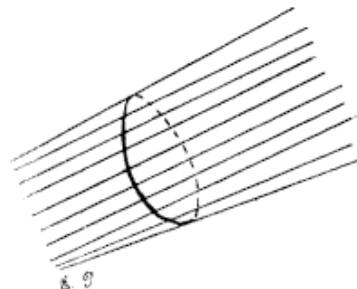
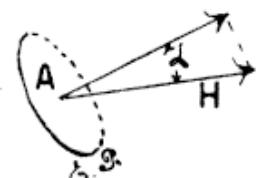


FIG. 16.

Flux de force. — L'intensité du champ pouvant être considérée comme constante dans l'espace délimité par une surface infiniment petite ds , on appelle *flux de force le produit de la composante de l'intensité du champ normale à cette surface par cette surface*.

Si α (fig. 17), est l'angle que fait la direction du champ avec la normale à l'élément, on aura par définition pour le flux élémentaire $dN = H \cos \alpha ds$.



A travers une surface finie, le flux sera

$$N = \int H \cos \alpha ds$$

FIG. 17.

l'intégration s'étendant à l'entièreté de la surface.

Tant que l'angle α avec la normale *extérieure* à la surface est $< 90^\circ$ le flux est *sortant*; il est entrant, dès que $\alpha > 90^\circ$.

Théorème de Gauss. — *Le flux de force sortant d'une surface fermée dans un champ est égal à 4π fois la somme des masses électriques enveloppées par cette surface.*

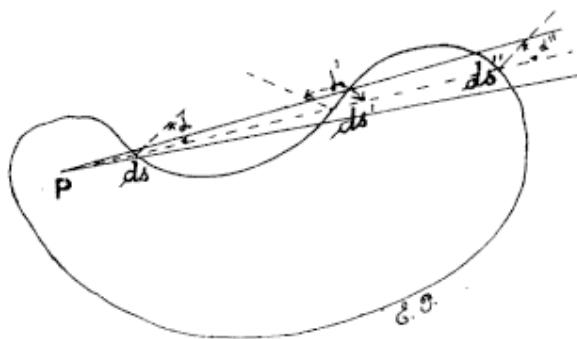


FIG. 18.

Supposons d'abord une seule masse agissante q , concentrée en un point P (fig. 18). Enveloppons-la d'une surface à contours irréguliers, de manière qu'un cône élémentaire d'angle solide dw , issu du point P, la coupe suivant les trois surfaces ds , ds' ,

ds'' , dont les normales font avec l'axe du cône les angles α , α' , α'' . En appelant r , r' , r'' , les distances des éléments de surface au centre P, les forces agissant au centre de ces sections auront respectivement pour valeur $\frac{q}{r^2}$, $\frac{q}{r'^2}$, $\frac{q}{r''^2}$ et le flux sortant, rentrant puis ressortant de la surface sera :

$$\frac{q}{r^2} \cos \alpha \, ds - \frac{q}{r'^2} \cos \alpha' \, ds' + \frac{q}{r''^2} \cos \alpha'' \, ds''.$$

Les expressions

$$\frac{ds \cos \alpha}{r^2}, \quad \frac{ds' \cos \alpha'}{r'^2}, \quad \frac{ds'' \cos \alpha''}{r''^2}$$

sont égales comme mesurant toutes trois le même angle solide dw . Le flux total sortant est donc en définitive

$$dN = q \, dw$$

et le flux total sortant à travers la surface

$$N = \int_0^{4\pi} q \, dw = 4\pi q.$$

On remarque que le flux rentrant par ds' étant égal au flux sortant par ds'' , le flux total émis par la surface est nul quand le point P lui est extérieur.

Si plusieurs masses q, q', q'', \dots existent à l'intérieur de la sur-

face considérée, chacune d'elles donne lieu au flux $4\pi q$ et le flux total sera $4\pi \Sigma q$.

REMARQUE. — Le flux de force émis par une masse q dans un angle solide w a pour valeur qw .

Constance du flux dans un tube de force. — Considérons une portion de tube de force comprise entre deux surfaces équivalentes s et s' (fig. 19).

Le flux entrant dans cette surface est $\int_0^s H \, ds$ tandis que le flux sortant en $\int_0^{s'} H' \, ds'$. En l'absence de masse agissante à l'intérieur du tube, aucune ligne de force ne traversant par définition sa paroi latérale, on aura

$$\int_0^s H \, ds = \int_0^{s'} H' \, ds'.$$

La même équation appliquée à un tube infiniment mince donne

$$H \, ds = H' \, ds'$$

ou

$$\frac{H}{H'} = \frac{ds'}{ds}.$$

Dans un tube infiniment mince, l'intensité du champ est en raison inverse de la section normale à l'axe.

Tube élémentaire. Tube unité. — Considérons au même point de l'axe d'un tube élémentaire (fig. 20), une section ds normale à l'axe de ce tube et une autre dS inclinée sur la première d'un angle α .

Pour la première le flux est Hds ; pour la seconde $H \cos \alpha \, dS$. Mais puisque $ds = dS \cos \alpha$, le flux $dN = Hds = H \cos \alpha \, dS$.

Le flux traversant une section infiniment petite, est indépendant de l'inclinaison de la section sur l'axe du tube et égal à la surface considérée multipliée par la composante suivant la perpendiculaire à cette surface.

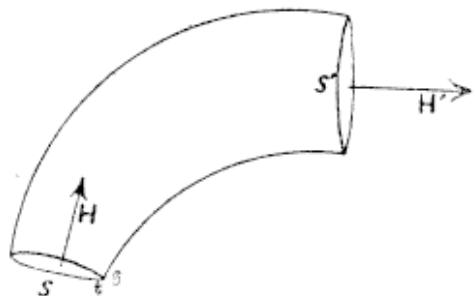


FIG. 19.

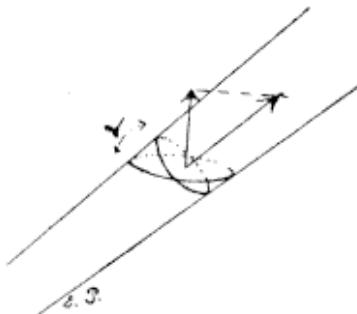


FIG. 20.

On tire de l'équation précédente

$$H = \frac{dN}{ds}$$

L'intensité d'un champs est le flux par unité de surface equipotentielle au point considéré.

Un tube tel que $\int H ds = 1$ est un *tube unité*.

La théorème de Gauss peut donc aussi s'énoncer: *Des masses électriques Σq rayonnent à travers une surface qui les enveloppe $4\pi\Sigma q$ tubes unités de force.*

Eléments correspondants. — Considérons un tube de force partant d'une surface ds (fig. 21), portant une charge dq , située sur un corps inducteur, pour aboutir à une surface ds' portant une charge dq' , située sur un corps induit environnant.

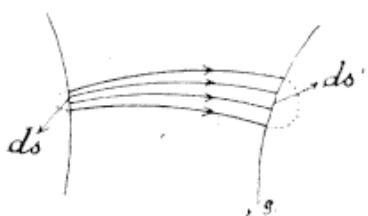


FIG. 21.

Les surfaces ds , ds' sont appelées *éléments correspondants*.

En appliquant le théorème de Gauss au volume compris dans le tube et deux surfaces internes quelconques des corps considérés (partie pointillée) le flux sortant étant nul, puisqu'à l'intérieur d'un corps conducteur en équilibre il n'existe aucune force électrique et que les lignes de force ne traversent pas les parois d'un tube de force, on a

$$4\pi (dq + dq') = 0$$

d'où

$$dq = -dq'$$

et l'on voit que *les éléments correspondants sont chargés de quantités d'électricité égales et contraires*.

Les lignes de force se développent donc entre des points chargés positivement d'une part, négativement d'autre part. Comme elles partent de tous les points d'un corps électrisé pour aller retrouver des quantités égales d'électricité de nom contraire, on voit que les corps induits avoisinant les corps chargés portent à leur surface des charges d'électricités de noms contraires dont la totalité représente la charge acquise par le corps inducteur. Ces charges de noms contraires, sont réunies par les faisceaux de lignes de force.

COROLLAIRE. — Une masse électrique, positive ou négative ne peut donc exister seule.

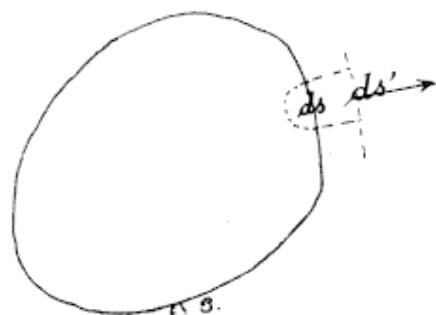
Théorème de Coulomb. — *L'intensité du champ en un point rapproché d'un conducteur en équilibre est égale à 4π fois la densité superficielle dans le voisinage de ce point.*

Soit un conducteur électrique de forme quelconque en équilibre, dans lequel nous considérons une surface infiniment petite ds (fig. 22), chargée de la quantité σds . Terminons le tube de force mené par le contour ds , d'une part à une surface équipotentielle située dans le voisinage ds' , d'autre part à une surface intérieure quelconque S . Appliquons maintenant le théorème de Gauss à la portion du tube ainsi délimitée.

Aucun flux ne traverse la surface latérale du tube ni la surface S puisqu'à l'intérieur du conducteur il n'existe aucune force électrique. Le seul flux émis traverse ds' et l'on a

$$4\pi\sigma ds = H'ds'.$$

FIG. 22.



Mais la surface ds' étant suffisamment voisine de ds

$$ds = ds',$$

d'où

$$H' = 4\pi\sigma.$$

La force exercée sur l'unité positive a le signe de σ . Si l'électrisation est positive, H' est positif; l'action est dirigée vers l'extérieur. Elle est négative et dirigée en sens inverse dans le cas contraire.

Pression électrostatique. — Cherchons qu'elle est la force H exercée à la surface même du conducteur. En un point P (fig. 23), voisin de la surface, nous venons de trouver que la force exercée sur l'unité de masse positive est $4\pi\sigma$. Cette force est dirigée vers l'extérieur et suivant la normale à la surface conductrice au point considéré. Elle est la résultante de l'action exercée par l'élément situé en face sur le conducteur et de l'action de tout le reste de la couche électrique.

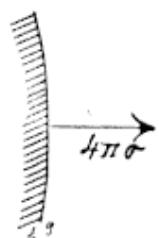


FIG. 23.

Faisons maintenant passer l'unité positive de masse de l'autre côté de la couche, infiniment près de celle-ci. La masse

se trouvant alors dans le conducteur n'est plus soumise à aucune force, $H=0$.

Or, dans la seconde position, l'action de l'élément infiniment voisin a changé de sens, celui du reste de la couche n'ayant pas subi de modification. Il en résulte que ces deux actions sont égales; qu'elles valent chacune $2\pi\sigma$ et que si nous considérons la masse positive située sur la surface même du conducteur, comme il ne reste plus que l'action du reste de la couche, celle-ci vaut $2\pi\sigma$ et est dirigée vers l'extérieur. Sur la quantité σ chargeant l'unité de surface, la force agissante aura pour expression $2\pi\sigma^2$.

Nous pouvons maintenant nous expliquer le pouvoir des pointes. Une pointe peut être considérée comme se terminant par une surface sphérique de rayon extrêmement petit. Or, sur une sphère, puisque

$$V = \frac{Q}{R} = 4\pi R\sigma$$

d'où

$$\sigma = \frac{V}{4\pi R}$$

la pression électrostatique a pour expression

$$H = 2\pi\sigma^2 = \frac{2\pi V^2}{16\pi^2 R^2} = \frac{V^2}{8\pi R^2}$$

et l'on voit que, pour un potentiel donné, elle tend vers l'infini quand R tend vers zéro.

La densité étant plus grande sur la pointe, le nombre de lignes de force qui s'en échappe sera plus grand qu'en toute autre partie. Comme ces lignes de force sont normales à la surface, elles divergeront suivant un cône ayant la pointe pour sommet, allant retrouver sur les corps conducteurs voisins une masse d'électricité de signe contraire, égale à celle accumulée sur cette pointe.

Action mécanique due à la pression électrostatique. — Supposons un disque uniformément chargé à la densité σ . Les lignes de force étant partout perpendiculaires à la surface du conducteur se présenteront comme l'indique la figure 24. Les deux faces du disque seront sollicitées par des forces égales et opposées qui s'équilibreront.

Mais si, par un artifice quelconque, nous supprimons la charge d'un des côtés du disque, il ne restera plus, sollicitant l'autre côté, que la force dirigée vers l'extérieur à raison de $2\pi\sigma^2$ dynes par cm^2 dans la partie où les lignes de force sont normales au disque. Celui-ci, lié à la charge, tendra à se déplacer dans le sens de la force qui la sollicite.

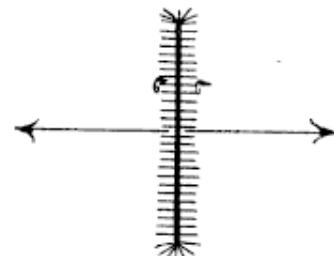


FIG. 24.

Ecran électrique. — Appliquons le théorème de Gauss à une surface fermée quelconque d'un conducteur creux relié au sol enveloppant des masses électriques q, q', \dots Q étant la quantité d'électricité induite sur sa surface intérieure par q, q', \dots nous aurons :

$$4\pi(Q + \Sigma q) = 0$$

d'où

$$Q = -\Sigma q.$$

Toutes les lignes de force émises par les masses intérieures sont donc absorbées par le corps creux, lequel jouera le rôle d'écran absolu vis-à-vis des corps extérieurs.

S'il est environné de corps électrisés, il s'électrisera extérieurement par influence, mais nous savons qu'aucune force électrique ne pouvant s'exercer à l'intérieur du moment qu'il y a équilibre, il jouera réciproquement le rôle d'écran absolu vis-à-vis des corps intérieurs également.

Il n'est pas nécessaire que la continuité métallique existe : une toile métallique pourra constituer un écran efficace.

APPLICATION. — La dernière propriété est utilisée pour mettre certains appareils de mesure à l'abri des influences extérieures ; on l'applique conjointement avec le pouvoir des pointes dans la construction des paratonnerres.

L'électroscopie donne des indications proportionnelles au potentiel. — Avant d'aller plus loin, il convient de nous rendre compte de la nature des indications que donne un électroscopie et pour cela, relions un électroscopie à feuille d'or par exemple, placé à distance suffisante pour ne pas être influencé directement, avec une sphère chargée d'une quantité Q d'électricité.

La déviation de l'électroscopie est α . Faisons alors commu-

niquer la sphère avec une autre sphère conductrice. Les feuilles d'or vont se rapprocher, la déviation deviendra $\alpha' < \alpha$. La charge Q n'ayant pas varié par cette opération, nous en concluons que les indications de l'électroscopie sont relatives à un autre facteur que la masse ou quantité électrique.

Or, ce qui a changé à coup sûr dans le cas envisagé, c'est la densité superficielle σ puisque la charge Q s'est distribuée sur une plus grande surface. D'autre part, nous avons vu que pour une sphère uniformément chargée, on a $4\pi R\sigma = V$ potentiel de la sphère. *Les indications de l'électroscopie, dépendant de σ seront donc fonction du potentiel.*

On peut généraliser cette conclusion en remarquant que la force électrique existant à la surface d'un conducteur quelconque est $2\pi\sigma = H$. Or, la force est liée au potentiel par la formule

$$H = - \frac{dV}{dn}.$$

§ 2. — Condensation de l'électricité

Capacité. — Supposons un corps conducteur en présence d'autres en communication avec le sol. Le corps étant chargé d'une quantité q , les corps voisins se recouvriront par influence d'une charge $-q$ et un électroscopie en rapport avec le premier accusera un certain potentiel.

Si nous doublons, triplons, etc., la quantité d'électricité chargeant le corps inducteur, l'électroscopie montrera que le potentiel devient 2, 3, ... fois plus grand. D'une manière générale on aura

$$Q = CV.$$

La constante de proportionnalité C s'appelle la *capacité* du corps considéré. Elle est mesurée par *la charge qu'il faut lui communiquer pour augmenter son potentiel d'une unité*.

La capacité est indépendante de la nature des corps; elle dépend de leur *forme*, du *voisinage des corps environnants* et du *diélectrique* qui les sépare.

Capacité d'une sphère. — Soit une sphère du rayon R isolée dans l'espace. Communiquons-lui une charge Q . Nous savons que $Q = CV$. Le potentiel V d'une sphère de rayon R chargée de la quantité Q vaut, comme nous l'avons vu, $\frac{Q}{R}$ d'où $Q = VR$. En remplaçant il vient $C = R$. *La capacité d'une sphère est mesurée par son rayon.*

Ex. 1. *Quelle est la capacité d'une sphère d'un myriamètre de rayon ?*

$$R = 1\ 000\ 000 \text{ cm}, \quad C = 10^6 \text{ cm}.$$

Ex. 2. *Quelle est la capacité de la terre ?*

$$R = \frac{4\ 000\ 000\ 000}{2\pi} = 637 \cdot 10^6 \text{ cm} = C.$$

L'unité pratique de capacité appelée *farad international* est, par définition, la capacité qui *emmagazine un coulomb sous la différence de potentiel d'un volt*. Le coulomb, avons-nous vu, vaut $3 \cdot 10^9$ unités C. G. S. électrostatiques de quantité, le volt

$\frac{1}{3 \cdot 10^2}$ unités C. G. S. de potentiel. En vertu de la relation générale

$$C = \frac{Q}{V}, \quad \text{le farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}} = 3 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^2 = 3^2 \cdot 10^{11}.$$

Cette quantité étant beaucoup trop grande pour les besoins de la pratique, on emploie couramment le *microfarad* qui vaut $\frac{3^2 \cdot 10^{11}}{10^6} = 3^2 \cdot 10^5$ unités C. G. S. électrostatiques.

Dans les exemples ci-dessus, la capacité était dans le premier cas $\frac{10^6}{3^2 \cdot 10^5} = \frac{10}{9} = 1,11$ microfarad et dans le second cas 707 microfarads.

Sphère équivalente. — On peut déterminer dans chaque cas *la sphère dont la capacité équivaut à celle du corps considéré*. A cette fin on donne une charge Q à une sphère de rayon connu R . On la met alors en communication lointaine (pour rendre négligeable l'effet inducteur) par un fil mince (pour que la capacité de celui-ci ne vienne pas fausser le résultat) avec le conducteur étudié A . La charge Q se partage entre la sphère et A , ce dernier prenant la charge q .

Le potentiel de la sphère R est devenu $\frac{Q - q}{R}$. Il est égal à celui de A. Si A était une sphère de rayon x , son potentiel serait $\frac{q}{x}$. On a donc

$$\frac{Q - q}{R} = \frac{q}{x}$$

d'où $x = R \frac{q}{Q - q}$.

x sera connu si nous connaissons Q et q . Dans l'état actuel nous ne pouvons mesurer ces quantités, mais il nous est aisément de déterminer le rapport $\frac{Q}{Q - q} = p$ en prenant, au moyen du plan d'épreuve, une petite charge sur R avant et après sa liaison avec A et portant le plan dans une balance de torsion. On tire de la dernière proportion $\frac{q}{Q - q} = p - 1$ et enfin $x = R(p - 1)$.

Condensateur. Force condensante. — On appelle *condensateur* tout système de conducteurs agencé de manière que la capacité de l'un d'eux se trouve notablement augmentée.

Soit d'abord un conducteur isolé A de capacité C chargé d'une quantité Q au potentiel V . Nous savons que $Q = CV$. Approachons maintenant de ce conducteur un autre conducteur en rapport avec le sol. La capacité aura changé. Elle sera devenue $C' > C$ et, pour la même différence de potentiel V entre le sol (au potentiel zéro) et le corps C, la charge devient $Q' = C'V$.

La quantité Q chargeant A dans le second cas donnerait un potentiel plus petit V' tel que l'on aurait encore

$$Q = C'V'$$

d'où $\frac{C'}{C} = \frac{Q'}{Q} = \frac{V}{V'}$.

$\frac{C'}{C}$ représente la *force condensante* du condensateur. *Elle est égale au rapport des charges acquises sous un même potentiel, ou en rapport inverse des potentiels obtenus avec une même charge.*

Divers types de condensateurs. — La forme généralement adoptée est celle de deux feuilles conductrices parallèles appelées *armatures*, séparées par une feuille isolante. L'une des armatures appelée *collecteur* est mise en rapport avec la source d'électricité, l'autre appelée *condenseur* avec la terre. Les deux dispositifs de condensateurs le plus anciennement connus sont la bouteille de Leyde et le condensateur d'Aepinus.

Bouteille de Leyde. — La bouteille de Leyde, figure 25, se compose d'une bouteille à large goulot garnie intérieurement et extérieurement d'une feuille d'étain jusqu'à une faible distance de son arête supérieure. Ces feuilles constituent les deux armatures. L'armature intérieure est mise en rapport par une masse de clinquant avec une tige métallique traversant le bouchon fermant la bouteille, recourbée et terminée extérieurement par un bouton.

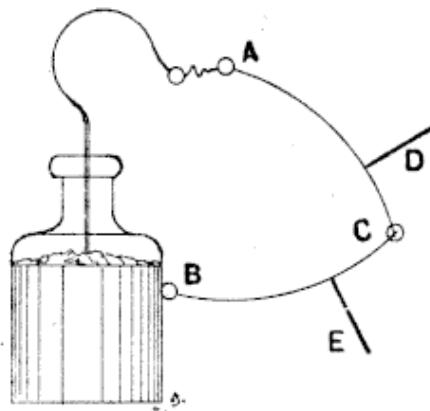


FIG. 25.

On provoque la décharge de la bouteille au moyen d'un excitateur constitué par deux boules métalliques A et B montées sur des tiges articulées en C et que l'on manœuvre au moyen des poignées de verre D et E. La boule B étant en contact avec l'armature extérieure, en approchant progressivement la boule A de celle terminant l'armature intérieure, on provoque l'éclatement de l'étincelle et la décharge de l'appareil.

Condensateur d'Aepinus. — Deux plateaux métalliques isolés mobiles, A et C (fig. 26), peuvent venir en contact avec les faces d'une plaque de verre B.

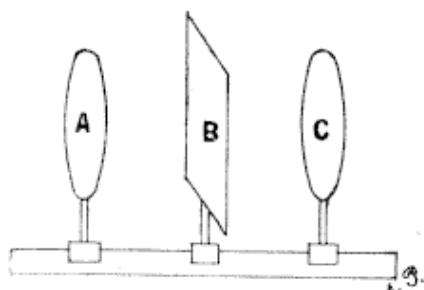


FIG. 26.

Un appareil simple de l'espèce est obtenu en collant de part et d'autre d'une lame en verre une feuille d'étain de dimensions un peu moindres, les parties non recouvertes du verre étant vernies à la gomme laque.

Quand on veut obtenir des capacités élevées, on superpose

alternativement une feuille d'étain et une feuille de mica ou de papier. Toutes les feuilles d'étain de rang impair débordent d'un côté, sont réunies ensemble et forment une des armatures; les feuilles d'étain de rang pair débordent de l'autre côté et sont aussi réunies entre elles, constituant la seconde armature.

Un autre mode de construction consiste à séparer deux longues feuilles d'étain par du papier mince et fort puis, après les avoir recouvertes de papier également, de replier le tout en le serrant de manière à former un ensemble compact. Deux lames métalliques soudées à l'une des extrémités des feuilles d'étain servent à les raccorder à des bornes facilitant les connexions.

Condensateur sphérique. — Considérons deux sphères métalliques concentriques rapprochées, dont l'extérieure de rayon R est en rapport avec la terre et mettons la sphère intérieure, de rayon r , en communication avec une source d'électricité. Elle se charge d'une quantité Q , tandis qu'une quantité $-Q$ est attirée par influence sur l'armature extérieure. Nous aurons $C = \frac{Q}{V}$.

Or au centre des sphères le potentiel

$$V = \frac{Q}{r} - \frac{Q}{R} = \frac{Q(R - r)}{rR}.$$

La capacité de l'appareil est donc

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{rR}{R - r} = \frac{r^2}{e} \quad (1)$$

si les sphères sont suffisamment grandes et très rapprochées. Multiplions haut et bas par 4π il vient

$$C = \frac{4\pi r^2}{4\pi e} = \frac{S}{4\pi e} \quad (2)$$

Ex. Soit une sphère intérieure de 12 cm de rayon séparée de la sphère extérieure par une distance de 0,8 mm, la capacité sera $\frac{144}{0,08} = 1800$. Isolée, la sphère n'aurait eu qu'une capacité de 12.

La force condensante est donc $\frac{1800}{12} = 150$.

Pour porter la sphère isolée au potentiel 1, il eût suffi de 12 unités. Quand elle est enveloppée par la seconde sphère reliée à la terre, puisque $V = \frac{Qe}{r^2}$ et que $\frac{e}{r^2} = \frac{1}{1800}$ il faut alors lui communiquer une charge de 1800 unités pour arriver au même résultat.

Condensateur à armatures parallèles. — La condition conduisant à la formule (2) est que les surfaces en présence soient suffisamment rapprochées. Elles deviennent alors égales. Par conséquent la formule

$$C = \frac{S}{4\pi e}$$

s'applique à tout condensateur dont les armatures forment des surfaces parallèles rapprochées se recouvrant entièrement, comme dans la bouteille de Leyde et les condensateurs plans. On peut d'ailleurs en donner une démonstration générale.

A part, en effet, sur les bords, où elles restent perpendiculaires aux surfaces courbes des arêtes, les lignes de force sont parallèles; les surfaces de niveau sont planes, le champ uniforme. L'intensité du champ constante entre les armatures a pour valeur

$$H = \frac{V}{e} = 4\pi\sigma$$

d'après le théorème de Coulomb.

On voit donc que la densité possède la même valeur sur toute l'étendue de la surface des armatures, sauf aux bords. En désignant par S cette surface on a

$$Q = S\sigma = \frac{SV}{4\pi e}.$$

La capacité est donc encore exprimée par $\frac{S}{4\pi e}$ puisque $C = \frac{Q}{V}$.

Ex. Un condensateur formé de deux plateaux métalliques d'un mètre carré de surface, placés dans l'air à 1 mm l'un de l'autre, a pour capacité

$$\frac{10\,000}{4\pi \cdot 0,1} = 15\,920 \text{ cm} = \frac{15\,920}{3^2 \cdot 10^5} = 0,176 \text{ microfarad.}$$

Condensateur cylindrique. — Soient deux armatures concentriques cylindriques indéfinies, de rayons R_1 et R_2 (fig. 27), dont

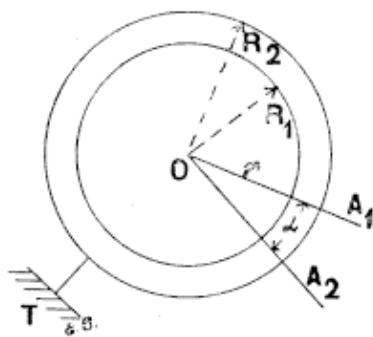


FIG. 27.

l'armature extérieure est en communication avec la terre, l'autre étant portée au potentiel V . Celle-ci prendra la charge Q , l'autre la charge $-Q$ et les lignes de force réuniront normalement ces deux surfaces. Les surfaces équipotentielles sont conséquemment des surfaces cylindriques concentriques aux armatures et les tubes de force les volumes compris entre des plans axiaux. En appelant q et c la charge et la capacité par unité de longueur, nous pourrons écrire

$$c = \frac{q}{V} = \frac{2\pi R_1 \sigma}{V}.$$

Mais en vertu du théorème de Coulomb, l'intensité du champ au voisinage immédiat du collecteur est

$$H_1 = 4\pi\sigma$$

d'où

$$c = \frac{R_1 H_1}{2V}.$$

Cherchons à évaluer H_1 et V en fonction des dimensions du condensateur. Nous savons que $H = -\frac{dV}{dr}$. Pour pouvoir intégrer cette équation différentielle, remplaçons H en fonction de r . Considérons à cet effet dans un tube de force la surface cylindrique s de rayon r limitée par deux plans axiaux OA_1, OA_2 , faisant entre eux un angle α . Cette surface est équipotentielle. Le flux constant traversant le tube de force est

$$Hs = H\alpha r = H_1 \alpha R_1 = e^{te}.$$

d'où

$$H = \frac{H_1 R_1}{r}$$

$$\int_V^0 -dV = \int_{R_1}^{R_2} H dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{H_1 R_1}{r} dr = H_1 R_1 \log_e \frac{R_2}{R_1}$$

et

$$V = H_1 R_1 \log_e \frac{R_2}{R_1}.$$

Si nous remplaçons maintenant V par sa valeur dans la formule donnant la capacité nous avons

$$c = \frac{I}{2 \log_e \frac{R_2}{R_1}}.$$

Energie d'un condensateur chargé. — La charge Q d'un condensateur de capacité C dont les armatures sont maintenues sous une différence de potentiel V étant $Q = CV$, l'énergie électrique emmagasinée sera, en vertu de l'équation précédemment établie

$$W = \frac{I}{2} QV = \frac{I}{2} CV^2.$$

On peut d'ailleurs arriver aisément à cette formule, en calculant quel est le travail qu'il faut dépenser pour amener la charge Q du potentiel o au potentiel V . En augmentant graduellement la charge, le potentiel augmente aussi et, quand la charge atteint la valeur Q , le potentiel arrive à V . Au moment où la charge est q et le potentiel v , le travail pour ajouter la charge dq est mesuré par

$$v dq = \frac{q}{C} dq.$$

Le travail total à développer pour faire varier la charge o à Q est ainsi

$$\int_o^Q \frac{q}{C} dq = \frac{Q^2}{2C} = \frac{I}{2} CV^2.$$

Mais nous avons vu précédemment que $C = \frac{S}{4\pi e}$. L'énergie emmagasinée dans un condensateur est donc exprimée par $\frac{SV^2}{8\pi e}$. Elle est proportionnelle à la surface, au carré de la différence du potentiel et inversement proportionnelle à l'épaisseur du diélectrique qui sépare les armatures.

La différence de potentiel ne peut être augmentée au-delà de la valeur pour laquelle le diélectrique est percé et cette valeur est d'autant moins élevée que l'épaisseur de ce dernier est plus petite. Quand la limite est atteinte, on ne peut agir que sur la surface, ou en couplant de certaine manière les condensateurs dont on dispose.



Couplage des condensateurs. — Les condensateurs peuvent être couplés en dérivation ou en série.

Dans le **GROUPEMENT EN DÉRIVATION** dit aussi **EN QUANTITÉ**, ou en **surface**, toutes les armatures sont réunies de part et d'autre (fig. 28).

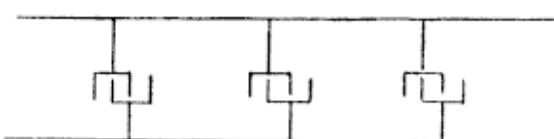


FIG. 28.

c_1, c_2, \dots , étant les capacités des divers condensateurs, U la différence de potentiel appliquée, q_1, q_2, \dots , les quantités

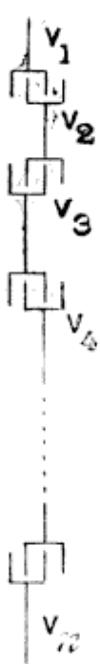
d'électricité qui les chargent, C et Q leurs capacité et charge totales, on a évidemment

$$Q = q_1 + q_2 + \dots$$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{q_1}{U} + \frac{q_2}{U} + \dots = c_1 + c_2 + c_3 + \dots$$

La capacité résultante de condensateurs groupés en quantité est égale à la somme de leurs capacités.

EXEMPLE. — Quatre condensateurs des capacités respectives de 7, 4, 2 et 9 microfarads, disposés en quantité, correspondent à un seul condensateur ou exercent le même effet d'emmagasinement qu'un seul appareil de $7 + 4 + 2 + 9 = 22$ microfarads.



GROUPEMENT EN SÉRIE OU TENSION OU CASCADE. — Ici la liaison se fait de la seconde armature du premier à la première armature du second, de la seconde armature de ce dernier à la première du troisième et ainsi de suite. Supposons qu'une différence de potentiel $V_1 - V_n$ soit appliquée aux armatures extrêmes (fig. 29).

On aura, les quantités d'électricité qui chargent tous les condensateurs étant évidemment égales, puisque c'est le même flux qui les a tous traversés lorsqu'on a appliqué aux extrémités de la série la différence de potentiel $V_1 - V_n$:

$$Q = c_1 (V_1 - V_2)$$

$$Q = c_2 (V_2 - V_3)$$

$$\dots$$

$$\dots$$

FIG. 29.

d'où

$$\frac{Q}{c_1} = V_1 - V_2, \quad \frac{Q}{c_2} = V_2 - V_3, \quad \dots$$

et, en additionnant :

$$\frac{Q}{c_1} + \frac{Q}{c_2} + \dots = V_1 - V_n.$$

En appelant C_x la capacité combinée de la cascade on a par définition

$$\frac{Q}{C_x} = V_1 - V_n,$$

donc

$$\frac{Q}{c_1} + \frac{Q}{c_2} + \dots = \frac{Q}{C_x} \text{ ou } \frac{I}{C_x} = \frac{I}{c_1} + \frac{I}{c_2} + \dots$$

et enfin

$$C_x = \frac{1}{\sum \frac{1}{c}}.$$

On peut l'énoncer : *La capacité combinée de condensateurs groupés en série est égale à l'inverse de la somme des inverses des capacités des condensateurs constituants.*

EXEMPLE. — Les mêmes condensateurs que précédemment, groupés en série, ont une capacité de 0,964 microfarad.

En résumé, quand on dispose d'un certain nombre de condensateurs, on obtiendra une capacité maximum en les groupant tous en dérivation et une capacité minimum en les groupant en série.

Entre ces deux groupements limites viennent s'intercaler toutes les combinaisons que l'on peut faire en montant en dérivation des groupes d'éléments mis en série.

Il convient, bien entendu, que chaque série de condensateurs possède le même nombre d'appareils, sinon une différence de potentiel donnée étant appliquée à des séries inégales, les condensateurs des séries les plus nombreuses, seraient soumis à des différences de potentiel moindres et par conséquent moins bien utilisés que les autres.

Énergie maximum que l'on peut emmagasiner dans une batterie. — Soient n condensateurs de capacité c capables de supporter la différence de potentiel maximum V en emmagasinant la charge q .

En les associant en surface leur capacité est nc , leur charge totale ncV et leur énergie $\frac{1}{2}ncV^2$.

Associons les maintenant en tension. La capacité totale sera $\frac{c}{n}$, mais on pourra leur appliquer une différence de potentiel nV . La charge maximum sera cV et l'énergie $\frac{ncV^2}{2}$ comme tantôt. Done *l'énergie est la même dans les deux cas.*

On recourra au premier montage si la source d'électricité dont on dispose débite sous faible potentiel et au montage en cascade si, au contraire, elle développe un potentiel élevé.

L'expression précédente $\frac{ncV^2}{2} = \frac{n}{2}qV$ est exprimée en joules, si c , V et q sont respectivement évalués en farads, volts et coulombs.

Nous avons vu qu'en unités C.G.S. l'unité de travail, c'est-à-dire l'erg, est obtenue quand on modifie d'une unité C.G.S. de potentiel, le potentiel de l'unité C.G.S. de quantité : 1 erg = 1 unité de quantité \times 1 unité de différence de potentiel. De même on doit dépenser l'unité pratique de travail, le joule, où elle est dégagée, suivant que le potentiel d'une unité pratique de quantité augmente ou diminue d'une unité pratique de potentiel.

1 joule = 1 coulomb \times 1 volt = $\frac{3 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^2} = 10^7$ unités C.G.S. Nous retombons bien sur la valeur indiquée dans les généralités.

Pouvoir inducteur spécifique. — Prenons deux condensateurs plans identiques, dont les armatures sont séparées dans le premier par de l'air, dans le second par un isolant quelconque. Une des armatures du premier étant en rapport avec le sol, portons l'autre armature au potentiel V accusé par la déviation α d'un électroscopie à feuilles d'or qu'on y relie. Cette armature porte la charge Q . Supprimons la communication avec la source d'électricité et réunissons le second condensateur en parallèle avec le premier. La charge Q va se répartir sur les deux et le potentiel deviendra V' , mesuré par la déviation α' de l'électroscopie. En appelant c et c' les capacités des deux condensateurs, nous aurons évidemment

$$Q = cV = (c + c')V'$$

d'où

$$\frac{V}{V'} = \frac{c + c'}{c} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

et enfin

$$\frac{c'}{c} = \frac{\alpha - \alpha'}{\alpha'} = \frac{\alpha}{\alpha'} - 1.$$

Le rapport $\frac{c'}{c}$ s'appelle *capacité inductive spécifique* ou *pouvoir inducteur spécifique* du corps par rapport à l'air. Voici cette valeur pour quelques isolants usuels :

Caoutchouc naturel	2,12 à 2,35
» vulcanisé	2,69 à 2,94
Verre dur	6,96
Fibre	1,19 à 2,66
Ebonite	2 à 2,8
Gomme laque	3,10
Gutta-percha.	3,3 à 4,9
Mica.	5,7 à 8
Paraffine	1,98 à 2,32

Valeur du coefficient de la loi de Coulomb. — Dans le cas considéré en premier lieu, le milieu étant l'air et la distance des armatures e , le champ constant a pour valeur

$$H = \frac{V}{e} = 4\pi\sigma$$

les armatures étant chargées à la densité σ .

Si au lieu d'air nous avons un milieu de pouvoir inducteur spécifique K , la densité devient $\sigma' = K\sigma$ et ainsi, la même différence de potentiel a provoqué la présence d'une charge K fois plus grande ou, inversement, il faut K fois plus d'électricité pour développer le même champ ou encore une même quantité d'électricité détermine une force K fois plus petite.

Par conséquent le coefficient de la loi de Coulomb est fonction de la capacité inductive spécifique et l'on a : $F = \frac{1}{K} \frac{qq'}{r^2}$. Donc, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, la définition donnée pour l'unité de quantité ne convient que pour l'air ou tout autre milieu dont la constante diélectrique égale l'unité.

Flux d'induction. — Dans le cas où les armatures sont séparées par un diélectrique de pouvoir inducteur spécifique K ,

la même différence de potentiel y provoque la présence d'une charge K fois plus grande. Les lignes de force réunissant les éléments correspondants seront K fois plus nombreuses et le flux par unité de section ne sera plus H mais KH . *C'est ce que l'on appelle le flux d'induction.*

Charge résiduelle. — En pratique les phénomènes de condensation de l'électricité sont un peu plus compliqués que ce que nous avons supposé jusqu'ici. En reliant un condensateur à une source d'électricité, non seulement il prend instantanément une certaine charge (la plus grande partie de celle qu'il est capable d'acquérir) mais, en maintenant la communication avec la source, il continue à absorber de l'électricité pendant longtemps encore.

A la décharge le phénomène est inverse : il n'est possible de ramener définitivement les armatures à l'état neutre, que si on les réunit métalliquement pendant un certain temps. En rompant la communication aussitôt après l'étincelle de décharge et laissant les armatures isolées, on peut, surtout avec des diélectriques impurs (verre, gutta-percha, caoutchouc...) obtenir une série de décharges qui vont en s'affaiblissant et sont dues à la *charge résiduelle* ; la première correspond à la charge *disponible*. La charge résiduelle varie avec la durée de l'électrisation du condensateur, tandis que la charge disponible est constante. Aussi, convient-il d'adopter, comme *capacité du condensateur, le rapport entre la charge disponible et la différence de potentiel.*

Absorption électrique. — Prenons un condensateur constitué de parties amovibles (fig. 30), chargeons-le et laissons-le isolé.

Nous le décomposons ensuite en trois parties : A gobelet métallique, armature extérieure ; B gobelet en verre, diélec-

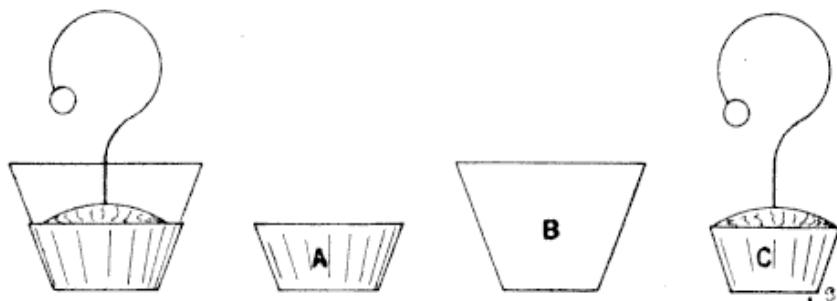


FIG. 30.

trique; C masse métallique, armature intérieure. Si, après avoir déchargé les armatures en les portant au contact, ce qui ne donne que de faibles étincelles, on reconstitue la bouteille et provoque la décharge, on constate que l'étincelle fournie est presque aussi forte que celle que l'on aurait eue en déchargeant préalablement le condensateur à la façon habituelle.

Conclusion : la charge électrique se trouvait contenue, tout au moins en grande partie, dans le diélectrique.

Constante diélectrique. — Comme l'accuse le dernier tableau, la capacité inductive spécifique n'est pas constante. Elle est variable avec la durée de la charge et comprise entre un maximum correspondant aux longues durées et un minimum correspondant aux faibles. Cette dernière limite varie beaucoup avec les substances. Elle vaut pour le verre $\frac{1}{10^8}$ de seconde, pour le soufre et l'ébonite $\frac{1}{10}$.

Dilatation électrique. — La charge donnée à une bouteille de Leyde provoque une augmentation de volume qui disparaît avec la décharge. Cette dilatation est proportionnelle au carré du rapport de la différence du potentiel à l'épaisseur de la bouteille.

Polarisation et rôle du diélectrique. — Le diélectrique agit comme s'il se polarisait, c'est-à-dire comme si chacun de ses éléments de volume présentait des charges égales et contraires d'électricité perpendiculairement à la direction du champ. Quand la polarisation est uniforme, aucune trace d'électrisation ne paraît dans le milieu diélectrique, les charges opposées en contact des éléments consécutifs se neutralisant mutuellement. L'électrisation ne se manifeste que sur les surfaces terminales.

On a cru, en premier lieu, que l'énergie électrique résidait sur les conducteurs eux-mêmes, le diélectrique ne jouant qu'un rôle inerte, comme dans les actions gravifiques. Puis on a abandonné l'idée des actions à distance, supposant que c'était le milieu interposé qui transmet les effets constatés, en vertu d'une elasticité spéciale, pour enfin admettre que l'énergie emmagasinée est entièrement contenue dans le diélectrique.

Suivant Faraday, les lignes de force doivent être considérées comme des fils élastiques tendus, qui se repousseraient mutuel-

lement. La pression et la tension par unité de surface auraient la même valeur p en chaque point d'un élément et, d'après Maxwell

$$p = \frac{F^2}{8\pi}.$$

Cette quantité représente précisément l'énergie existant par unité de volume, si toute l'énergie se répartit uniformément dans le milieu.

Considérons en effet un condensateur plan d'épaisseur e , dont les armatures présentent la différence de potentiel V .

On a pour l'énergie totale

$$W = \frac{1}{2} qV = \frac{1}{2} S\sigma V.$$

Le volume diélectrique interposé étant Se , chaque unité de volume contient l'énergie

$$\frac{W}{Se} = \frac{1}{2} \frac{\sigma V}{e}.$$

Mais $H = \frac{V}{e} = 4\pi\sigma$. Remplaçant σ et V par leur valeur en fonction de H il vient pour l'énergie volumique $\frac{H^2}{8\pi}$. Ceci pour l'air.

S'il s'agit d'un diélectrique de pouvoir K , l'expression devient $\frac{KH^2}{8\pi}$.

§ 3. — Décharge d'un condensateur.

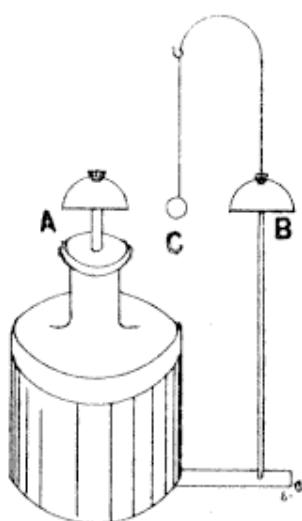


FIG. 31.

Un condensateur peut être ramené à l'état neutre de diverses manières.

1^o **Décharge lente ou convective.** — Terminons l'armature intérieure d'une bouteille de Leyde par un timbre métallique A (fig. 31). Plaçons en regard un timbre B relié à l'armature extérieure et entre les deux une balle de sureau C suspendue par un cordonnet de soie. Nous aurons ainsi formé un *carillon électrique*. Si la bouteille est chargée, la balle C attirée par le timbre le plus voisin vient le frapper, prend une charge

de même signe, est repoussée, puis, attirée par la charge de nom contraire de l'autre timbre, vient le frapper et ainsi de suite.

On donne à l'expérience une autre forme intéressante, en remplaçant la balle par une araignée en clinquant qui se précipite alternativement sur l'un et sur l'autre des boutons en rapport avec les armatures, jusqu'à ce que la charge soit neutralisée.

2^o Décharge conductive. — En réunissant les deux armatures par un conducteur, le condensateur revient immédiatement à l'état neutre. Qu'est devenue alors l'énergie emmagasinée dans l'appareil ?

On peut montrer aisément au moyen d'un thermomètre approprié, le thermomètre de Riess, que cette énergie s'est transformée en chaleur. Pour cela, la décharge est envoyée à travers un fil de platine F (fig. 32) réuni à deux bornes B₁, B₂, tendu dans une sphère en verre A remplie d'air, raccordée à un tube horizontal capillaire C plein de liquide et se terminant par une partie évasée D. Au moment de la décharge, l'air échauffé se dilate et le liquide monte brusquement dans le tube D. L'échauffement est assez prompt pour que

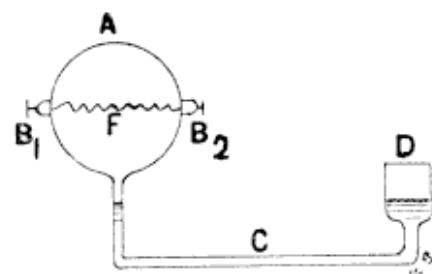


FIG. 32.

l'on n'ait pas à se préoccuper des causes de déperdition. Comme le volume gazeux est suffisamment grand pour que son augmentation soit insignifiante, celle-ci n'influe pas sur la pression et le déplacement est proportionnel à la variation de pression, laquelle est elle-même proportionnelle à l'élévation de température et finalement à la quantité de chaleur dégagée.

L'appareil permet de vérifier la formule $W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$ en le faisant traverser par des charges variées, ou par une même charge communiquée à des batteries de capacités diverses.

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE. — Si dans le circuit de la décharge on intercale deux conducteurs différents que l'on place alternativement l'un dans la boule du thermomètre de Riess, l'autre à l'extérieur, on constate que les quantités de chaleur respectivement dégagées par les deux portions de fil sont dans un rapport constant, indépendamment de la décharge et des conditions

dans lesquelles elle s'effectue. Le phénomène est donc lié à la nature du conducteur, à sa *résistance*.

Deux conducteurs présentent des résistances égales quand, traversés par la même décharge, ils dégagent la même quantité de chaleur.

On constate par expérience, que *la résistance d'un conducteur cylindrique est proportionnelle à sa longueur, à un coefficient ρ et inversement proportionnelle à sa section*

$$R = \rho \frac{l}{s}.$$

ρ est la *résistance spécifique* ou *résistivité* ou *résistibilité* du métal considéré. C'est la résistance existant entre les faces opposées d'un cube de ce métal d'un centimètre de côté.

L'inverse de la résistance $\frac{I}{R} = G$ s'appelle la *conductance*.

On a donc $G = \frac{s}{\rho l} = \gamma \frac{s}{l}$. γ est la conductance spécifique ou *conductibilité* du conducteur.

L'unité pratique de résistance est l'*ohm international*. Il est représenté, avec une approximation de $\frac{1}{5\,000}$, par la résistance, à la température de glace fondante, d'une colonne mercurielle de 14,452 grammes, d'une section transversale constante (un millimètre carré) et d'une longueur de 106,3 cm.

L'unité pratique de conductance est le *mho* anagramme par renversement du mot ohm.

FUSION ET VOLATILISATION DES MÉTAUX. — Lorsqu'aucun travail extérieur n'est accompli, l'énergie de la décharge est entièrement convertie en chaleur. En appelant D la quantité de chaleur dégagée en calories et J l'équivalent mécanique de la chaleur on aura

$$\frac{I}{2} QV = \frac{I}{2} CV^2 = \frac{I}{2} \frac{Q^2}{C} = W = DJ.$$

La quantité W est fixe et se répartit entre les divers conducteurs que la décharge parcourt en série, au prorata de leur résistance. Si l'un des conducteurs est très mince, sa résistance est grande et c'est sur lui que se concentre la majeure partie de la chaleur dégagée. Celle-ci étant suffisante, le conducteur fond

ou se volatilise. Cette dernière action est violente et accompagnée d'une véritable explosion.

Si l'on réunit par un fil mince les deux boules d'un excitateur constitué de deux tiges T_1 , T_2 (fig. 33) pivotées sur des pieds isolants, qu'on les plonge dans un verre rempli d'eau, puis que l'on envoie dans le fil une décharge qui le volatilise, l'explosion se produisant dans un milieu pratiquement incompressible, le verre se brise avec fracas.

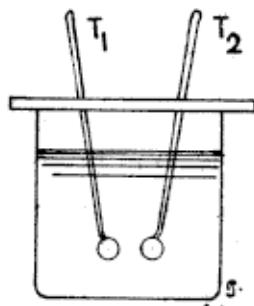


FIG. 33.

3° Décharge disruptive. *A. À travers les corps mauvais conducteurs solides.* — En interposant un corps mauvais conducteur sur le trajet de la décharge, l'énergie de celle-ci se dépense en travaux mécaniques d'éclatement et de rupture. On perce facilement une feuille de papier, un carton, une lame mince en verre, au moyen de décharges même faibles.

Cette dernière expérience se réalise comme l'indique la figure 34. Entre les deux pointes A et B s'intercale la lame F. Il est bon d'entourer d'une goutte d'huile la pointe supérieure. A l'aide de décharges puissantes on perce de fortes épaisseurs de verre, jusqu'à plusieurs centimètres, mais alors les pointes doivent être noyées dans un corps mauvais conducteur, comme la cire ou la résine.

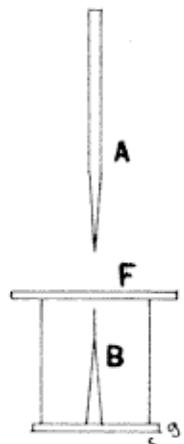


FIG. 34.

B. À la surface de corps mauvais conducteurs. — Quand une batterie de bouteilles de Leyde est chargée jusqu'au point où la décharge spontanée va se produire, on entend des craquements et l'on voit de nombreux traits de feu parcourir en se ramifiant la surface des bouteilles. On augmente ces effets avec la *bouteille étincelante*, qui est une bouteille de Leyde dont l'armature extérieure est formée de grains de limaille collés avec du vernis de manière à établir une certaine discontinuité, tandis que l'armature intérieure est prolongée par une feuille d'étain jusqu'à une petite distance de la surface métallisée.

On obtient également de beaux effets avec les *carreaux étincelants*.

celants agencés en collant sur la surface d'un tube en verre, à la suite les uns des autres et en hélice, de petits losanges d'étain qui paraissent réunis par une trainée de feu quand l'étincelle éclate entre eux.

C. Décharge à travers l'air. Étincelle électrique. — Quand la décharge se produit dans l'air, elle affecte la forme d'une étincelle dont on peut distinguer quatre types.

1^o ETINCELLE PROPREMENT DITE. — Elle éclate avec un bruit sec, indice d'un ébranlement violent de l'air. Courte, elle est rectiligne et d'autant plus épaisse que la décharge est plus importante. Au fur et à mesure qu'elle s'allonge, ou que la capacité du condensateur diminue, le trait devient plus grêle, moins lumineux et se propage en zigzag.

RIGIDITÉ ELECTROSTATIQUE OU DISTANCE EXPLOSIVE. — La distance à laquelle l'étincelle éclate dans l'air à la pression ordinaire dépend de la différence de pression entre les conducteurs terminaux ou *electrodes*. Elle dépend aussi, mais dans une faible mesure, de leur forme. Elle est plus grande, par exemple, entre deux sphères qu'entre deux plateaux.

Distances des deux boules en cm.	Décharges en unités C. G. S.	de	potentiel en volts.
0,1	15		4 500
0,5	73		21 900
1	124		37 200
1,5	154		46 200
2	177		53 100
3	210		63 000
4	238		71 400
5	259		77 700
10	325		97 500
12	337		101 100
15	380		105 000

Comme on le voit, le potentiel explosif paraît tendre vers une limite inférieure à 400 unités C. G. S. correspondant à 120 000 volts. La figure 35 traduit le tableau précédent en diagramme.

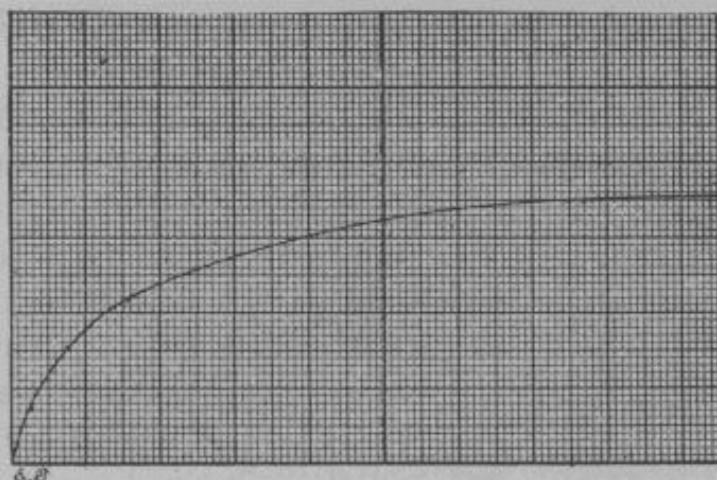


FIG. 35.

INFLUENCE DE LA PRESSION. — Quand on diminue la pression de l'air, on constate que la distance explosive diminue rapidement, puis remonte brusquement. *Il existe donc une pression pour laquelle la résistance à la décharge passe par un minimum.* Cette limite varie avec les gaz et la forme du récipient qui les contient. Elle est de 3 millimètres pour l'air dans un espace de forme ovoïde, mais beaucoup plus petite dans les tubes. La pression continuant à diminuer, l'étincelle ne passe plus quelle que soit la différence de potentiel. *La présence de la matière semble donc nécessaire au transport de l'électricité.*

2° **L'AIGRETTE** est l'étincelle très ramifiée, pâle, violacée, accompagnée d'un bruissement spécial qui se produit quand la distance des électrodes est très grande ou la capacité du condensateur très faible. Au pôle + ou *anode* l'ensemble affecte la forme d'une gerbe partant d'un pédoncule (fig. 36), tandis qu'au pôle négatif ou *cathode*, on remarque une simple couche lumineuse ou une petite étoile brillante, s'il se termine en pointe.

3° **LES LUEURS**, qui ne se remarquent qu'au pôle positif, apparaissent quand la pression du gaz est réduite à quelques millimètres. On les met en évidence au moyen de l'œuf électri-

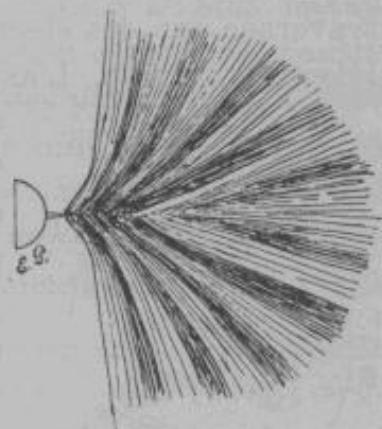


FIG. 36.

que (fig. 37), constitué par une ampoule en verre dans laquelle se trouvent les deux électrodes et avec les *tubes de Geissler* (fig. 38), tubes fermés, rétrécis vers le milieu, dont les parties terminales contiennent des fils de platine traversant le verre et qui servent d'électrodes.

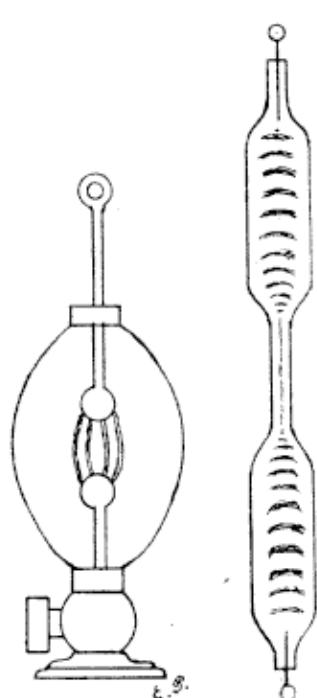


FIG. 37.



FIG. 38.

La teinte de la lueur dépend de la nature du gaz contenu dans le tube, de sa pression et de la densité du flux qui le traverse : rose dans l'air, blanche dans l'acide carbonique, bleu violet dans l'hydrogène. On y remarque souvent le phénomène de la *stratification*, produit par la décomposition de la masse lumineuse positive en couches alternativement brillantes et obscures.

La lumière émise par les lueurs provoque la fluorescence du verre, surtout s'il contient un peu d'urane. Il présente alors une belle fluorescence verte. De très beaux effets sont obtenus en entourant les tubes de solutions de corps fluorescents comme le sulfate de quinine.

4° RAYONS CATHODIQUES. — Soit une ampoule en verre (fig. 39) traversée par des électrodes dont une ou plusieurs anodes et faisons-y le vide. L'aspect de la décharge passe par les phases décrites plus haut (étincelle et lueurs).

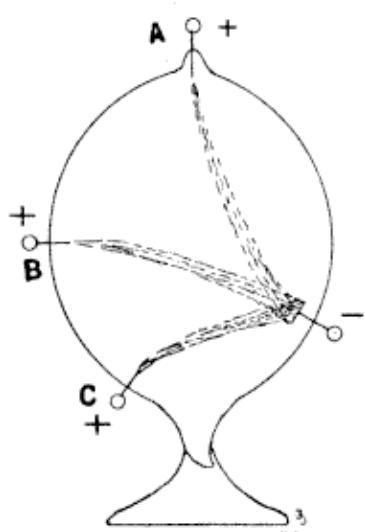


FIG. 39.

Quand le vide atteint quelques millimètres, les lueurs stratifiées paraissent puis, au fur et à mesure que le vide est poussé plus loin, l'espace obscur entre les électrodes s'étend ; la cathode paraît entourée d'une lueur violacée et un filet lumineux tenu déviable à l'aimant part des anodes pour converger vers elle. Enfin, quand la raréfaction est poussée entre un cent millième et un millionième d'atmosphère, toute lueur disparaît dans l'ampoule, mais la paroi opposée à la

cathode devient fluorescente et cela, quelle que soit l'électrode A, B ou C que l'on prend pour anode.

Quand on opère dans l'oxygène, on remarque qu'un faisceau lumineux part de la cathode perpendiculairement à celle-ci et se dirige en ligne droite sur la partie de l'ampoule rendue phosphorescente. C'est le *faisceau cathodique dont la production n'est influencée ni par la nature du gaz, ni par le mode d'excitation*. Dès que la différence de potentiel devient suffisante relativement à la pression du gaz de l'ampoule, le phénomène se produit.

PROPRIÉTÉS DES RAYONS CATHODIQUES. — Les rayons cathodiques *se propagent en ligne droite*. On le démontre en interposant une croix en mica sur leur chemin. Celle-ci porte ombre sur le verre. *Ils excitent la phosphorescence d'un grand nombre de corps* : verre, cristal, diamant, etc., *échauffent les corps* qu'ils rencontrent, au point de provoquer la fusion de lames minces de platine, *sont déviés par un aimant et un champ électrique* et *exercent des actions chimiques*. Leur effet est réducteur : ils réduisent les oxydes des métaux à l'état métallique et cet effet n'a rien d'étonnant puisque, comme l'a montré M. Perrin, les rayons cathodiques sont des particules d'hydrogène chargées d'électricité négative et animées de grandes vitesses rectilignes, environ 40 000 km par seconde, soit un peu plus du dixième de la vitesse de la lumière. Les rayons cathodiques donnent naissance aux rayons Roentgen ou rayons X.

Rayons Roentgen. — Aux points de la paroi de l'ampoule frappés par les rayons cathodiques de nouveaux rayons traversant le verre et se propageant dans l'air ambiant prennent naissance ainsi que l'a démontré M. Roentgen.

Ces rayons se transmettent en ligne droite, ne peuvent être réfléchis ni réfractés, ne sont pas déviables par l'aimant, ionisent l'air c'est-à-dire le rendent conducteur, provoquent des phénomènes de phosphorescence et de fluorescence sur

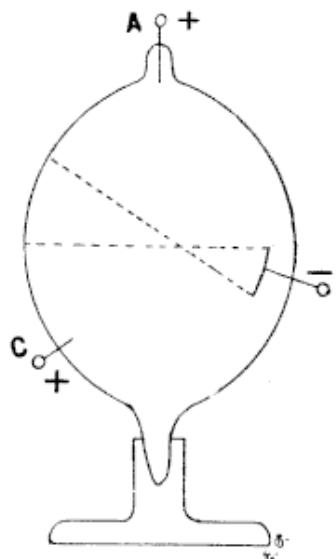


FIG. 40.

certains corps, agissent sur les sels d'argent et traversent les corps opaques d'autant plus facilement que ceux-ci sont moins denses. De sorte qu'en interposant entre une ampoule active et une plaque photographique enfermée dans son chassis ou enveloppée de plusieurs épaisseurs de papier noir un corps hétérogène comme la main, les os arrêtent presque complètement les rayons Roentgen tandis que les chairs mettent fort peu obstacle à leur passage et l'on obtient, en développant la plaque, une photographie appelée radiographie, montrant nettement la forme des os, des chairs, des vêtements, etc.

Le verre se ramollissant et fondant sous l'effet du développement de chaleur dû aux rayons cathodiques, on concentre ceux-ci, dans les ampoules actuelles, sur de petits miroirs en platine légèrement concaves, appelés *focus*, d'environ un centimètre de diamètre et d'où émanent les rayons Roentgen.

§ 4. — Appareils de mesure.

Electroscopé à feuille d'or. — Nous en avons déjà donné la description. Si le socle de l'appareil est conducteur, il forme avec les feuilles d'or d'autre part, les armatures d'un condensateur. La charge des feuilles d'or est proportionnelle à leur différence de potentiel avec la monture de l'appareil, de sorte

que l'écart des feuilles mesure à la fois la charge et la différence de potentiel. Un bon électroscopé commence à donner une déviation sensible pour une cinquantaine de volts.

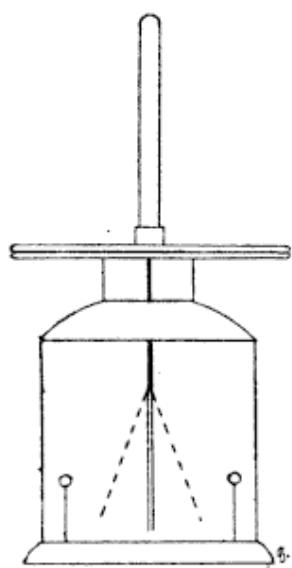


FIG. 41.

Electroscopé condensateur. — S'il s'agit non pas d'un corps électrisé, mais d'une source trop faible pour charger suffisamment l'électroscopé, on adjoint à celui-ci un condensateur (fig. 41) formé de deux plateaux métalliques vernis sur les surfaces en regard, les deux couches de vernis jouant le rôle de diélectriques.

La source est mise en communication

avec un des plateaux, par l'un de ses pôles, l'autre étant à la terre ainsi que le second plateau. On rompt ensuite la communication et on enlève le plateau supérieur à l'aide de son manche isolant. Les feuilles divergent, et d'autant plus que la charge du système est plus grande.

Electromètre à quadrants. — Une boîte cylindrique plate métallique, est découpée au moyen de deux traits de scie, en quatre doubles secteurs A, A', B, B' (fig. 42), parallèles, égaux, rapprochés. Entre les secteurs superposés, se trouve une aiguille légère en aluminium C C', formée de deux arcs concentriques de 90° environ, rattachés au centre par une bande étroite, suspendue au moyen de deux fils de cocon.

La position de repos de l'aiguille, symétrique par rapport à la séparation des quadrants, est celle pour laquelle les deux fils de cocon sont dans le même plan. Pour de faibles déplacements angulaires de l'aiguille, le couple résistant dû à la suspension bifilaire est proportionnel à l'angle d'écart.

Les quadrants opposés par le sommet sont reliés électriquement. Supposons que le potentiel de l'aiguille soit V , celui des quadrants A et A', V_1 et celui des quadrants B, B', V_2 ; $V_1 < V < V_2$.

L'aiguille et les quadrants A, A', forment un condensateur dont la charge est proportionnelle à $V - V_1$. De ce chef, elle est sollicitée à se déplacer vers eux sous l'effet d'un couple horizontal proportionnel au carré des masses en présence, loi de Coulomb, c'est-à-dire à $(V - V_1)^2$. De même un couple horizontal proportionnel à $(V - V_2)^2$ tend à la faire tourner vers les quadrants B, B', le coefficient de proportionnalité étant le même pour de faibles déplacements. L'aiguille se déplacera donc jusqu'au moment où le couple résistant $M\theta$, dû à la torsion du fil, équilibrera le couple moteur

$$k [(V - V_1)^2 - (V - V_2)^2] = k (V_2 - V_1) [2V - (V_1 + V_2)].$$

$$\text{On a donc } \theta = K' (V_2 - V_1) \left[V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right].$$

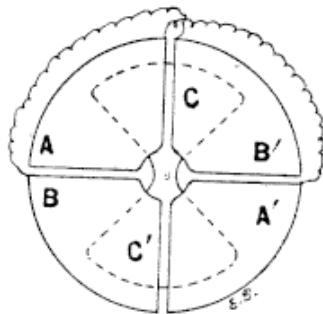


FIG. 42.

AUTRE DÉMONSTRATION. — L'ensemble d'une demi-aiguille et des portions de quadrants en regard forme un condensateur. Désignons par c sa capacité par radian.

Sous l'influence des charges opposées existant sur les armatures de l'appareil, l'aiguille se déplace d'un angle θ . En appelant M le moment de torsion du fil de suspension par unité d'angle autrement dit le coefficient de torsion du fil, le moment, quand l'aiguille a tourné de θ est $M\theta$ et le travail élémentaire pour un déplacement angulaire $d\theta$

$$dT = M\theta d\theta.$$

Le travail total effectué par la torsion du fil de O à θ est

$$T = \int_0^{\theta} dT = \int_0^{\theta} M\theta d\theta = \frac{M\theta^2}{2}.$$

Ce travail est emmagasiné sous forme d'énergie potentielle mécanique dans le fil. Il est égal à l'accroissement d'énergie potentielle électrique du système. Evaluons celui-ci.

Nous savons que l'énergie potentielle d'un condensateur chargé est $\frac{1}{2} QV$, V représentant la différence de potentiel des armatures portant la charge Q . L'aiguille ayant tourné de θ radians vers les quadrants AA' au potentiel V_1 , la capacité du système a augmenté de ce côté de $c\theta$, la charge de $c\theta(V - V_1)$ et l'énergie électrique potentielle de $\frac{1}{2} c\theta(V - V_1)^2$. Par contre, du côté des quadrants BB' au potentiel V_2 , la capacité a diminué de $c\theta$, la charge de $c\theta(V - V_2)$ et l'énergie électrique potentielle de $\frac{1}{2} c\theta(V - V_2)^2$. L'accroissement d'énergie électrique potentielle pour la moitié de l'aiguille est en définitive

$$\frac{1}{2} c\theta [(V - V_1)^2 - (V - V_2)^2]$$

et pour l'aiguille entière

$$c\theta [(V - V_1)^2 - (V - V_2)^2] = 2c\theta (V_2 - V_1) \left[V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right]$$

Egalons à l'accroissement d'énergie mécanique potentielle

$$\frac{M\theta^2}{2} = 2c\theta (V_2 - V_1) \left[V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right]$$

d'où

$$\theta = \frac{4c}{M} (V_2 - V_1) \left[V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right] = K (V_2 - V_1) \left[V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right].$$

DISCUSSION. — La déviation est nulle si $V_2 = V_1$, c'est-à-dire si les quadrants sont au même potentiel. En effet, dans ce cas, chaque paire de quadrants exerce sur l'aiguille une attraction égale et opposée à celle de l'autre paire de quadrants.

Trois cas intéressants sont à étudier :

1^o *Le potentiel de l'aiguille est très grand vis-à-vis de celui des quadrants.* Il vient

$$\theta = K (V_2 - V_1) V$$

la déviation est proportionnelle au potentiel de l'aiguille.

2^o *On égalise le potentiel de l'aiguille et d'une des paires de quadrants B B'* par exemple, en les réunissant métalliquement. $V = V_2$, d'où

$$\theta = K (V - V_1) \left[V - \frac{V_1 + V}{2} \right] = \frac{K}{2} (V - V_1)^2$$

la déviation est proportionnelle au carré de la différence de potentiel entre l'aiguille et l'autre paire de quadrants.

Enfin 3^o *les paires de quadrants sont maintenues à des potentiels égaux et opposés* (par exemple en les raccordant aux deux pôles d'une pile dont le milieu est à la terre) $V_1 = -V_2$

$$\theta = k' V_2 V$$

la déviation est proportionnelle au potentiel des quadrants.

L'aiguille est fixée sur une tige portant à sa partie inférieure deux croisillons plongeant dans de l'acide sulfurique ayant pour objet : 1^o de dessécher l'atmosphère de l'appareil d'ailleurs supporté par des pieds en verre ; 2^o d'amortir les oscillations de l'aiguille et la rendre ainsi plus ou moins *apériodique* ; 3^o de la faire communiquer avec la borne correspondante au moyen d'une électrode.

Electromètre absolu. — Il est basé sur l'action mécanique qui s'exerce, ainsi que nous l'avons vu précédemment, sur un disque chargé à la densité σ d'un *seul côté* et se compose de deux plateaux de balance (fig. 43) dont l'un A porte les poids, tandis que l'autre P subit la traction due à la pression électrostatique. Ce plateau P est relié à son fléau métallique par

des cordelettes métalliques. Un anneau métallique B B dit *de garde*, relié par un conducteur F au support métallique du fléau,

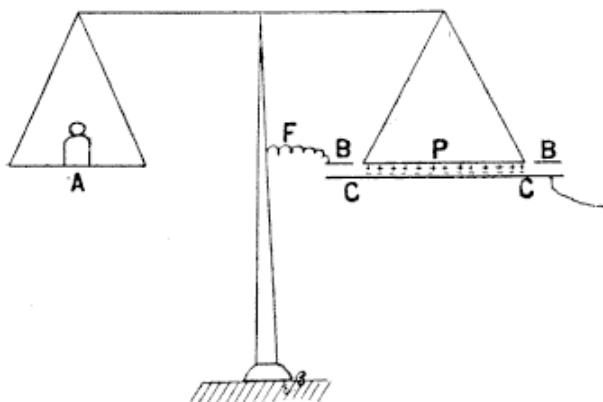


FIG. 43.

l'entoure à la distance d'un mince trait de scie.

Quand aucun poids n'est placé dans le plateau A, le plateau P est exactement de niveau avec l'anneau de garde.

En face de P B B se

trouve un disque plan C. Lorsqu'une différence de potentiel $V_1 - V_2$ est établie entre les deux armatures du condensateur ainsi formé, un champ électrique règne entre elles et, grâce à l'anneau, toutes les lignes de force émanant du disque mobile sont sensiblement parallèles et le champ constant, ainsi que la densité σ sur les deux faces en présence.

Nous avons vu que, dans ces conditions, le disque mobile, de surface S, sera sollicité par une force dirigée vers l'extérieur de la charge, ici vers le bas, avec une intensité de $2 \pi \sigma^2$ par cm^2 . La densité étant constante grâce à l'artifice de l'anneau de garde, la force totale

$$F = 2 \pi \sigma^2 S.$$

En appelant V_1 le potentiel de C, V_2 celui de P B B, et leur distance, nous savons que

$$\sigma = \frac{V_1 - V_2}{4 \pi e}$$

d'où $F = \frac{S}{8 \pi} \left(\frac{V_1 - V_2}{e} \right)^2$ dynes.

L'équilibre étant obtenu par un poids p grammes placé en A on aura

$$981p = \frac{S}{8 \pi} \left(\frac{V_1 - V_2}{e} \right)^2$$

d'où $V_1 - V_2 = e \sqrt{\frac{981p}{S} \frac{8\pi}{}}$

Lecture des déviations. — Comme la description de l'électromètre à quadrants nous l'a montré, on est amené à devoir lire avec précision l'angle dont un équipage mobile a tourné.

Méthode directe. — Une aiguille longue, mince et légère (généralement en aluminium) attachée à l'équipage mobile, se déplace au-dessus d'une graduation. Les dimensions de l'aiguille restant nécessairement exiguës, l'exactitude est faible. On l'augmente en plaçant sous l'aiguille une glace qui la réfléchit. En faisant coïncider dans le miroir l'aiguille et son image, sa position sera toujours repérée de la même manière par rapport à la graduation et l'on évitera ainsi toute erreur de parallaxe. On emploie surtout l'aiguille dans les appareils portatifs. Quand l'installation est faite à poste fixe, on obtient une sensibilité beaucoup plus grande au moyen des méthodes ci-après.

Méthode indirecte. — 1^o MÉTHODE SUBJECTIVE. On fixe à l'axe de suspension de l'aiguille un petit miroir plan. Perpendiculairement au miroir et à une distance variant de 1 à 3 mètres, on place une lunette O, (fig. 44), pourvue d'un réticule et qui permet de voir le zéro d'une graduation portée par une règle AB placée au-dessus ou au-dessous d'elle.

Quand le miroir tourne d'un angle α , on lit dans la lunette une longueur l de la graduation reliée à l'angle α par l'équation $l = d \operatorname{tg} 2\alpha$, puisque l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion, d étant la distance de l'échelle au miroir. On en déduit :

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{l}{d} = \frac{1}{2} \left(\frac{l}{d} - \frac{1}{3} \frac{l^3}{d^3} + \frac{1}{5} \frac{l^5}{d^5} \dots \right).$$

Quand les angles sont inférieurs à 3°, on peut supprimer tous les termes à partir du 3^e et il reste

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{l}{d} - \frac{1}{6} \frac{l^3}{d^3}.$$

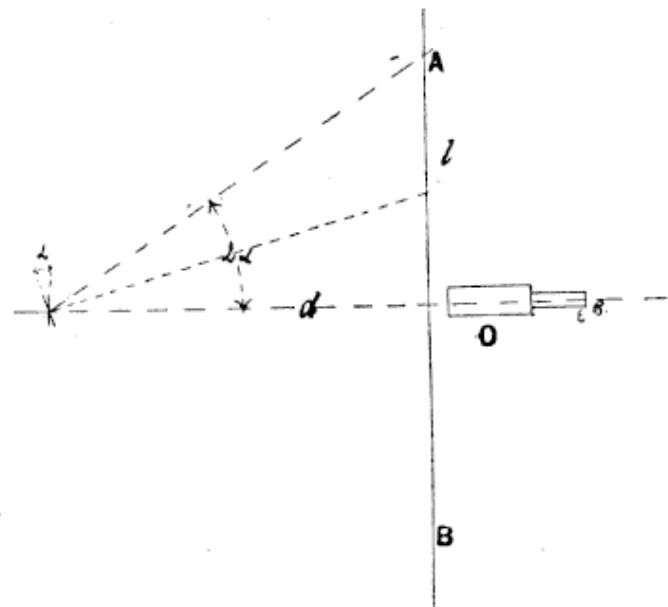


FIG. 44.

D'autre part si l'on courbe la graduation suivant une circonférence de rayon d , on a simplement

$$x = \frac{1}{2} \frac{l}{d}.$$

2^o MÉTHODE OBJECTIVE. La lunette est remplacée par une lampe et le miroir plan par un miroir courbe. La lampe est obturée, sauf du côté du miroir où se trouve une fenêtre partagée en deux parties égales par un réticule vertical. Le miroir réfléchit le pinceau lumineux qui le frappe sur l'échelle et y reproduit l'image du diaphragme découpé par un mince trait noir vertical. L'échelle étant transparente (celluloïde, verre dépoli, toile calque) on peut lire avec exactitude la division marquée par l'ombre linéaire du réticule. On règle la distance de la lampe de manière à obtenir le maximum de netteté de l'image du diaphragme.

Si l'on ne dispose que d'un miroir plan, on intercale une lentille convergente sur le trajet du faisceau incident.

§ 5. — Machines électrostatiques.

Les machines électrostatiques permettent une production continue d'électricité. Elles se subdivisent en deux catégories principales : les *machines à frottement* et les *machines à influence*.

Principes généraux. — Leur fonctionnement est basé sur les principes suivants : 1^o *L'électricité se porte exclusivement sur la surface des conducteurs.* Dès lors si, ayant un corps métallique creux quelconque, un cylindre par exemple, on y introduit un corps électrisé que l'on porte au contact avec lui, toute la charge du second passe à la surface du premier. On retire le corps électrisé à l'état neutre et l'opération peut être recommencée indéfiniment ; 2^o *l'électricité se perd par les pointes.* Si un corps isolant électrisé vient en face des pointes d'un conducteur métallique, l'électricité de nom opposé de ce dernier, attirée par influence, se porte sur les pointes, d'où elle passe sur le corps électrisé, neutralisant celui-ci. Le conducteur

pourvu de pointes reste chargé d'électricité de même nom que celle du corps électrisé. L'opération se continue, si le corps électrisé se déplace continuellement devant les pointes.

La charge communiquée augmente suivant *les termes d'une progression arithmétique*, si le corps électrisé (producteur) mis en communication avec le corps que l'on charge (collecteur) lui apporte à chaque contact la même quantité d'électricité.

Dans les machines à influence, l'accroissement se fait en général suivant *les termes d'une progression géométrique*. Supposons deux cylindres identiques C_1, C_2 , chargés le premier d'une charge négative $-Q$, le second d'une charge positive $+Q$. Amenons en présence deux sphères plus petites S_1, S_2 , que nous mettons un instant en communication avec le sol. La première sera chargée d'une quantité $+kQ$, la seconde de $-kQ$. Si maintenant nous introduisons S_1 dans C_2 , l'amenons au contact et procédons de même avec S_2 et C_1 , C_1 prend la charge $-Q - kQ = -Q(1 + k)$ et C_2 la charge $+Q(1 + k)$. Recommençons l'opération, les sphères se chargeront de $kQ(1 + k)$ et la charge des cylindres deviendra $-Q(1 + k) - kQ(1 + k) = -Q(1 + k)^2, +Q(1 + k)^2$ et ainsi de suite.

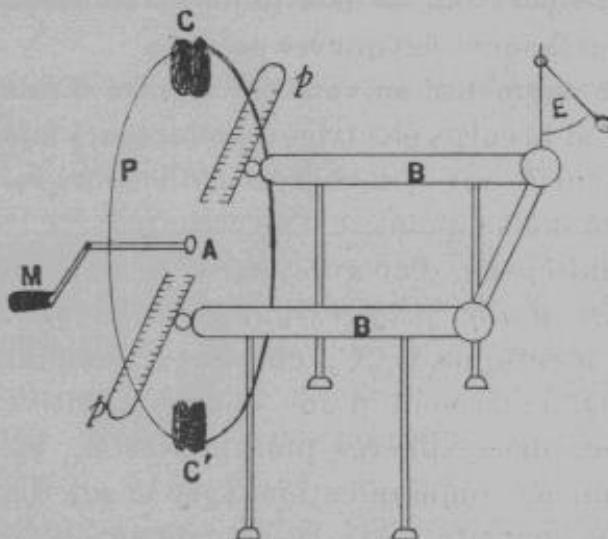
CHARGE ET POTENTIEL MAXIMA.—Théoriquement, aucune limite de charge et par suite de potentiel n'existe pour le collecteur. Pratiquement on est limité par les décharges disruptives se produisant, soit sous forme d'étincelle entre le collecteur et les conducteurs voisins, soit sous forme d'aigrette dans l'air. La limite dépendra notamment du profil des collecteurs, pour lesquels il faut éviter les angles saillants, et de l'état de siccité de l'air. Par temps humide la limite est beaucoup plus rapidement atteinte. Elle est obtenue quand les quantités d'électricité développées sont à chaque instant égales à celles qui se perdent par les supports.

L'énergie acquise par le système trouve sa contre-partie dans le travail qu'il faut vaincre pour écarter l'une de l'autre les charges de noms contraires et rapprocher les charges de mêmes noms transportées.

Machines à frottement. — **MACHINE DE RAMSDEN.** — Elle est constituée par un plateau en verre P , (fig. 45), mobile autour d'un axe horizontal A , mû à l'aide d'une manivelle M . Deux paires

de coussins ou frottoirs C et C' généralement en cuir rembourré, enduits d'une substance pulvérulente, telle que de l'or mussif (bisulfure d'étain) ou un amalgame d'étain et de zinc, rendue adhérente au moyen d'un peu de suif, serrent le plateau P de part et d'autre de son diamètre vertical. En face du diamètre horizontal du plateau et à faible distance, se trouvent des peignes métalliques p, p, raccordés d'autre part aux conducteurs B B, réunis entre eux et pourvus d'un petit électromètre à balle de sureau et fil rigide se déplaçant devant un quadrant gradué (électromètre de Henley).

Fig. 45.



Dès que l'on fait tourner le plateau, le verre s'électrise positivement, les coussins négativement. Le verre électrisé passe devant les peignes, ceux-ci laissent fuser de l'électricité négative et les conducteurs B B se chargent positivement. Par son passage devant les peignes, le verre est redevenu à l'état neutre. Il s'électrise de nouveau sous les coussins suivants et ainsi de suite.

Si les coussins sont réunis à la terre, l'électrisation des conducteurs est positive et leur différence de potentiel avec le sol possède la valeur + V. Si les peignes sont à la terre, les coussins sont portés au potentiel — V.

Enfin si coussins et peignes sont isolés, la différence de potentiel régnant entre eux est V. Un observateur en communication avec le sol tirera alors des étincelles des uns et des autres. Ces étincelles deviendront beaucoup plus longues si, isolé, il se met en communication soit avec les coussins, soit avec le conducteur.

Machines à influence. REPLENISHER. — C'est une machine de très petite taille, 2 à 3 cm de diamètre, qui a été naguère très utilisée comme allumoir à gaz.

Les collecteurs sont constitués par des segments cylindriques métalliques A et B, (fig. 46), pourvus vers l'intérieur de petits ressorts r_1 r_2 que peuvent venir toucher, dans leur rotation, deux pièces métalliques C, D, isolées l'une de l'autre. Supposons A chargé positivement et B négativement. Au moment où les transmetteurs C et D vont passer entre les demi-cylindres, ils touchent simultanément deux autres ressorts r_3 , r_4 métalliquement réunis entre eux et prennent, sous l'influence des collecteurs, des charges respectivement négative et positive, qu'ils cèdent ensuite par contact avec r_2 et r_1 , aux collecteurs B et A et ainsi de suite. Si l'on tournait en sens inverse, les charges diminueraient au lieu d'augmenter. La machine s'amorce d'elle-même.

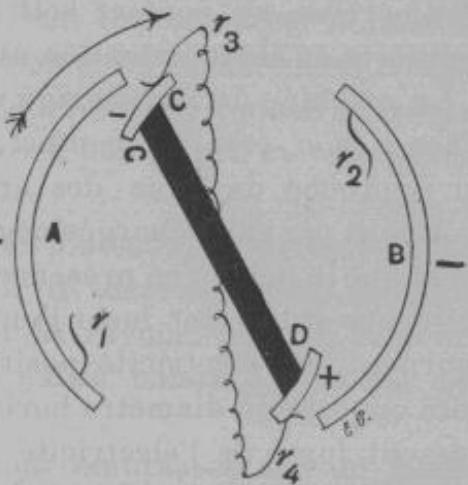


FIG. 46.

MACHINE DE HOLTZ. — Deux plateaux en verre sont placés parallèlement à faible distance l'un de l'autre. L'un P_1 , (fig. 47), fixe, percé diamétralement de deux fenêtres F , F' , l'autre mobile P_2 . D'un côté de chacune des fenêtres se trouve une armature en papier projetant une languette pointue au milieu de l'espace libre.

En face des armatures en papier, de l'autre côté du plateau tournant, se trouvent des peignes. L'un des peignes se rattache à un conducteur $c'c_1$; le second peigne à un conducteur mobile cc_1 , que

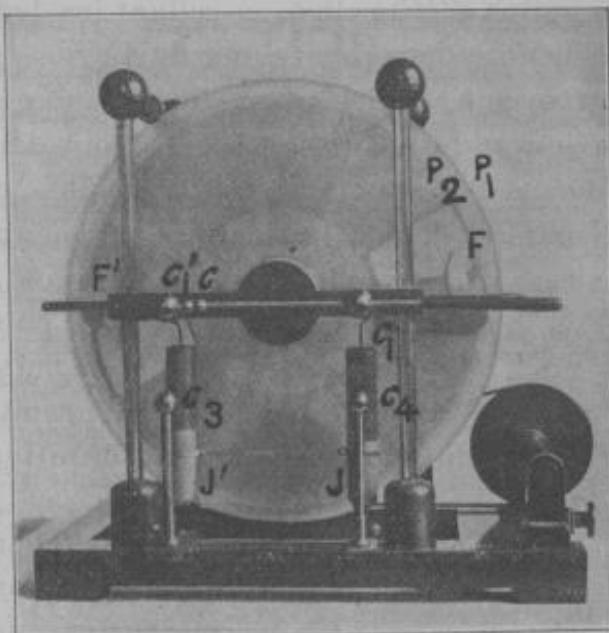


FIG. 47.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'on peut amener au contact de c'_1 . Enfin des boules c_5 et c_4 , montées sur des tubes coulissant dans leurs supports, peuvent être portées au contact soit de c'_1 soit de c_1 pour mettre ces dernières en communication avec la terre.

La machine de Holtz exige un amorçage préalable. Les deux pôles c et c'_1 étant en contact, on fait tourner le plateau, puis on approche de l'une des armatures, une plaque d'ébonite frottée et par suite chargée négativement. L'armature en papier, ainsi que le peigne en présence, sont électrisés positivement par influence et laissent fusionner l'un et l'autre, sur la plaque de verre tournant, de l'électricité positive. L'inverse se passe à l'extrême opposée du diamètre horizontal, où le peigne et l'armature laissent fusionner de l'électricité négative neutralisant la positive déposée par les précédents, de sorte que le phénomène perdure tant que la rotation s'effectue.

Quand l'amorçage est obtenu, ce qui se caractérise par le bruissement que fait entendre la machine et la nappe lumineuse que laisse échapper le peigne dont on a approché la plaque d'ébonite (pôle positif) tandis que l'autre (pôle négatif) présente de petites étoiles à toutes ses pointes, on peut retirer la tige cc'_1 , mettant les deux pôles en contact et l'étincelle jaillit entre les boules cc'_1 . On renforce le flux d'étincelles, en reliant les deux pôles aux armatures internes de deux bouteilles de Leyde jj' , dont les armatures externes sont réunies entre elles.

Lorsque la distance séparant les boules possède une valeur trop grande pour permettre l'éclatement de l'étincelle, on constate souvent un curieux phénomène, particulièrement quand la capacité des bouteilles est grande : celles-ci se déchargent, la machine ne fonctionne plus, puis reprend tout à coup, les polarités étant inversées et ainsi de suite.

Enfin, si la distance est trop grande, la machine se désamorce définitivement.

On s'est ingénier à parer à ces inconvénients. La meilleure solution consiste à augmenter les dimensions des secteurs en papier, de manière à leur faire occuper à chacun à peu près un quadrant, (fig. 48), et à ajouter un

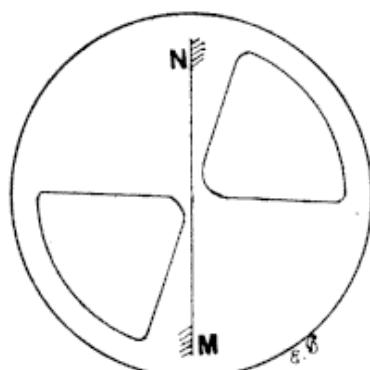


FIG. 48.

conducteur diamétral MN pourvu de pointes à ses extrémités, que l'on place suivant un diamètre quelconque. Tant que le fonctionnement se fait normalement, le conducteur diamétral ne joue aucun rôle ; il entre en action et fait exactement l'office des conducteurs à peigne mis en court-circuit comme au début, dès que ceux-ci cessent de fonctionner par suite d'un trop grand écartement des boules.

MACHINE DE WIMSHURST. — Deux plateaux en verre, (fig. 49), tournant en sens inverse, sont pourvus extérieurement de petits secteurs en étain disposés suivant les rayons. Sur ces secteurs frottent de part et d'autre de petits balais portés par des conducteurs diamétraux.

Les deux plateaux en verre sont embrassés sur un même diamètre horizontal, par deux mâchoires M_1 , M_2 pourvues de pointes, raccordées d'un côté à deux conducteurs CC_1 , terminés en boules entre lesquelles éclatent les étincelles, que l'on peut manœuvrer au moyen de longs manches isolants et, d'autre part, à deux bouteilles de Leyde B_1 , B_2 , montées en cascade.

Par le frottement des balais, les secteurs s'électrisent en sens inverse de part et d'autre d'un même diamètre sur chaque côté des plateaux, puis le fonctionnement est semblable à celui de l'appareil précédent.

Si l'on substitue aux plateaux en verre d'autres en ébonite on peut, avec avantage, supprimer les secteurs en étain.

Réversibilité des machines statiques. — En enlevant les courroies d'une des machines précédentes et mettant ses pôles en communication avec une batterie chargée ou avec ceux d'une autre machine en fonctionnement, on constate que ses plateaux

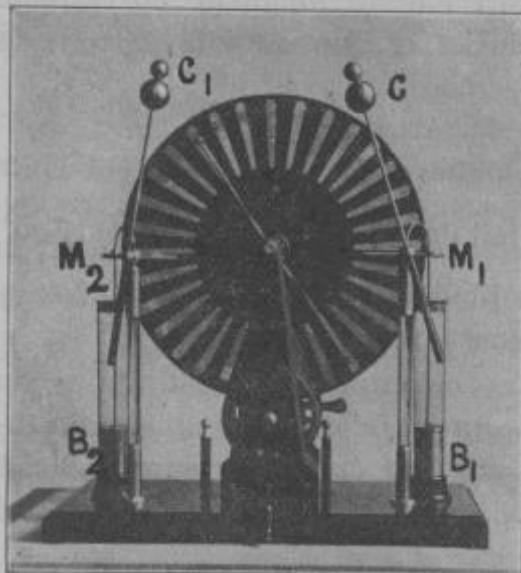


FIG. 49.

se mettent à tourner en sens inverse du sens normal. Ceci se comprend aisément : les attractions que l'on devait vaincre dans le fonctionnement direct agissent ici effectivement pour produire le mouvement qui, dès lors, est nécessairement de sens contraire au premier.

Conditions de fonctionnement. — L'expérience montre que dans les machines à frottement le débit est indépendant de la pression des coussins sur le verre du moment que leur contact est bien assuré. Il est *proportionnel à la surface du verre qui passe sous les frottoirs*, donc à *la longueur de ceux-ci et à la vitesse de rotation*.

Dans les machines à influence, on constate que le débit est *proportionnel à la vitesse de rotation, indépendant de la valeur des capacités adjointes et de la valeur absolue du potentiel des pôles*. Il diminue quand la différence de potentiel augmente.

Supposons une machine donnant par seconde 10 étincelles de 0,1 cm de longueur correspondant à une différence de potentiel de 4500 volts, la capacité de la batterie étant 90 000 cm ou $\frac{90\ 000}{3^2 \cdot 10^5} = 0,1$ microfarad.

La charge de la batterie est $Q = CV = 45 \cdot 10^5$ coulomb. Le travail dépensé à chaque décharge $T = \frac{1}{2} QV = 22,5 \cdot 10^5 \cdot 4500 = 1,01$ joule et puisqu'il y a 10 décharges par seconde, la puissance ressort à 10,1 watts.

Les machines électrostatiques sont des machines de *faible puissance, faible débit et grande différence de potentiel*. Elles ont été peu étudiées, leur rendement est mauvais. Avec les machines de Wimshurst on atteint facilement 100 000 volts.

CHAPITRE III

§ I. — Des forces électromotrices de contact.

Effet Volta. — *Lorsque deux métaux ou plus généralement deux corps hétérogènes quelconques sont mis en contact, on constate qu'il existe entre eux une différence de potentiel indépendante de leurs dimensions, de leur forme, de l'étendue des surfaces en contact et de la valeur absolue du potentiel de chacun d'eux. Elle ne dépend que de la nature des corps et de leur température.*

C'est surtout au contact des corps solides que se manifeste cette différence de potentiel. Si l'on met en contact deux plateaux en zinc et en cuivre par exemple, tenus par des manches isolants, puis qu'on les sépare, le zinc est chargé positivement, le cuivre négativement, tout comme si l'on avait établi entre eux une différence de potentiel.

Que l'on communique aux plateaux en présence une charge quelconque, celle-ci s'ajoute simplement aux charges existantes; la valeur du potentiel du système change, mais on trouve encore entre les deux plateaux, *la même différence de potentiel* qu'avant.

Quand les deux plateaux étaient en contact, les charges opposées se trouvaient nécessairement en regard l'une de l'autre, formant ce que l'on appelle *la double couche de contact* et la cause qui détermine et maintient la différence de potentiel porte le nom de *force électromotrice de contact*.

L'expérience se fait aisément au moyen de l'électroscopie condensateur. Supposons que le plateau fixe de celui-ci soit en zinc, le plateau mobile en cuivre. On met un instant les deux plateaux en communication par un conducteur métallique et en même temps on fait communiquer par un fil de cuivre le plateau supérieur avec la cage métallique, également en cuivre, de l'appareil. La communication étant rompue, on enlève le plateau supérieur et les feuilles d'or divergent, chargées positivement.

Force électromotrice dans un circuit fermé à même température. Loi des contacts successifs. — Soit $+E$ la différence de potentiel que présentent deux métaux A et B en allant de A à B. Considérons deux tiges de ces métaux jointes à une extrémité. Si au lieu de les rapprocher par cette extrémité, nous réunissons leurs bouts opposés, nous trouvons la même force électromotrice en allant encore de A vers B.

Si maintenant nous réunissons les tiges à leurs deux extrémités et parcourons le circuit ainsi formé, nous rencontrons d'abord une force électromotrice $+E$ au premier point de contact, puis $-E$ au deuxième point de contact, puisque nous marchons en sens inverse de tantôt. Nous aurons donc comme force électromotrice résultante du circuit $+E - E = 0$.

En désignant par A/B la force électromotrice rencontrée en marchant de A vers B et par B/A celle orientée de B vers A, nous pourrons encore écrire : $A/B + B/A = 0$ (1) ce qui signifie que la force électromotrice rencontrée au point de jonction en allant de A vers B est exactement compensée par celle que l'on rencontre au point de jonction suivant en marchant alors de B vers A.

L'équation (1) peut s'écrire :

$$A/B = - B/A.$$

La divergence des feuilles de l'électroscopie condensateur reste la même, que la communication ait été établie entre les plateaux au moyen d'un fil de cuivre, de zinc, ou d'un circuit métallique hétérogène comprenant divers métaux. De là la loi énoncée par Volta : *Dans une chaîne quelconque de métaux A, B, C, ... N soudés à la suite les uns des autres et tous à la même température, la différence de potentiel des extrémités est la même que si les deux métaux extrêmes étaient directement en contact.* On a donc

$$A/B + B/C + C/D + \dots + M/N = A/N.$$

Mais comme

$$A/N = - N/A$$

$$A/B + B/C + C/D + \dots + M/N + N/A = 0$$

d'où cette seconde loi de Volta : *Tous les points d'une chaîne étant à la même température, si les deux métaux qui la*

terminent sont identiques, les deux extrémités se trouvent au même potentiel.

Chaînes à liquides. — La loi précédente n'est plus vérifiée quand, au lieu d'être formée uniquement de métaux, la chaîne comprend des parties liquides telles que des solutions acides, salines ou basiques.

Prenons un vase en verre, (fig. 50), contenant de l'eau acidulée d'acide sulfurique. Plongeons dans le liquide deux lames métalliques (électrodes) l'une en cuivre, l'autre en zinc, pourvues chacune d'un fil de jonction de même nature pour les deux que nous désignerons par F. Appelons L le liquide acidulé. Si tout était métallique on aurait :

$$F/Zn + Zn/L + L/Cu + Cu/F = 0.$$

Mais ici il n'en est plus de même et l'on constate, entre les deux extrémités de la chaîne, au moyen de l'électromètre condensateur par exemple, l'existence d'une différence de potentiel

$$E = F/Zn + Zn/L + L/Cu + Cu/F.$$

Puisque d'après la loi de Volta

$$F/Zn + Zn/Cu + Cu/F = 0$$

$$\text{ou } F/Zn + Cu/F = -Zn/Cu = Cu/Zn,$$

$$\text{on a : } E = Zn/L + L/Cu + Cu/Zn.$$

La force électromotrice du système est donc indépendante de la nature du métal F des fils d'attache et si, comme le supposait Volta, la force électromotrice de contact avec le liquide est négligeable, on peut supprimer les termes Zn/L et L/Cu et il reste $E = Cu/Zn$, force électromotrice du contact cuivre-zinc.

Couple ou élément Volta. — On a constitué ainsi un couple ou élément Volta, qui va nous permettre d'étudier les lois du courant électrique.

L'électrode en cuivre est à un potentiel plus élevé que celle en zinc. La première constitue le *pôle positif* de l'élément,

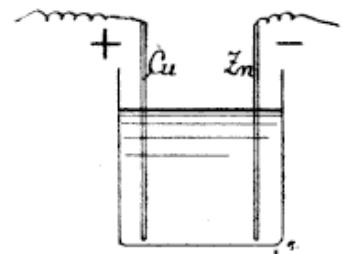


FIG. 50.

l'autre le *pôle négatif*. La différence de potentiel, de 0,85 V environ, est indépendante de la forme et des dimensions des lames et de leur écartement. Elle ne dépend que de la nature des corps en présence. Quand on remplace la lame de cuivre par une autre en platine, charbon, etc., la valeur de la différence de potentiel change et l'on peut constater que c'est la surface seule qui intervient. Il n'y a aucune variation dans la différence de potentiel obtenue, quand on substitue par exemple à une lame massive en platine, une autre simplement platinée.

Si maintenant nous réunissons les deux pôles par un conducteur plus ou moins résistant, celui-ci va être parcouru par un courant continu d'électricité. Le couple est donc une véritable source d'électricité qui sera caractérisée d'une part, par la différence de potentiel qu'elle développe à *circuit ouvert*, d'autre part, par la résistance comprise intérieurement entre ses électrodes, *résistance intérieure*.

§ 2. — Lois du courant électrique.

Force électromotrice. — La différence de potentiel générée par le couple voltaïque, de même d'ailleurs que celle de n'importe quelle source d'électricité, porte plus spécialement le nom de *force électromotrice* de la source.

Les machines statiques étudiées précédemment sont des sources discontinues d'électricité, procédant par décharges plus ou moins rapides. Les piles, au contraire, sont des sources continues, capables de produire dans le fil conducteur reliant leurs pôles, un flux constant d'électricité ou *courant électrique*.

Intensité. — On appelle *intensité d'un courant, la quantité d'électricité qui traverse par seconde une section quelconque du circuit*.

D'après cela, I étant l'intensité et dQ la quantité qui a passé pendant le temps dt :

$$I = \frac{dQ}{dt} .$$

On en tire

$$Q = \int_0^t I dt.$$

Si le courant est constant $Q = It$.

I sera l'unité quand Q et t seront eux-mêmes égaux à l'unité. L'unité pratique d'intensité s'appelle *l'ampère international*. Elle est obtenue quand l'unité pratique de quantité ou le coulomb passe par seconde dans le circuit. Elle est égale, comme nous le verrons plus loin, au dixième de l'unité C. G. S. électromagnétique.

Dans l'industrie on emploie souvent une unité dérivée, l'*ampère-heure*, qui correspond à la quantité transportée par un courant d'un ampère pendant une heure. L'ampère-heure vaut donc 3 600 coulombs.

Loi d'Ohm. — Relions les deux pôles d'une source d'électricité par un fil conducteur AB plus ou moins mince, puis, nous servant d'un voltmètre à quadrants dont l'aiguille est maintenue à un potentiel fixe, mettons les paires de quadrants opposées en relation, l'une avec un point A fixe du conducteur, l'autre avec un point variable X. Nous constaterons que la chute varie avec la position du point X. Elle est d'autant plus grande que X est plus éloigné de A, c'est-à-dire que la résistance comprise entre les points dont on prend la différence de potentiel est plus grande.

En appelant V_A le potentiel en A, V_B en B et R la résistance de AB, on vérifie expérimentalement que $V_A - V_B = IR$, d'où

$$I = \frac{V_A - V_B}{R},$$

l'intensité est égale au rapport de la différence de potentiel à la résistance du circuit.

$V_A - V_B$ étant évaluée en unités pratiques en volts, R en unités pratiques en ohms, I est mesurée en unités pratiques d'intensité, en ampères.

On conclut de l'équation précédente que *la chute de potentiel entre deux points d'un circuit ne comprenant aucun générateur ni récepteur, est égale au produit de l'intensité du courant par la résistance qui les sépare*.

Si par exemple un courant de 2A traverse un conducteur de forme quelconque dont la résistance est de 7,8 ohms, un voltmètre inséré entre ses extrémités indiquera la différence de potentiel $7,8 \times 2 = 15,6$ volts.

Réiproquement, si l'on applique 15,6 volts à ses extrémités, il sera parcouru par un courant de 2A.

Enfin, si l'on nous dit qu'un courant de 2A passe dans le conducteur quand la différence de potentiel entre ses extrémités est de 15,6 volts, nous tirons immédiatement de l'expression ci-dessus que la résistance de ce conducteur doit être

$$R = \frac{V_A - V_B}{I} = \frac{15,6}{2} = 7,8 \text{ ohms.}$$

REMARQUE I. Le passage d'un courant I à travers une résistance R donne donc lieu à une chute de voltage RI dans le sens de la marche du courant. En d'autres termes, on ne peut faire traverser une résistance R par un courant I , que moyennant une perte de voltage dont on dispose égale à RI . En d'autres termes encore, dans un conducteur traversé par un courant, le potentiel au point de sortie du courant est égal au potentiel au point d'entrée, diminué de la chute RI .

REMARQUE II. — Le flux d'électricité se fait dans le sens des potentiels décroissants. Le courant rentre dans le couple par le pôle négatif, pour atteindre le pôle positif par où il sort, entretenu par la force électromotrice développée au sein du couple.

Représentation graphique. — L'équation $I = \frac{V_A - V_B}{R}$ est linéaire en R et V . Portons les résistances suivant l'axe des abscisses $OA = R$ (fig. 51). Aux extrémités élevons des perpendiculaires OB, AC , respectivement égales à V_A et V_B . La droite BC représente la valeur du potentiel en fonction de la résistance. Menons CD parallèle à OA .

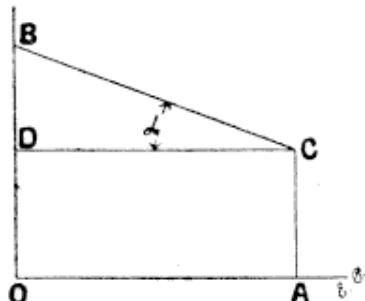


FIG. 51.

$$BD = DC \operatorname{tg} \alpha$$

ou
$$\frac{V_A - V_B}{R} = \operatorname{tg} \alpha = I.$$

L'intensité du courant est mesurée par la tangente de l'inclinaison de BC sur OA. Si le courant est de sens contraire, la tangente devient négative, la droite des potentiels s'incline en sens inverse.

Loi d'Ohm dans le cas des grandes résistances. Décharge d'un condensateur chargé. — Lorsqu'un condensateur dont les armatures sont réunies par un isolant imparfait, comme le caoutchouc ou la gutta-percha, a été chargé, on constate qu'il perd peu à peu son électrisation. La loi d'Ohm va nous permettre de nous rendre compte de ce qui se passe. Appelons R la résistance comprise entre les armatures chargées de la quantité Q sous la différence initiale de potentiel V_i . Leur différence de potentiel étant V à un moment donné, le courant traversant la résistance R a pour valeur

$$I = \frac{V}{R}.$$

Pendant le temps dt , la charge des armatures augmente de la quantité

$$-dQ = Idt,$$

d'où $dt = -\frac{dQ}{I}$.

Mais puisque $Q = CV$, $dQ = CdV$.

D'autre part $I = \frac{V}{R}$,

d'où $dt = -CR \frac{dV}{V}$.

Le temps pendant lequel la différence de potentiel V passe de la valeur V_i à V , sera donné par l'expression

$$\int_0^t dt = -CR \int_{V_i}^V \frac{dV}{V},$$

où $t = CR \log_e \frac{V}{V_i}$.

Cas d'un circuit quelconque. — Soit une partie de circuit constituée par des conducteurs quelconques, solides ou liquides, mais différents AB , BC , CD, \dots (fig. 52).

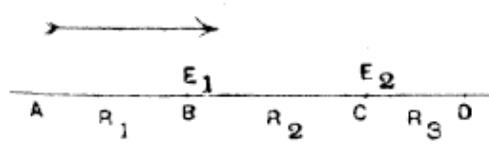


FIG. 52.

du courant indiqué par la flèche et négativement dans le cas contraire. Soient R_1 , R_2 , R_3 , les résistances des conducteurs ; V_A et

Appelons E_1 , E_2 , les forces électromotrices de contact que nous prendrons positivement si elles sont dirigées dans le sens

V_D les potentiels au points A et D. On peut calculer le potentiel au point D en fonction du potentiel au point A.

$$V_D = V_A - R_1 I + E_1 - R_2 I - E_2 - R_3 I$$

d'où $\Sigma R \times I = V_A - V_D + \Sigma E$

et $I = \frac{V_A - V_D + \Sigma E}{\Sigma R}$. (1)

Telle est l'expression générale de la loi d'Ohm qui peut se formuler ainsi: *Etant donnée une partie quelconque d'un circuit où se trouvent des forces électromotrices ou contre-électromotrices, l'intensité du courant est égale à la différence de potentiel existant entre les extrémités de la portion considérée, augmentée de la somme algébrique des forces électromotrices y existant, divisée par sa résistance totale.*

En particulier s'il n'existe aucune force électromotrice dans le circuit, $\Sigma E = 0$ et l'on a simplement $V_A - V_D = I \Sigma R$, ce qui est bien la loi d'Ohm dans le cas examiné en premier lieu.

Force électromotrice appliquée. — De l'équation (1) nous tirons

$$V_A - V_D = I \Sigma R - \Sigma E$$

équation montrant que, pour faire traverser un circuit de résistance ΣR et présentant des forces électromotrices diversement dirigées, il faut appliquer à ses extrémités non seulement la force électromotrice $I \Sigma R$ requise pour faire passer à travers la résistance ΣR le courant I , mais encore une force électromotrice qui soit la somme algébrique des forces électromotrices existant dans le circuit et *prises en sens inverse*.

On conçoit aisément qu'il doive en être ainsi : les forces électromotrices dirigées dans le sens du courant, ajoutant leur action à la force électromotrice appliquée, celle-ci pourra être réduite de leur valeur; au contraire les forces électromotrices opposées dites aussi *forces contre-électromotrices* devront être annulées, équilibrées par des forces électromotrices égales et opposées dont la force électromotrice $I \Sigma R$ devra nécessairement être majorée.

Représentation graphique. — Appelons e la différence de potentiel entre les extrémités du circuit. L'équation (1) devient

$$e = I \Sigma R - \Sigma E \quad \text{ou} \quad I \Sigma R = e + \Sigma E \quad (2)$$

I étant constant, ΣE aussi, les seules variables quand on chemine le long du circuit sont e et R . (2) représente l'équation de droites faciles à construire.

Si ce sont les potentiels eux-mêmes quel'on veut représenter graphiquement, il suffira,

sans toucher au diagramme de la figure, d'abaisser l'axe des X d'une quantité V_D .

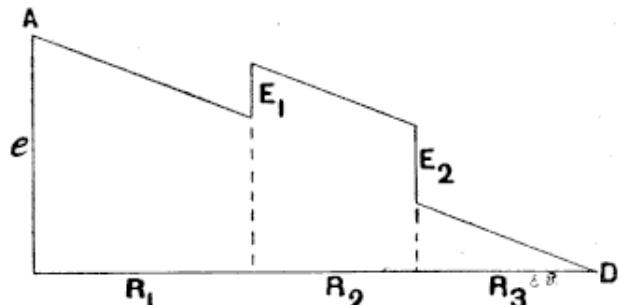


FIG. 53.

Puissance du courant. — Nous avons vu, lors de l'étude de potentiel, que le travail accompli entre deux points par les forces du champ sur l'unité de masse positive, est mesuré par la différence des potentiels $V_1 - V_2$ existant en ces points. Pour une masse $+Q$ coulombs, les potentiels étant exprimés en volts, le travail est donné par l'expression $(V_1 - V_2)Q$ joules et, s'il s'agit d'un courant qui transporte la quantité I ampères par seconde, le travail effectué pendant ce temps, c'est-à-dire la puissance du courant sera $P = (V_1 - V_2)I$ ou EI watts, E représentant la force électromotrice, s'il s'agit d'une source d'électricité.

Comme on le voit, le watt, dont nous avons vu la définition dans les généralités du début, est la puissance qui correspond au courant d'un ampère passant sous la différence de potentiel d'un volt.

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ volt} \times 1 \text{ ampère} = 1 \text{ volt-ampère}.$$

Rappelons que le watt vaut 10^7 ergs par seconde $= \frac{I}{9,81} \text{ kgm}$ par seconde $= \frac{I}{736}$ cheval.

Effet Joule. — Considérons un conducteur homogène de résistance R parcouru par un courant I . La loi d'Ohm donne

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} \text{ d'où } IR = V_1 - V_2 \text{ et } I^2R = (V_1 - V_2)I.$$

Le second membre représente la puissance dépensée dans le conducteur entre les deux points aux potentiels V_1 et V_2 . Cette puissance, comme Joule l'a vérifié expérimentalement, se dé-

pense exclusivement en chaleur, de sorte que l'on peut énoncer cette loi : *La puissance développée entre deux points d'un circuit sous forme de chaleur, est égale au produit de la résistance comprise entre les deux points par le carré de l'intensité du courant.*

On peut encore écrire, en remplaçant I par sa valeur :

$$(V_1 - V_2) I = \frac{(V_1 - V_2)^2}{R}$$

et dire : *La puissance qui apparaît entre deux points d'un circuit sous forme de chaleur, est égale au quotient du carré de la différence de potentiel entre ces deux points par la résistance du circuit entre les mêmes limites.*

L'expression de cette chaleur en calories (gramme-degré) est $RI^2 \times 0,24$ calories, puisque nous avons trouvé que

$$1 \text{ joule} = 0,24 \text{ petite calorie.}$$

Si par exemple il passe 6A dans un conducteur de 20 de résistance, la chaleur dégagée par seconde dans le conducteur est $2 \times 36 \times 0,24 = 17,5$ petites calories.

On remarque que l'effet Joule reste le même, à intensité égale, quelle que soit la direction du courant.

Court-circuit. — Il résulte de la loi d'Ohm que, si deux points offrant une différence de potentiel entretenue par un générateur sont mis en connexion par un conducteur de résistance pratiquement nulle, l'intensité du courant traversant ce conducteur tendra vers l'infini. On dit alors que les deux points sont mis en court-circuit. L'échauffement du conducteur donné par la loi de Joule $\frac{U^2}{R}$ croîtra indéfiniment au point d'amener sa fusion

ou sa volatilisation. Les courts-circuits de ce genre offrent donc un danger sérieux et sont particulièrement à redouter dans les installations électriques. Nous étudierons les moyens d'éviter leurs effets nocifs.

Effet Peltier. — Reprenons l'expression de la loi d'Ohm dans le cas général de trois conducteurs des résistances R_1 , R_2 , R_3 et présentant des forces électromotrices de contact. Au contact de R_1 et R_2 existe une force électromotrice E_1 , orientée dans le sens du courant ou de la chute de potentiel ; au contact de R_2

et R_3 une force électromotrice orientée en sens inverse. Nous avons trouvé (1)

$$I = \frac{V_A - V_D + E_1 - E_2}{\Sigma R}$$

Posons $V_A - V_D = U$. Multiplions de part et d'autre par I , chassons le dénominateur :

$$I^2 \Sigma R = UI + E_1 I - E_2 I,$$

ou encore $UI = I^2 \Sigma R - E_1 I + E_2 I.$

La puissance UI dépensée aux extrémités du circuit ne peut, en l'absence de récepteurs, que se transformer intégralement en chaleur. Les deux derniers termes sont donc des effets Joule et l'on voit que *toute force électromotrice dirigée dans le sens du courant produit une absorption de chaleur, tandis que toute force électromotrice dirigée en sens contraire provoque un dégagement de chaleur.*

En d'autres termes, *quand on rencontre dans un circuit des forces électromotrices ayant une existence propre et indépendante du courant, elles donnent lieu à une absorption de chaleur si elles relèvent le potentiel et à un dégagement calorifique si elles accentuent la chute due au passage du courant.*

Réiproquement, quand on observe un phénomène calorifique réversible et proportionnel à l'intensité en un point d'un circuit, on en conclura à l'existence, en ce point, d'une force électromotrice indépendante du courant. Appelons D la quantité de chaleur dégagée pendant t secondes, J l'équivalent en watts de la calorie, E_1 la différence de potentiel, I l'intensité, on aura

$$DJ = E_1 I t.$$

C'est l'effet découvert par Peltier au contact ou au point de soudage de deux métaux différents.

Le phénomène est assez difficile à mettre en évidence, parce que l'effet Joule se développant dans la résistance comprise entre les deux points sur lesquels on opère, le masque aisément. Appelons r cette résistance. Nous aurons dans un sens

$$DJ = (+ E_1 I + I^2 r) t$$

dans l'autre sens $DJ = (- E_1 I + I^2 r) t$, et le phénomène deviendra apparent si le second terme des deuxièmes membres disparaît. Or comme il est proportionnel au carré de l'intensité, il diminue beaucoup plus rapidement que le premier quand

on réduit I et l'on arrive à rendre son action négligeable, en opérant à très faible intensité.

Par exemple, la force électromotrice de contact du cuivre et du fer étant dirigée du cuivre vers le fer, si l'on constitue un circuit comprenant une première soudure cuivre-fer puis une seconde fer-cuivre, plaçant la première dans de l'eau à 0° , la seconde dans de la glace pilée et faisant passer un courant allant de la première vers la seconde soudure, on voit de la glace se former autour de la première, tandis qu'il en fond des quantités égales autour de la seconde.

Quand tous les points d'un circuit métallique fermé sont à la même température, la somme des forces électromotrices de contact y est nulle en dehors de la source qui l'alimente. Dès lors, la perte d'énergie s'y produisant résulte exclusivement de l'effet Joule dans le circuit; les autres pertes dues aux effets Peltier se compensent exactement. En d'autres termes le développement de chaleur se produisant en un point a pour corollaire l'absorption d'une quantité égale en un ou plusieurs autres points; il y a simplement déplacement de l'énergie calorifique correspondante.

Les équations précédentes vont nous permettre de calculer la chute de potentiel correspondant à une quantité D calories dégagées ou absorbées par seconde par l'effet Peltier seul. Nous aurons en effet :

$$DJ = E_i I, \text{ d'où } E_i = \frac{DJ}{I} = \frac{4,17D}{I}.$$

L'expérience ne vérifie toutefois pas les chiffres calculés de cette manière, ce qui amène à conclure que les choses ne se passent pas tout à fait aussi simplement que nous l'avons exposé. Nous verrons plus loin comment il convient d'interpréter l'effet Peltier.

Effet Kelvin.— Lord Kelvin a montré que toute différence de température dans un conducteur métallique, se traduit par des différences de potentiel électrique. Si par exemple on maintient deux points d'un conducteur AB , (fig. 54), à la

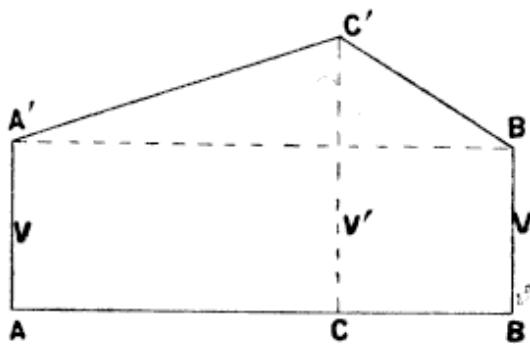


FIG. 54.

même température et un point intermédiaire C à une température supérieure T, pour certains métaux comme le cuivre, l'argent, le zinc, le cadmium, l'antimoine, dits *positifs*, on trouve une différence de potentiel allant en augmentant de A à C, puis diminuant de la même quantité de C à B; pour d'autres dits *négatifs*, tels que le fer, l'étain, l'aluminium, la platine, le bismuth, le potentiel décroît de A en C pour remonter à la même valeur en B; enfin, pour le plomb seul, qui est dit *neutre*, on n'obtient aucune variation de potentiel.

Il en résulte un effet Peltier tel que pour les métaux positifs il y a absorption de chaleur de A en C et dégagement de la même quantité de C en B et vice-versa pour les métaux négatifs.

Par conséquent si, faisant passer de gauche à droite un courant dans une barre homogène, on maintient les extrémités à une même température, le milieu étant porté à une température plus élevée, on ne trouvera pas des températures identiques à égale distance du milieu. Pour les métaux positifs, la température la plus élevée se trouvera à droite; l'inverse se présentera pour les métaux négatifs.

Chaleur spécifique d'électricité. — La force électromotrice ainsi développée dépend de la différence des températures et d'un coefficient σ fonction de la température absolue et de la nature du corps, qui porte le nom de *chaleur spécifique d'électricité*

$$du = \sigma d\theta.$$

Voici sa valeur pour quelques métaux usuels :

Cuivre	— 0,014	microvolt par degré C
Fer	+ 0,042	" "
Laiton	— 0,007	" "
Palladium	+ 0,032	" "
Platine	+ 0,018	" "
Plomb	0	" "
Zinc	— 0,033	" "

Modification de la résistance avec la température. — L'effet Joule donne lieu à un phénomène important : il modifie la résistance des corps. Cette résistance varie en effet avec la température et d'une manière très distincte suivant leur nature.

CORPS CONDUCTEURS. — Matthiesen a trouvé que la résistivité des métaux croît avec la température d'après la formule empirique

$$\rho_{\theta} = \rho_0 (1 + a\theta + b\theta^2)$$

ρ_0 étant la résistivité à la température de la glace fondante, ρ_{θ} la résistivité à la température $\theta^{\circ}\text{C}$. a et b sont des coefficients numériques très faibles.

Aux températures comprises entre -100°C et $+100^{\circ}\text{C}$, la résistivité des métaux peut être représentée avec une exactitude suffisante pour la pratique par la formule empirique

$$\rho_{\theta} = \rho_0 (1 + a\theta).$$

Pour le cuivre $a = 0,0038$ environ, pour le fer pur $0,00625$ et pour le fil de fer ordinaire $0,00426$, pour l'aluminium à 99% $0,0042$ et pour celui à $97,5\%$ $0,00430$.

La résistivité des métaux et leur coefficient de température varient beaucoup avec l'état de pureté de ces corps. On est parvenu à réaliser des alliages dont le coefficient de température est nul et même négatif.

CALCUL DE LA RÉSISTANCE D'UN FIL CONDUCTEUR. — Les conducteurs affectent généralement la forme cylindrique. Leur résistance s'établit par la formule indiquée précédemment $R = \frac{\rho l}{s}$. Soit à calculer la résistance à 30° d'un fil en aluminium de 2 mm de diamètre et d'une longueur d'un kilomètre, sachant que la résistivité à 0°C , $\rho_0 = 3,185 \times 10^{-6} \Omega$ et que le coefficient de température est $0,0043$.

La résistivité à 30°C , $\rho_{30} = 3,185 \times 10^{-6} (1 + 0,0043 \times 30) = 3,595 \times 10^{-6}$.

La résistance du conducteur à cette même température sera dès lors, en ayant soin d'exprimer tout en centimètres

$$R = \rho_{30} \frac{l}{s} = \frac{3,595 \times 10^{-6} \times 10^5}{3,14 \times 10^{-2}} = 11,12 \Omega.$$

CORPS PEU ET NON-CONDUCTEURS. — Les corps peu conducteurs, les dissolutions de sels, d'acides ou de bases, accusent une diminution de la résistance quand leur température augmente.

Enfin la résistivité des isolants diminue rapidement, lorsque

leur température augmente. MM. Clark et Bright ont par exemple trouvé pour la gutta-percha la formule

$$\rho_0 = \rho_0 a^0,$$

a étant un coefficient variant de 0,876 à 0,894.

En outre, la résistivité des isolants ne se comporte pas comme celle des métaux; elle est *fonction de la tension d'essai et du temps d'application de cette tension.*

Lois de Kirchhoff. — Soit un réseau quelconque de conducteurs, ce réseau pouvant comprendre des générateurs et des récepteurs. Les lois de Kirchhoff permettent de calculer l'intensité dans chaque branche.

PREMIÈRE LOI. — *La somme des intensités de tous les courants qui arrivent à un sommet est égale à la somme de tous les courants qui s'en éloignent.*

Cette loi est évidente, l'électricité devant être assimilée à un fluide incompressible et inexpansible qui, en l'absence d'appareils spéciaux, ne peut s'emmagasiner dans les noeuds d'un réseau.

En appelant i_1, i_2, \dots les intensités des courants entrant, i'_1, i'_2, \dots celles des courants sortant, on a :

$$i_1 + i_2 + \dots = i'_1 + i'_2 + \dots$$

ou $i_1 + i_2 + \dots - (i'_1 + i'_2 + \dots) = 0.$

On peut encore dire qu'à condition d'affecter du signe + les courants entrant, du signe - les courants sortant, ou vice-versa : *la somme algébrique des courants aboutissant à un nœud est nulle.*

SECONDE LOI. — *Si, sur le réseau, on considère un circuit fermé quelconque et que ce circuit soit composé des branches de résistances différentes R_1, R_2, \dots dans lesquelles circulent des courants d'intensités I_1, I_2, \dots et siège de forces électromotrices E_1, E_2, \dots (fig. 55) la somme algébrique des produits des résistances par les intensités qui les traversent est égale à la somme algébrique de toutes les forces électromotrices existant dans le circuit considéré.*

On considère successivement chaque maille en parcourant le contour fermé et revenant au point de départ.

On se donne comme précédemment, un sens positif pour la direction des courants. Les forces électromotrices tendant à engendrer un courant de ce sens seront considérées comme positives ; les autres, de même aussi que les courants de sens contraire, seront négatives.

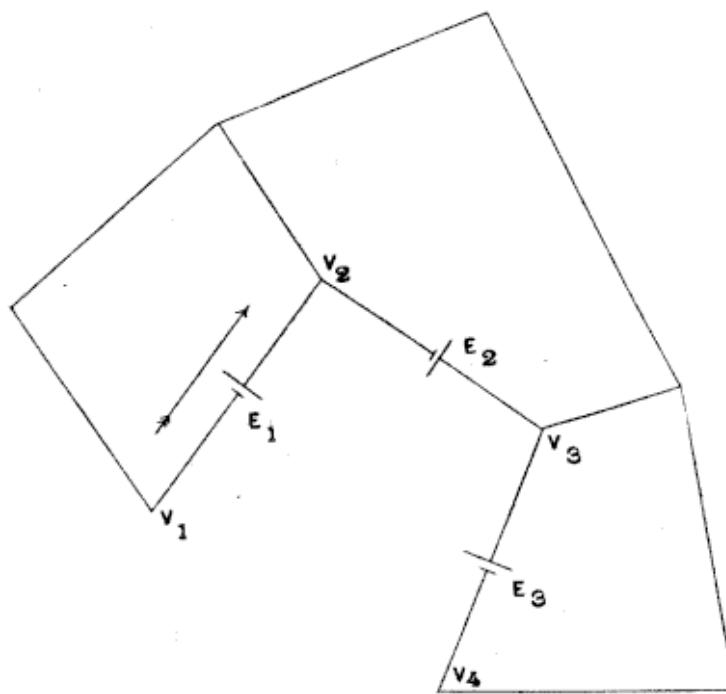


FIG. 55.

En appliquant la loi générale d'Ohm au cas où, dans le circuit

considéré, se trouvent des forces électromotrices et en tenant compte des signes, on aura

$$R_1 I_1 = V_1 - V_2 + E_1$$

$$R_2 I_2 = V_2 - V_3 + E_2$$

...

$$R_n I_n = V_n - V_1 + E_n.$$

En additionnant il vient :

$$\Sigma R I = \Sigma E.$$

Les lois de Kirchhoff sont d'une importance capitale. Ce sont elles qui permettent de déterminer les facteurs des circuits les plus compliqués. Elles s'appliquent aussi à la période variable du courant pour toutes ses valeurs instantanées.

En appelant n le nombre des conducteurs et m celui des points de bifurcation, l'application de la première loi de Kirchhoff fournit $m - 1$ relations, l'application de la seconde $n - m + 1$, soit au total n équations du premier degré, permettant de déterminer les n inconnues i_1, i_2, \dots, i_n .

Quand les équations sont nombreuses, leur résolution par la méthode ordinaire de substitution est laborieuse. On simplifie souvent les calculs en recourant aux déterminants.

Lois des courants dérivés. Résistance combinée. — *Lorsqu'un conducteur se bifurque en plusieurs autres, le courant se subdivise entre eux d'une manière inversement proportionnelle à leur résistance.*

Soit un conducteur multiple parcouru par un courant I (fig. 56) dont les points de subdivision sont aux potentiels respectifs V_1 et V_2 , et r_1, r_2, \dots , les résistances des branchements parcourus par les courants i_1, i_2, \dots

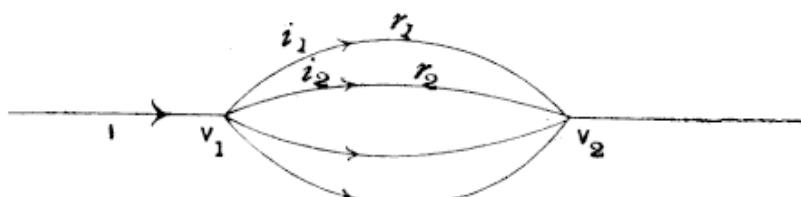


FIG. 56.

Appelons X la résistance combinée de l'ensemble des conducteurs r_1, r_2, \dots , c'est-à-dire une résistance telle qu'en appliquant à ses bornes la différence de potentiel $V_1 - V_2$, elle soit parcourue par le courant total I .

L'application de la loi d'Ohm au faisceau de conducteurs considérés en bloc donne par définition :

$$I = \frac{V_1 - V_2}{X}.$$

En l'appliquant à chacun des conducteurs pris isolément, on a :

$$i_1 = \frac{V_1 - V_2}{r_1}; \quad i_2 = \frac{V_1 - V_2}{r_2}; \quad i_3 = \frac{V_1 - V_2}{r_3}; \quad \dots$$

On tire immédiatement de ces équations :

$$i_1 r_1 = i_2 r_2 = \dots = IX,$$

d'où

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}; \quad \frac{i_2}{i_3} = \frac{r_3}{r_2}; \quad \dots \quad \frac{i_1}{I} = \frac{X}{r_1}; \quad \frac{i_2}{I} = \frac{X}{r_2}; \quad \text{etc.}, \quad (1)$$

ce qui justifie la proposition énoncée et nous permettra de calculer les divers courants i_1, i_2, \dots , dès que nous connaîtrons les résistances partielles r_1, r_2, \dots , la résistance combinée X et le courant total I .

Cherchons maintenant la valeur X de la résistance combinée en fonction des résistances composantes.

La première loi de Kirchhoff nous donne

$$I = i_1 + i_2 + i_3 + \dots,$$

ou, en remplaçant I , i_1 , i_2 , ... par les valeurs précédemment trouvées :

$$\frac{V_1 - V_2}{X} = \frac{V_1 - V_2}{r_1} + \frac{V_1 - V_2}{r_2} + \dots,$$

ou

$$\frac{I}{X} = \frac{I}{r_1} + \frac{I}{r_2} + \dots,$$

ce qui montre que *la conductance totale de conducteurs dérivés est égale à la somme des conductances de ces conducteurs.*

L'équation précédente peut s'écrire :

$$X = \frac{I}{\frac{I}{r_1} + \frac{I}{r_2} + \dots} = \frac{I}{\sum \frac{I}{r}}.$$

On l'énonce : *La résistance combinée est égale à l'inverse de la somme des inverses des résistances composantes.*

REMARQUE. — Nous serions arrivé directement aux équations $i_1r_1 = i_2r_2 = \dots$, en appliquant aux circuits formés par les résistances r_1r_2 , r_2r_3 , ... la seconde loi de Kirchhoff. En l'appliquant au circuit r_1r_2 , par exemple, on a :

$$i_1r_1 - i_2r_2 = 0 \text{ ou } i_1r_1 = i_2r_2,$$

et ainsi de suite.

APPLICATION. — Trois résistances dérivées mesurant respectivement 3, 5 et 7 ohms, ont une résistance combinée de 1,48 O. Les courants qui les traversent présentent les intensités respectives de 0,494, 0,296 et 0,21 I ⁽¹⁾.

Conducteurs dérivés d'égales résistances. — Si n conducteurs dérivés possèdent des résistances égales, leur résistance combinée est

$$X = \frac{I}{\sum \frac{I}{r}} = \frac{I}{\frac{n}{r}} = \frac{r}{n}.$$

La résistance combinée de conducteurs dérivés de même résistance, est égale à la résistance d'un des conducteurs divisée par leur nombre.

⁽¹⁾ Ces calculs ainsi que les suivants, sont effectués à la règle logarithmique de 26 centimètres.

Cas de deux conducteurs. — Arrêtons-nous un instant au cas fréquent où la dérivation est constituée par deux conducteurs de résistances r_1 , r_2 . Leur résistance combinée

$$X = \frac{I}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2},$$

formule aisée à retenir.

Le courant dans chacune des branches sera d'ailleurs, en vertu des formules (1) :

$$i_1 = \frac{I r_2}{r_1 + r_2}; i_2 = \frac{I r_1}{r_1 + r_2},$$

ce qui s'énonce : *le courant dans une dérivation est égal à l'intensité totale du courant se bifurquant, multipliée par la résistance de la branche opposée, et divisée par la somme des résistances des deux dérivation*.

Application des lois de Kirchhoff. — Généralement on connaît les résistances des divers conducteurs du réseau, les valeurs des forces électromotrices appliquées et l'on doit déterminer les intensités des courants en grandeur et en direction.

On commence par dresser le croquis du réseau; on indique sur les conducteurs leur résistance, les forces électromotrices appliquées; on trace des flèches suivant la direction présumée des divers courants i_1, i_2, \dots . On pose et résout les équations résultant de l'application des lois de Kirchhoff. Comme ces lois tiennent algébriquement compte de la direction relative donnée aux divers courants, si le choix de ces directions a été bien fait, la solution des équations donne toutes valeurs positives pour les intensités. En d'autres termes à un nœud quelconque, la somme des courants indiqués comme entrant est bien égale à la somme des courants indiqués comme sortant, c'est-à-dire que la distribution des courants a été réalisée conformément à ce qui se passe réellement.

Mais s'il n'en a pas été ainsi, on trouve des valeurs négatives pour certains courants, ce qui signifie qu'ils sont dirigés en sens inverse de la direction choisie. On rectifiera sur le croquis qui sera dès lors correct.

EXEMPLE. On a trois branches des résistances respectives r_1 , r_2 , R ohms (fig. 57). Dans les deux premières agissent des forces électromotrices E_1 , E_2 , placées en opposition. Déterminer la direction et l'intensité des courants qui circulent dans les diverses branches.

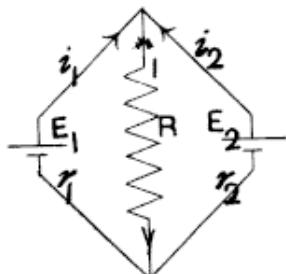


FIG. 57.

Si E_1 est la force électromotrice la plus grande, le sens du courant dans la branche de gauche sera évidemment celui $r_1 E_1 i_1$ marqué par la flèche; dans la branche de droite il dépendra des valeurs relatives des forces électromotrices E_1 et E_2 ; admettons celui indiqué; enfin, dans la branche IR il n'est pas douteux qu'il soit dirigé de I vers R . Supposons que nous ayons fait erreur et admis le sens inverse marqué par la flèche. La résolution des équations doit nous montrer cette erreur.

La première loi de Kirchhoff appliquée au nœud A nous donne : $i_1 + i_2 + I = 0$. (1)

La seconde loi appliquée successivement aux circuits $E_1 R$, $R E_2$ nous fournit les équations :

$$r_1 i_1 - RI = E_1 \quad (2)$$

$$RI - r_2 i_2 = - E_2 \quad (3)$$

Il est inutile de l'appliquer au circuit extérieur $E_1 E_2$, car l'équation obtenue résulterait de la combinaison des deux précédentes, ainsi qu'on peut s'en assurer. Nous possédons d'ailleurs 3 équations linéaires à 3 inconnues i_1 , i_2 , I ; elles suffisent pour la détermination de ces dernières.

Écrivons ces équations sous forme symétrique :

$$\begin{aligned} i_1 + i_2 + I &= 0 \\ r_1 i_1 + o i_2 - RI &= E_1 \\ o i_1 - r_2 i_2 + RI &= - E_2 \end{aligned}$$

$$\text{d'où } i_1 = \frac{\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ E_1 & 0 & -R \\ -E_2 - r_2 + R & 1 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ r_1 & 0 & -R \\ 0 & -r_2 + R & 0 \end{vmatrix}} = \frac{(E_1 - E_2) R + E_1 r_2}{r_1 r_2 + r_2 R + r_1 R}.$$

Par analogie $i_2 = \frac{(E_2 - E_1) R + E_2 r_2}{r_1 r_2 + r_2 R + r_1 R}$,

enfin $I = \frac{\begin{vmatrix} I & I & 0 \\ r_1 & 0 & E_1 \\ 0 & -r_2 - E_2 \\ \hline I & I & I \\ r_1 & 0 & -R \\ 0 & -r_2 + R \end{vmatrix}}{r_1 R + r_2 R + r_1 r_2} = \frac{-r_2 E_1 - r_1 E_2}{r_1 R + r_2 R + r_1 r_2}$.

La valeur négative trouvée pour I indique que nous avons fait erreur sur le sens du courant dans la branche IR ; le courant sort du noeud supérieur et est dirigé de I vers R .

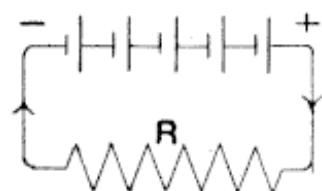
CHAPITRE IV.

Divers modes de groupement des générateurs d'électricité.

Les pôles d'une source quelconque d'électricité sont matérialisés par des fils conducteurs, ou mieux par des bornes, facilitant la fixation des conducteurs de raccordement.

Quand la puissance que développe individuellement chacune des sources d'électricité dont on dispose est insuffisante, il y a lieu de les grouper judicieusement, de manière à obtenir de l'ensemble un effet maximum.

Groupement en série. — Dans le groupement en série ou tension (fig. 58); le pôle positif d'un élément est connecté au pôle



négatif de l'élément suivant et ainsi de suite ou vice-versa. Les éléments sont donc réunis de manière à former une chaîne dans laquelle les forces électromotrices de chacun d'eux sont dirigées dans le même sens et produisent des accroissements successifs de potentiel.

Si E est la force électromotrice de chaque élément, r leur résistance intérieure, R la résistance extérieure sur laquelle ils débitent, la force électromotrice de l'ensemble est nE , la résistance intérieure nr et le courant engendré dans le circuit extérieur :

$$I_s = \frac{nE}{nr + R}.$$

Groupement en dérivation. — Dans le groupement en dérivation ou en surface, ou en quantité, tous les pôles de même nom sont réunis entre eux (fig. 56). Cela revient, en définitive, à former un nouvel élément dont le positif ait une surface égale

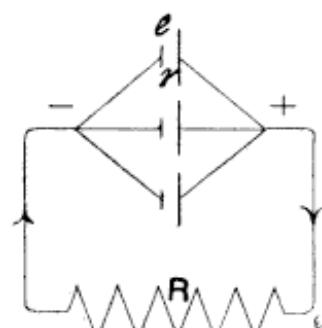


FIG. 58 et 59.

à la somme de tous les positifs des éléments couplés ; de même pour le négatif. S'il existe encore n éléments associés, la force électromotrice ne sera plus que celle E d'un élément, mais la résistance intérieure se réduit à la valeur $\frac{r}{n}$, résistance combinée de n dérivations de résistance r .

Le courant engendré dans le circuit extérieur a pour valeur :

$$I_d = \frac{E}{\frac{r}{n} + R} = \frac{nE}{r + nR}$$

Suivant que $nr + R$ $\begin{cases} < \\ > \end{cases} r + nR$ ou $r \begin{cases} < \\ > \end{cases} R$ $I_s \begin{cases} < \\ > \end{cases} I_d$.

Donc, le groupement en tension donne un courant d'intensité supérieure, égale ou inférieure à celle fournie par le groupement en quantité, suivant que la résistance intérieure d'un élément est inférieure, égale ou supérieure à la résistance extérieure.

Si R est très grand par rapport à r , on aura approximativement, avec l'arrangement en tension :

$$I_s = \frac{nE}{R}$$

et l'intensité est proportionnelle au nombre d'éléments mis en série.

Si, au contraire, la valeur de r est très supérieure à celle de R , l'intensité devient, avec le groupement en dérivation

$$I_d = \frac{nE}{r},$$

et dans ce cas encore, on peut admettre que l'intensité du courant est proportionnelle au nombre des éléments employés.

En résumé, tant que la résistance des éléments ne dépasse pas la résistance extérieure, il y a avantage à les grouper en tension ; quand leur résistance la dépasse, il y a intérêt à les monter en dérivation.

Groupement mixte. — Tels sont les deux modes fondamentaux de groupement des générateurs d'électricité. On les combine, suivant les nécessités de l'application en vue, le plus

souvent en plaçant en dérivation, l'une par rapport à l'autre, des séries comprenant le même nombre d'éléments.

Lorsque n éléments sont mis en série, la pile résultante possède une force électromotrice nE et une résistance intérieure nr .

En plaçant en dérivation m séries semblables, la force électromotrice reste nE , mais la résistance intérieure tombe à $\frac{nr}{m}$. Le courant débité dans une résistance extérieure R sera

$$I = \frac{nE}{\frac{nr}{m} + R}.$$

Avec un nombre d'éléments $mn = N$, on peut donc former toute une série de combinaisons en les prenant successivement 1 à 1, 2 à 2 (si N est divisible par 2)...

COURANT MAXIMUM. Entre toutes ces combinaisons, la plus avantageuse sera celle fournissant le courant maximum. Or le dénominateur de I , si nous divisons haut et bas par n , est formé de la somme de deux termes dont le produit est constant. Cette somme sera minimum et par suite le courant sera maximum, quand les deux termes sont égaux, c'est-à-dire

quand $\frac{r}{m} = \frac{R}{n}$ ou $\frac{nr}{m} = R$, ou quand la résistance intérieure de la pile est égale à la résistance extérieure. En remplaçant successivement m et n par leur valeur en fonction de N , cette condition devient :

$$n = \sqrt{\frac{RN}{r}} \text{ ou } m = \sqrt{\frac{rN}{R}}.$$

L'intensité maximum est

$$I_m = \frac{nE}{2R} = \frac{mE}{2r}.$$

Done, lorsqu'on veut faire traverser une résistance extérieure donnée par un courant maximum, il faut grouper les éléments de manière que la résistance intérieure de la batterie formée soit précisément égale à cette résistance extérieure.

Montage en échelle d'Amsterdam. — Il peut arriver que l'on doive alimenter divers circuits requérant des forces électro-

motrices différentes, ceux à faible force électromotrice étant beaucoup plus nombreux que les autres, c'est-à-dire consommant au total beaucoup plus de courant. Dans ce cas on peut recourir, pour économiser le matériel, à un montage mixte, combinaison irrégulière des deux précédents. On forme des groupements composés d'éléments réunis en quantité, dont le nombre diminue à mesure qu'on s'éloigne de la base de la pile (fig. 60).

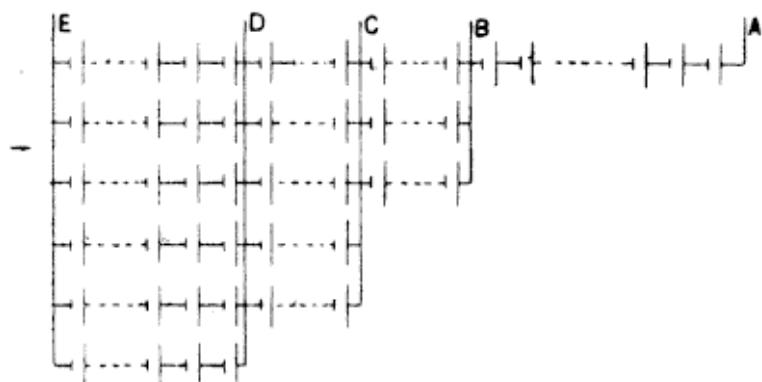


FIG. 60.

On effectuera par exemple le montage de la manière suivante:

5 séries de 30 éléments.

4	»	15	»
3	»	10	»
2	»	5	»
1	»	40	»

Les divers circuits d'utilisation sont reliés aux divers échelons EA, EB, ..., d'après la force électromotrice qu'ils requièrent : ceux à grande force électromotrice, moins nombreux, mettent la batterie entière à contribution, et ce sont à ce moment les uniques éléments de tête (en AB) qui travaillent le plus, puisqu'ils débitent *tout* le courant absorbé par ces circuits. Les autres circuits, plus nombreux, viennent puiser le fort courant qu'ils exigent à la base de la batterie, laquelle est à même de le fournir, sans exagérer le débit de chaque série. De cette manière, le travail des éléments est régularisé et l'entretien est facilité par le fait que partout où il existe plusieurs rangées, on peut en supprimer momentanément une sans interrompre le fonctionnement de l'ensemble.

Puissance et rendement. — Dans un circuit comprenant une

source de force électromotrice E , de résistance r et une résistance extérieure R , l'intensité du courant est

$$I = \frac{E}{r + R}. \quad (1)$$

Aux bornes de la source règne la différence de potentiel e , en sorte que la puissance utilisable est $p = eI$. L'équation (1) nous donne la valeur de I en fonction des facteurs du circuit. Cherchons de même la valeur de e . On a évidemment (puisque e fait traverser la résistance R par le courant I ou $I = \frac{e}{R}$)

$$\frac{e}{R} = \frac{E}{r + R}, \quad \text{d'où} \quad e = \frac{ER}{r + R}. \quad (2)$$

En remplaçant les quantités e et I par leurs valeurs (2) et (1) dans l'expression de la puissance, il vient

$$p = eI = E^2 \frac{R}{(r + R)^2} = RI^2. \quad (3)$$

La puissance totale engendrée est $P = EI$, de sorte que le rendement

$$\eta = \frac{p}{P} = \frac{e}{E} = \frac{R}{r + R} = \frac{I}{\frac{r}{R} + 1}. \quad (4)$$

La puissance utile et le rendement varient donc avec la résistance extérieure R . Cherchons le maximum de la puissance utile $p = eI = I^2R$. La résistance R étant elle-même fonction de I , équation (1), la puissance utile sera maximum si I est lui-même maximum. Mais nous avons trouvé précédemment que ce maximum est atteint quand la résistance extérieure est égale à la résistance intérieure de la pile. En introduisant cette condition dans l'expression de la puissance et du rendement il vient :

$$p_M = \frac{E^2}{4r} \quad \text{et} \quad \eta_M = \frac{1}{2}.$$

En nous reportant à l'équation (4), nous voyons que pour $R = 0$, $\eta = 0$. Toute la puissance du générateur mis en court-circuit se dépense en chaleur dans sa résistance intérieure.

Quand R croît de 0 à r , la fraction $\frac{r}{R}$ varie de ∞ à 1 et η de 0

à $\frac{I}{2}$. A ce moment, comme nous l'avons vu plus haut, la puissance utile est maximum. Quand R continue à croître de r à ∞ , la fraction $\frac{r}{R}$ varie de 1 à 0 et le rendement passe de $\frac{I}{2}$ à 1.

Done, pour obtenir un bon rendement d'un générateur d'électricité, il faut s'éloigner des conditions de travail maximum.

CHAPITRE V

Effets chimiques du courant ⁽¹⁾

Phénomène de l'électrolyse.— Plongeons deux plaques d'un même métal en rapport avec une pile voltaïque dans un liquide. Si celui-ci est isolant, le courant ne passe pas, aucun phénomène particulier ne se manifeste. S'il est conducteur au contraire, à part le cas où il s'agit d'un corps simple comme un métal fondu ou du mercure, un phénomène de transport dans les deux sens, appelé *électrolyse*, va se produire. Le liquide est l'*électrolyte*, les deux plaques les *électrodes*. Celle en rapport avec le pôle positif de la source, par où entre le courant dans l'électrolyte, est l'*anode*; celle en rapport avec le pôle négatif, par où le courant sort de l'électrolyte, est la *cathode*. Les produits se déposant sur l'anode portent le nom d'*anions*; ceux apparaissant à la cathode sont les *cathions*.

Les liquides purs proprement dits, comme l'eau, l'alcool, l'éther, etc... ne sont pas électrolysables. Pour que l'électrolyse se produise, *il faut que le liquide contienne un sel en dissolution ou qu'il soit lui-même un sel fondu*.

Sous l'action du courant, le métal du sel se dépose sur la cathode, *il marche dans le sens du courant*, tandis que le radical qui lui est uni dans le sel se porte sur l'anode.

Si, par exemple, nous plongeons deux électrodes en platine dans du chlorure de plomb $Pb Cl_2$ fondu, nous verrons le plomb apparaître à l'état cristallisé sur la cathode, tandis que des bulles de chlore se dégagent sur l'anode.

⁽¹⁾ P. CH. MULLER. *Les lois fondamentales de l'électrochimie*. Encyclopédie Léanté, Gauthier-Villars, Masson, Paris.

Réactions secondaires. — Les produits ainsi mis en liberté réagissent éventuellement suivant leurs affinités chimiques, avec l'électrolyte ou avec les électrodes.

Si par exemple on électrolyse du Cu SO_4 entre deux lames de platine, on obtient sur la cathode un dépôt métallique rouge de cuivre, tandis qu'à l'anode le radical SO_4^{\cdot} provoque un dégagement d'oxygène en se combinant avec l'eau suivant la formule



Un cas plus complexe est fourni par l'électrolyse du chlorure de sodium entre une anode en zinc et une cathode en platine.

Le chlore de l'anode fournit du Zn Cl_2^{\cdot} , lequel réagissant à son tour avec la potasse donne de l'hydrate de zinc pur

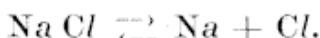


tandis que le sodium porté sur la cathode réagit avec l'eau pour donner de la soude



Si l'anode est en platine et la cathode en mercure, on obtient un dégagement de chlore gazeux à l'anode, tandis que le sodium s'amalgame avec le mercure de la cathode.

Théorie d'Arrhénius. — Suivant Arrhénius, les corps subissent en se dissolvant, c'est-à-dire en fournissant un électrolyte, une décomposition réversible qui a reçu le nom de *dissociation électrolytique* ou *d'ionisation*. Ainsi le sel marin dissout se met partiellement sous la forme de particules de Na et de Cl^{\cdot}



Les corps ainsi séparés, portent le nom d'ions. Dans cette dissociation, comme dans celle qui a lieu entre molécules gazeuses, l'équilibre, ou le nombre relatif de molécules dissociées, dépend de la température et de la concentration du système.

Si l'on n'arrive pas à déceler directement les propriétés spécifiques des corps ainsi isolés, cela tient à ce que, par une véritable isomérie électrochimique, ils prennent des propriétés physiques spéciales en passant à l'état d'ions : ils existent alors

avec des affinités libres et sont chargés d'électricité. Les charges qu'ils possèdent ont des signes contraires aux électrodes vers lesquelles ils cheminent, ce qui explique qu'en arrivant sur celles-ci, ces charges soient neutralisées à chaque instant par le flux électrique de signe contraire qu'y apporte le courant. Tous les ions-métaux ou cathions ont une charge positive; tous les ions-radicaux ou anions une charge négative. Ces charges sont d'ailleurs égales par valences et le nombre de celles-ci étant toujours le même de part et d'autre, la somme des charges est constamment nulle et la solution ne peut donner aucun signe d'électrisation.

Lorsqu'un électrolyte est décomposé, c'est donc parce que des molécules étaient préalablement séparées en leurs ions. Le courant ne fait que provoquer le transport des ions aux électrodes.

L'ion débarrassé de sa charge électrique reprend aussitôt les propriétés de l'atome ou du groupe d'atomes dont il est l'isomère; il redevient un individu chimique ordinaire qui réagit, soit sur l'électrode, soit sur l'électrolyte, soit sur le dissolvant, soit sur lui-même.

Si au début de l'électrolyse il n'y a pas d'ions, ou si à la fin de l'électrolyse il n'y a plus d'ions, le courant *ne passe pas*. On conçoit également pour quelle raison il n'y a de décomposition que sur les électrodes et jamais au sein même de l'électrolyte, malgré le passage du courant. Enfin, à la traversée d'un certain nombre de coulombs dans l'électrolyte, doit nécessairement correspondre le dépôt d'une masse déterminée d'ions.

Loi de Faraday. — C'est ce que Faraday a précisé en une loi dont le mécanisme tient dans les propositions suivantes :

1° *Les poids d'électrolytes décomposés sont proportionnels aux quantités d'électricité qui ont traversé le circuit.*

Si l'on fait passer un courant à travers une cuve électrolytique, on constate que les masses d'ions déposés sur les électrodes sont proportionnelles aux temps. En appelant p le poids déposé par 1 ampère sur une électrode, le poids déposé par I ampères en t secondes sera $P = pIt = pQ$.

En considérant un circuit traversé par un courant, l'action

chimique de celui-ci sera la même en tous ses points, puisqu'en tous ses points circule la même quantité d'électricité. La forme, les dimensions du vase électrolytique et des électrodes n'interviendront pas, si ce n'est au point de vue de la résistance du circuit.

En montant, par exemple, à la suite l'une de l'autre, un certain nombre de cuves électrolytiques de même composition, mais de formes diverses, et les faisant traverser par un courant, on trouvera, au bout d'un temps quelconque, des augmentations égales de poids sur les diverses électrodes.

Cette proportionnalité des poids déposés aux quantités d'électricité et, par suite, en rapportant à l'unité de temps, aux intensités, permet la mesure de ces dernières; elle est la base d'une classe de compteurs électriques.

2° *Les poids des divers électrolytes décomposés par un même courant sont proportionnels aux équivalents chimiques de ces électrolytes.* En d'autres termes, les poids d'ions déposés sur les électrodes sont proportionnels à leurs équivalents.

Le poids des corps mis en liberté par l'unité de quantité d'électricité prend le nom d'équivalent électrochimique de ces corps.

Un coulomb traversant une cuve électrolytique libère $1,037 \cdot 10^{-5}$ gramme d'hydrogène. Si b est l'équivalent chimique d'un corps rapporté à l'hydrogène, la masse z de corps libérée par un coulomb sera $z = 1,037 \cdot 10^{-5}b$ gramme; z est l'équivalent électrochimique du corps considéré.

Un courant de I ampères déposera en t secondes une masse

$$M = zIt = 1,037 \cdot 10^{-5}bIt \text{ grammes.}$$

Un ampère-heure (3 600 coulombs) libère 37 à 38 milligrammes d'hydrogène et 37 à 38 b milligrammes d'un corps donné.

Remarquons bien que l'action chimique du courant n'est pas proportionnelle au poids atomique seul, mais à l'équivalent chimique, c'est-à-dire au poids atomique divisé parce que l'on appelle la *valence*, ou *atomicité* ou encore *quantivalence*.

Si m est la masse moléculaire d'un composé, n le nombre de

valences réunissant les deux ions, on aura pour la masse en grammes décomposée par coulomb

$$1,037 \times 10^{-5} \times \frac{m}{n} = 1,037 \times 10^{-5}b.$$

L'équivalent électrochimique d'un même ion variera donc, suivant la nature des composés qu'il forme, en raison inverse du nombre de valences n qu'il faut rompre pour le libérer.

La masse M déposée par Q coulombs sera

$$M = 1,037 \times 10^{-5} \times \frac{m}{n} Q = 1,037 \times 10^{-5} \times bQ.$$

Ces formules permettent de calculer le dépôt que peut fournir un courant déterminé ou, inversement, de calculer l'intensité du courant nécessaire pour produire un dépôt de masse donnée en un temps donné.

REMARQUE. — Un coulomb libérant 0,000 010 37 gr d'H, il faut pour libérer un gramme d'H

$$\frac{1}{0,000 \ 010 \ 37} = 96 \ 540 \text{ coulombs.}$$

Un gramme d'ions d'H possède donc la formidable charge de 96 540 coulombs laquelle, en vertu de la loi de Faraday, charge également l'équivalent, c'est-à-dire *une valence exprimée en grammes*, d'un composé quelconque.

EXPÉRIENCE.— Si nous introduisons en série dans un même circuit deux cuves électrolytiques contenant l'une du Na Cl (23 de sodium monovalent unis à 35,5 de chlore monovalent, soit 58,5 comme poids moléculaire) et du Zn Cl² (65 de zinc bivalent unis à 2 fois 35,5 de chlore, soit 65 + 2 × 35,5 = 136, poids moléculaire du Zn Cl²), au moment où 58,5 grammes de Na Cl seront décomposés par le courant à raison de 35,5 grammes de chlore sur l'anode et 23 de sodium sur la cathode de la première cuve, on constatera qu'une quantité de Zn Cl² = $\frac{136}{2} = 68$ grammes sera décomposée dans la seconde cuve à raison de 35,5 gr de chlore sur l'anode et 32,5 de zinc sur la cathode. Les équivalents électrochimiques de ces deux électrolytes sont donc respectivement égaux à 58,5 pour le Na Cl et à 68 = $\frac{65 + 2 \times 35,5}{2}$ pour le Zn Cl².

En vertu de ce que nous venons de dire ci-dessus, la charge de 96 540 coulombs existera sur 35,5 grammes de chlore, sur 23 grammes de sodium et sur 32,5 grammes de zinc.

Définition pratique du coulomb et de l'ampère. — La loi de Faraday permet de définir très simplement les unités de quantité et d'intensité. Le coulomb est la quantité d'électricité qui met en liberté 0,001 118 gr d'argent; l'ampère est l'intensité du courant qui met en liberté 0,001 118 gr d'argent *par seconde*.

Conductibilité électrolytique. — Le courant passe à travers l'électrolyte, à cause de la présence des ions. La conductibilité d'un électrolyte dépendra donc de sa concentration. *On convient de prendre pour concentration normale, celle de la solution contenant une molécule-gramme par litre.* La concentration s'exprime alors, soit par le nombre m de molécules-grammes par litre, soit *par le nombre v de litres correspondant à une molécule-gramme*. Dans le premier cas une molécule est contenue dans $\frac{1}{m}$ litre, donc $\frac{1}{m} = v$.

Conductibilité moléculaire. — Prenons un volume quelconque v de liquide contenant une molécule-gramme et plaçons-le exactement entre deux électrodes distantes de un centimètre. v représentera la surface des électrodes. c étant la conductibilité de la solution, la conductibilité de la masse liquide considérée, appelée *conductibilité moléculaire* sera

$$\mu = vc = \frac{c}{m} \cdot$$

μ varie avec c et m . Quand la dilution augmente, c et m diminuent simultanément en tendant vers 0 et l'expérience prouve que μ augmente lentement, en tendant asymptotiquement vers une limite correspondant à $m = c = 0$.

Loi d'Oswald. — Si la dissociation était complète à tous les degrés de concentration, la conductibilité moléculaire resterait invariable puisqu'elle ne dépend que du nombre d'ions contenus dans la molécule-gramme, lequel ne varie pas. Mais elle augmente avec la dilution. Par conséquent : *le rapport de la conductibilité moléculaire pour une dilution donnée, à la conductibilité moléculaire limite, mesure le degré de dissociation*.

ciation, ou le rapport du nombre n de molécules dissociées au nombre total n' de molécules introduites dans la solution.

$$\frac{n}{n'} = \frac{\mu}{\mu'}.$$

Vitesse des ions. Sels normaux et anormaux. — Hittorf a remarqué que les divers ions ne progressent pas avec la même vitesse dans les électrolytes, attendu que des différences de concentration se constatent aux environs des électrodes. Par exemple, si l'on décompose du sulfate de cuivre dans un tube en U au moyen de deux électrodes en platine, on reconnaît que la solution se décolore, c'est-à-dire s'appauvrit plus vite du côté de la cathode. En séparant les deux branches par une cloison poreuse, puis analysant le liquide de part et d'autre, on trouve que pour 63 gr de cuivre déposés sur la cathode, 42 gr proviennent du compartiment cathodique et 21 gr ou le $\frac{1}{3}$ du compartiment anodique. La cloison a, par conséquent, été traversée par le $\frac{1}{3}$ du cuivre total dans le sens du courant et par les $\frac{2}{3}$ du radical SO_4^2- en sens contraire. Ces nombres 0,33 pour le cuivre et 0,66 pour le SO_4^2- , sont appelés *nombres de transport des ions*.

Ils varient avec la nature du sel et sont égaux pour les deux ions dans les sels K Cl , K_2SO_4 , K_2O_3 , K_2H_4 , etc... dits *sels normaux*, inégaux dans les autres comme Na Cl , Na_2SO_4 , Ca Cl_2 , etc... dits *sels anormaux*.

Loi de Kolrausch. — Les nombres de transport d'Hittorf sont évidemment proportionnels aux vitesses, de sorte qu'en appelant u et v les vitesses de migration des ions, dont les nombres de transport sont n et n' on a :

$$\frac{u}{v} = \frac{n}{n'}.$$

Valeur absolue de la vitesse. — Considérons une colonne liquide de section s , de conductibilité c , entre deux électrodes situées à la distance l , accusant une différence de potentiel E .

En vertu de la loi d'Ohm :

$$I = \frac{cs}{l} E.$$

Si la colonne considérée ne contenait qu'une file de N molécules, la distance de celles-ci $\frac{l}{N}$ serait parcourue en un temps $\frac{l}{Nu}$ par les ions de vitesse u et $\frac{l}{Nv}$ par ceux de vitesse v . Par conséquent pendant le temps $\frac{l}{Nu}$ toute la file des ions de vitesse u avance d'une molécule, tandis qu'il faut aux ions de vitesse v un temps $\frac{l}{Nv}$ pour parcourir la même distance. Pendant une seconde les ions de vitesse u auront avancé de

$$\frac{I}{l} = \frac{Nu}{l}$$

molécules ; ceux de vitesse v de $\frac{Nv}{l}$ molécules. En d'autres termes la cloison séparative des électrodes sera traversée par seconde par $\frac{Nu}{l}$ molécules des premiers, $\frac{Nv}{l}$ des seconds.

Comme au moment où une molécule des premiers se précipite sur une électrode, une molécule des seconds se dépose sur l'autre électrode, le nombre total d'ions arrivant par seconde à chaque pôle est $\frac{N(u+v)}{l}$. En d'autres termes nous avons $\frac{N(u+v)}{l}$ valences rompues par seconde. Mais nous avons vu qu'une même quantité d'électricité libère une valence d'électrolyte quel qu'il soit. Pour un gramme d'H nous savons que la charge relative à une valence est 96 540 coulombs. Par conséquent, la charge d'électricité positive apportée à chaque seconde sur la cathode sera

$$\frac{N(u+v)}{l} \times 96540 \text{ coulombs} = I.$$

Mais si la concentration est m , le nombre de molécules par cm^3 s'élève à $\frac{m}{1000}$ et le nombre total compris entre les deux électrodes à

$$N = \frac{mls}{1000}, \text{ d'où } I = \frac{ms(u+v)}{1000} \times 96540.$$

Egalons les deux valeurs de I

$$96,54 \text{ m} (u + v) = \frac{c E}{l} = c e,$$

e étant la chute par centimètre. De sorte qu'en désignant par u_i et v_i les valeurs des vitesses pour une chute d'un volt par centimètre, on aura

$$u_i + v_i = \frac{c}{96,54 \text{ m}} = \frac{\mu}{96,54}.$$

La valeur du second nombre est donnée par expérience.

Comme d'autre part $\frac{u_i}{v_i} = \frac{n}{n'}$, on peut déterminer u_i et v_i en valeur absolue.

Prenons par exemple le cas du chlorure de potassium. Ce sel étant normal $u_i = v_i$, $\mu = 0,080$. On a :

$$2 u_i = \frac{0,08}{96,54} \text{ d'où } u_i = 0,0004 \text{ centimètre par seconde.}$$

Dans un champ donnant une chute d'un volt par centimètre, la force qui s'exerce sur une unité C. G. S. d'électricité est $H = -\frac{dV}{dn}$ en valeur absolue 10^8 dynes. Celle qui s'exerce sur un coulomb est $\frac{10^8}{10} = 10^7$ dynes. Sur un gramme d'ions d'H chargés de 96 540 coulombs, la force est $96\,540 \times 10^7$ dynes = $\frac{96\,540 \times 10^7}{981\,000}$ kg = 96 540 000 kg. Le poids atomique du potassium étant 39, on voit que la force exercée dans un tel champ sur un gramme de potassium est de 2 472 000 kg.

Chaleur d'ionisation. — Le passage de l'état moléculaire à celui d'ion correspond toujours à une manifestation thermique. On appelle *chaleur d'ionisation*, la quantité de chaleur dégagée par molécule-gramme passant à l'état d'ions. Dans la théorie des ions, la chaleur de formation d'un corps tel que l'acide iodhydrique en solution étendue à partir de ses éléments, représente la somme des chaleurs d'ionisation de l'hydrogène et de l'iode, c'est-à-dire la chaleur dégagée par le passage de l'état gazeux à l'état d'ions. De même, la chaleur de substitution d'un métal à un autre dans un sel, représente la différence des chaleurs d'ionisation des deux métaux. Chaque nombre est caractéristique de l'ion et indépendant de l'ion qui l'accompagne.

Polarisation des électrodes. Courant secondaire. — Le dépôt des ions sur les électrodes modifie leur surface et dès lors une différence de potentiel doit se manifester entre elles. En effet, si après avoir électrolyté une solution pendant un certain temps, on rompt la communication avec la source puis que l'on réunisse les électrodes entre elles, on constate la production d'un courant dit *secondaire*, de sens inverse au premier. Les électrodes sont *polarisées* et leur différence de potentiel s'appelle la *force électromotrice de polarisation*. La lame qui servait d'électrode positive devient le pôle positif de l'élément. Le courant s'affaiblit rapidement et cesse quand les lames ayant repris leur état primitif sont, par suite, revenues au même potentiel.

Toute lame qui a servi d'électrode ou a été simplement plongée dans un gaz, mise dans l'eau en présence d'une lame de même nature, neuve ou récemment portée au rouge, fournit une différence de potentiel et donne, par suite, lieu à un courant si le circuit est fermé. Ces phénomènes sont la base de la théorie des accumulateurs.

Si l'on abandonne simplement les lames à elles-mêmes dans le liquide, leur différence de potentiel va en s'affaiblissant peu à peu, en raison de la disparition, par diffusion, des gaz qui les recouvriraient.

Il y a donc réversibilité complète des phénomènes électro-chimiques. Formons par exemple un circuit comprenant une source d'énergie électrique, un appareil permettant de mesurer le courant et un voltamètre (fig. 61) constitué par un vase contenant de l'eau légèrement acidulée. Le fond du vase est traversé par deux électrodes en platine, dont on recouvre les extrémités au moyen de deux éprouvettes renversées, préalablement remplies d'eau.

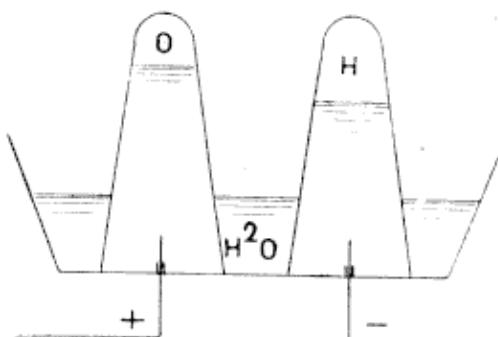


FIG. 61.

Dès que le courant passe, des bulles se dégagent sur les deux électrodes : l'oxygène à l'anode, l'hydrogène à la cathode et les deux cloches se remplissent de gaz. Le volume occupé par l'hydrogène est d'ailleurs double de celui de l'oxygène.

Les cloches étant remplies, enlevons le générateur et refermons le circuit. Nous constatons le passage d'un courant de sens inverse au premier, provoqué par la recombinaison de l'H et de l'O des éprouvettes, qui se remplissent d'eau de nouveau. Le phénomène s'arrête quand une des électrodes est complètement recouverte de liquide.

Le voltamètre est donc transformé en un appareil produisant de l'électricité par l'intermédiaire d'une réaction chimique, c'est-à-dire en un élément de pile. C'est la pile à gaz de Grove.

On remarquera, ainsi que nous l'avons dit ci-dessus, que les pôles positif et négatif sont précisément l'électrode positive et négative de l'expérience précédente, c'est-à-dire que le point à haut potentiel ne varie pas dans les deux cas.

L'expérience du voltamètre permet de s'assurer que les mêmes lois sont applicables à la combinaison comme à la dissociation électrolytique des composés.

Courants de polarisation et de diffusion. — Quand on met en communication avec deux électrodes, une source dont la force électromotrice est inférieure à celle de polarisation, on remarque la production d'un courant instantané qui détermine une polarisation égale à celle de la source. L'équilibre s'est produit et l'on ne constate plus que le passage d'un courant extrêmement faible réparant les pertes dues à la diffusion et dit pour ce motif *courant de diffusion*.

La charge instantanée, qui augmente avec la force électromotrice appliquée, est intégralement rendue dans le courant secondaire.

En employant avec M. Lippmann des électrodes de surfaces très inégales, de manière que la plus petite soit polarisée avant que l'autre ait subi une modification sensible, on constate que la charge déterminant la polarisation est la même que la plus petite électrode, la seule active, soit prise comme anode ou comme cathode ; elle se comporte, approximativement, comme un condensateur de très grande capacité. Par exemple, la capacité spécifique équivalente à celle de l'électrode en platine d'un voltamètre, serait procurée par un condensateur ayant une épaisseur plus petite qu'un millionième de millimètre.

Limite de la polarisation. — Augmentons progressivement la force électromotrice appliquée aux électrodes, la polarisation

augmente parallèlement jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur à laquelle commence normalement la décomposition électrolytique.

M. Berthelot a établi que l'électrolyse se produit dès que le minimum de l'énergie nécessaire, c'est-à-dire donnée par les quantités de chaleur à dépenser est présente, qu'il se produise ou non des réactions secondaires.

Lorsque l'électrolyte est complexe et peut donner lieu à plusieurs modes de décomposition, c'est le sel dont la dissociation met en jeu la plus faible somme d'énergie qui se décompose le premier. La force électromotrice augmentant, il en est de même pour les sels restant, la première décomposition continuant toutefois à se produire et ainsi de suite.

Cas où la polarisation est nulle. — Si le passage du courant n'altère pas la composition de l'électrolyte, la polarisation ne peut se produire. C'est le cas qui se présente quand on utilise des électrodes du même métal que le sel en solution.

Par exemple, en faisant passer le courant par l'intermédiaire d'électrodes en nickel, dans une solution de sulfate de nickel, ce métal vient s'appliquer en dépôt adhérent sur la cathode, tandis que le radical SO_4^2- , se portant sur l'anode, en dissout l'exacte quantité reçue par la cathode. C'est le principe de la galvanoplastie. La cathode pourra être constituée d'un métal quelconque qui, par l'opération précédente, se trouvera revêtu d'une couche de nickel d'autant plus épaisse que le courant aura passé pendant plus longtemps.

La polarisation sera également évitée dans le voltamètre, si l'on absorbe, au fur et à mesure de sa production, l' O_2 qui se dégage au pôle positif par un corps réducteur quelconque ; la polarisation disparaît par le fait même : il restera simplement de l' H_2 dans une des éprouvettes. On arriverait aussi au même résultat en absorbant l' H_2 seul par un corps oxydant.

Calcul de la force électromotrice de polarisation d'un électrolyte. — On peut calculer dans chaque cas, par l'application directe du principe de la conservation de l'énergie, la valeur de la force électromotrice de polarisation, d'après la quantité de chaleur que le métal libéré dégage, lorsqu'il se recombine pour former le composé de l'électrolyte primitif. Soient E la force électro-

motrice de polarisation en volts d'un électrolyte et Q le nombre de coulombs qui le traversent. Le travail électrochimique de décomposition aura pour valeur $\frac{QE}{9,81}$ kilogrammètres.

Si z est l'équivalent électrochimique du métal libéré, le poids total déposé par Q coulombs sera Qz . W étant la quantité de chaleur en calories (grammes-degrés) dégagée par un gramme du corps libéré par l'électrolyte, pour repasser à l'état de la combinaison chimique de l'électrolyte, la chaleur dégagée par le poids Qz du métal sera égale à QzW ; et comme l'équivalent mécanique de la chaleur est 0,425 kilogrammètre par calorie (gramme-degré), la chaleur dégagée exprimée en kilogrammètres aura pour valeur $0,425 QzW$.

Cette chaleur doit correspondre à celle écrite ci-dessus, de sorte que l'on a

$$\frac{QE}{9,81} = 0,425 QzW, \text{ d'où } E = 4,17 zW.$$

Mais $z = 1,037 \cdot 10^{-5} b$ grammes, comme nous l'avons indiqué plus haut, donc

$$E = 4,17 \cdot 1,037 \cdot 10^{-5} bW = 0,000 0432 bW.$$

Enfin bW est la chaleur dégagée par *un équivalent chimique exprimé en grammes* du métal dont il s'agit. Nous l'indiquerons par W_b et il viendra :

$$E = 0,0432 W_b 10^{-3} \text{ volts}$$

Si la chaleur développée par l'équivalent en grammes est exprimée en calories kilogrammes-degrés,

$$E = 0,0432 W_b \text{ volts.}$$

Lorsque l'électrolyte est le siège d'une seconde réaction *exothermique*, celle-ci agit dans le même sens que le courant et diminue la force électromotrice nécessaire pour la décomposition qui devient

$$E' = 0,0432 (W_b - W'_b) \text{ volts,}$$

W'_b se rapportant à la seconde réaction.

REMARQUE. — Ces formules, établies par lord Kelvin, ne fournissent des chiffres exacts que pour quelques électrolytes. Généralement, les résultats du calcul sont supérieurs à ceux

que l'on trouve expérimentalement. Helmholtz a établi qu'il y a lieu d'ajouter un terme correctif $T \frac{dE}{dT}$, T étant la température absolue de l'électrolyte et dE la variation positive ou négative de force électromotrice, correspondant à une variation élémentaire dT . Ce terme correctif paraît se rapporter aux effets Peltier se produisant au contact des métaux avec le liquide des solutions, effets qui ajoutent ou retranchent de l'énergie calorifique à l'électrolyte, suivant le sens du courant. La formule exacte est donc

$$E = 0,043 \text{ W}_b + T \frac{dE}{dT}.$$

Quoi qu'il en soit, nous nous en tiendrons à la formule de Kelvin dans les calculs qui suivent, mais en ne la considérant que comme une première approximation.

APPLICATIONS. — I. *Calculer la force électromotrice de décomposition de l'eau.*

On trouve dans les tables, que 2 grammes d'H se combinant avec 16 d'O, dégagent 68,36 calories (kg-degrés). Donc l'équivalent, 1 gramme d'H dégagera 34,18 et la force électromotrice de décomposition minimum sera

$$E = 0,0432 \cdot 34,18 = 1,48 \text{ V.}$$

II. *Quelle est la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer 10 grammes de chlorure de sodium ?*

La masse moléculaire du chlorure de sodium est $23 + 35,5 = 58,5$ et une seule valence est rompue. Un coulomb décomposera un poids $1,037 \cdot 58,5 \cdot 10^{-5} = 0,0006$ gramme, et pour décomposer 10 grammes, il faudra

$$\frac{10}{0,0006} = 16\,667 \text{ coulombs ou } \frac{16\,667}{3\,600} = 4,63 \text{ ampères-heures.}$$

Tension de dissolution électrolytique. — La théorie des ions permet d'envisager sous un jour extrêmement curieux, les phénomènes dont la pile est le siège et d'établir une théorie qui rend parfaitement compte de tout ce qui s'y passe.

D'après Nernst, une lame de métal plongée dans un liquide et attaquable par celui-ci, tend à émettre des ions, de la même façon qu'un liquide tend à émettre des vapeurs en présence d'un espace non saturé. Cette action est rapidement limitée

par l'action réciproque des charges positives des ions entrés en solution et de la charge négative de la lame, sauf :

1^o Quand le liquide renferme préalablement des ions d'un métal ayant une chaleur d'ionisation moindre que celle du métal de la lame. Alors, d'après ce que nous avons vu, le métal en solution se précipite sur la lame, tandis que des ions du métal de la lame passent dans le liquide valence pour valence. La lame se trouve constamment ramenée à l'état neutre par les ions se précipitant sur elle, de sorte que l'action continue tant que la substitution n'est pas complète. C'est le phénomène bien connu de la précipitation des métaux l'un par l'autre : le cuivre par le zinc, l'argent par le cuivre, etc.

2^o Si l'on plonge dans le liquide une lame d'un métal inaltérable que l'on relie métalliquement à la lame attaquée, elle se charge négativement comme cette dernière ; les ions de la solution chargés positivement se précipitent sur elle et le phénomène continue. Un courant prend donc naissance allant dans la solution de la lame attaquée à celle qui ne l'est pas et dans le circuit extérieur, de la lame inaltérable à l'autre. Tel est le mécanisme de la pile de Volta dans la théorie des ions.

Quant à la polarisation on s'en rend aisément compte si l'on considère que les ions déposés sur les électrodes tendent, en vertu de leur tension de dissolution, à repasser à l'état d'ions dans le liquide, d'où production de la force électromotrice de polarisation.

Formule de Nernst. — Nernst applique intégralement la formule donnant le travail effectué par une molécule-gramme de gaz passant de la pression P à p , au phénomène de la dissolution, considéré comme la vaporisation en ions de l'électrode. Cette formule est

$$\mathfrak{G} = R T \log_e \frac{P}{p}$$

\mathfrak{G} représentant ici le travail effectué à l'électrode, R la constante des gaz, T la température absolue, P la tension de dissolution du métal de l'électrode et p la pression osmotique de ce même métal dans la solution.

Appelons e , la différence de potentiel entre l'électrode métallique et l'électrolyte, n étant le nombre de valences, le

travail par molécule-grammes sera $e_1 96540 n$. On pourra donc poser

$$e_1 96540 n = RT \log_e \frac{P}{p}$$

d'où

$$e_1 = \frac{RT}{96540 n} \log_e \frac{P}{p}.$$

Ceci pour une électrode. Pour les deux électrodes, c'est-à-dire pour le couple on aura, en supposant $n = n'$,

$$E = e_1 - e_2 = \frac{z RT}{n} \left[\log_e \frac{P}{p} - \log_e \frac{P'}{p'} \right] = \frac{z RT}{n} \left[\log_e \frac{P}{P'} - \log_e \frac{p}{p'} \right].$$

Cette formule se vérifie pour tous les couples voltaïques. Prenons par exemple une cuve électrolytique à anode soluble contenant du sulfate de cuivre que l'on électrolyse entre électrodes en cuivre. On aura $P = P'$, $p = p'$, $E = o$.

Si les deux lames de cuivre réunies par un fil conducteur plongent dans des solutions de concentrations différentes, on constate le passage d'un courant. Une telle pile est dite *pile de concentration*.

Dans ce cas $P = P'$.

$$E = \frac{z RT}{n} \log_e \frac{p'}{p},$$

formule montrant que la force électromotrice ne dépend que de la concentration et nullement de la nature du sel, ce que l'expérience vérifie.

Limites de l'électrolyse. — Pour dissoudre une molécule-grammes d'ions de valence n , il faut dépenser un travail $e_1 96540 n$. Le même travail sera au moins nécessaire pour la libérer. Mais comme on ne peut libérer un anion sans mettre en liberté un cathion, et qu'à la cathode nous devrons dépenser un travail électrique analogue, la force électromotrice à appliquer E' sera la somme des forces électromotrices e_1 et e_2 relatives aux deux électrodes. L'électrolyse commencera, dès que cette force électromotrice minimum sera réalisée.

Vues modernes sur l'électrolyse. Les électrons ⁽¹⁾. — La charge de l'ion monovalent peut être dénommée atome d'électricité ou électron (ion électrolytique).

Lorsque les ions arrivant sur les électrodes deviennent atomes neutres, les électrons entrent en circuit pour constituer le courant électrique. Il semble naturel de supposer que ces électrons, avant de se fondre, pour ainsi dire, en un tout homogène (l'ancien fluide électrique par exemple) conservent leur individualité ; d'autant plus que s'ils doivent voyager d'un atome à l'autre, il est vraisemblable de supposer qu'ils doivent momentanément exister isolés.

Le courant électrique, dans les conducteurs, ne serait donc qu'un mouvement d'électrons libres à travers des espaces interatomiques. Mais en outre, il faut préciser et voir si le courant consiste dans le mouvement des électrons positifs dans un sens et des électrons négatifs en sens contraire, ou bien dans le mouvement dans un sens déterminé de l'une des deux espèces d'électrons, des électrons négatifs par exemple.

C'est cette dernière opinion qui a été préférée et cela parce qu'on a des raisons de croire que, seuls, les électrons négatifs peuvent exister librement. Ce sont seulement ces derniers, à ce qu'il semble, qui se déplacent, qui se séparent de la matière pondérable ou qui s'y réunissent et qui vibrent dans les sources lumineuses. C'est ainsi que, pendant qu'un ion négatif se déposant sur l'anode cède à celle-ci l'électron négatif, un ion positif arrivant sur la cathode ne cède pas d'électron positif à cette dernière, mais en prend au contraire un négatif.

⁽¹⁾ A. RIGHI. *La Théorie moderne des phénomènes physiques.*

CHAPITRE VI.

Magnétisme.

§ I. — Généralités.

Aimants naturels. — *On appelle aimant, tout corps jouissant de la propriété d'attirer la limaille de fer.* Certains échantillons d'oxyde de fer naturel $Fe^3 O^4$ possèdent cette propriété. En les roulant dans de la limaille, celle-ci s'amassee sur eux de préférence en certains points où elle se concentre sous forme de houppes.

Aimants artificiels. — Si l'on frotte une pierre d'aimant contre un barreau d'acier, celui-ci acquiert la propriété magnétique sans affaiblissement des effets de l'aimant naturel. Des barreaux d'acier ainsi préparés s'appellent *aimants artificiels*. Les propriétés des deux espèces d'aimants sont identiques. Comme il est aisé de façonnner les aimants artificiels sous une forme facilitant l'étude de leurs effets, c'est à eux que l'on recourt toujours en pratique et on leur donne généralement la forme de barreaux allongés prismatiques ou cylindriques.

L'effet magnétique est concentré aux extrémités. — Plongeons un barreau dans de la limaille de fer, celle-ci se concentre et s'attache plus énergiquement à ses extrémités (fig. 62). On croyait anciennement que la vertu attractive se trouvait

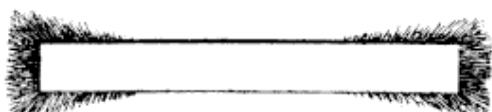


FIG. 62.

uniquement développée aux deux bouts du barreau qui seraient donc recouverts de deux couches magnétiques. En réalité il n'en est pas ainsi, comme on peut s'assurer en formant le *spectre magnétique* du barreau. Plaçons au-dessus et très près une feuille de papier, de carton, de bois, de verre, que nous saupoudrons de limailles. En secouant légèrement la feuille, nous voyons

la limaille s'arranger suivant des lignes régulières (fig. 63) partant de divers points du barreau pour aboutir en leurs points symétriques.



FIG. 63.

force tout autour du barreau et 2° que l'action se transmet intégralement à travers les substances indiquées plus haut : papier, bois, verre, etc.

La partie médiane de l'aimant, qui ne manifeste pas de propriétés magnétiques, est la *région neutre* ; la droite perpendiculaire à l'aimant menée au milieu de la région neutre est la *ligne neutre*.

Action réciproque des aimants. Pôles. — Le champ de force se décèle encore quand on approche de l'aimant suspendu un autre aimant. On remarque une attraction ou une répulsion suivant l'extrémité approchée.

La résultante des actions s'exerçant sur une extrémité polaire passe par un point appelé *pôle* de l'aimant.

Un aimant librement suspendu par son centre de gravité se dirige invariablement dans une direction déterminée approximativement nord-sud. On appelle pôle *nord* de l'aimant celui qui se dirige vers le nord ; l'autre est le pôle *sud*. La droite qui joint les deux pôles est l'*axe magnétique* du barreau, tandis que leur distance définit la *longueur vraie* de l'aimant.

En approchant deux pôles nord ou deux pôles sud l'un de l'autre, on constate qu'ils se repoussent ; un pôle nord et un pôle sud s'attirent. On en conclut que : *les pôles de mêmes noms se repoussent ; les pôles de noms contraires s'attirent*.

Intensité magnétique. — L'action constatée varie non seulement avec la distance, mais encore avec les aimants. Si la distance restant la même, l'aimant mis en présence produit une action quadruple d'un autre, on dit que son intensité ou sa masse magnétique est quatre fois plus grande.

Loi des actions magnétiques. — A l'aide d'aiguilles aimantées très longues afin de rendre négligeable l'effet des pôles

opposés, Coulomb a démontré au moyen de sa balance de torsion que *la force f qui s'exerce entre deux pôles est proportionnelle au produit de leurs masses magnétiques m et m' et inversement proportionnelle au carré de leur distance.*

$$f = \frac{m m'}{r^2}$$

D'après cela, *l'unité de pôle magnétique est le pôle qui, agissant sur un pôle égal placé à l'unité de distance, le repousse avec l'unité de force.*

Dans le système C. G. S. *l'unité de masse magnétique (ou de pôle) est celle qui, agissant sur une masse égale placée à un centimètre de distance, la repousse avec la force d'une dyne.*

On tire de l'équation précédente :

$$[m] = r \sqrt{f} = L M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1} = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}.$$

En réunissant deux pôles m et m' , leur action sur un troisième pôle est proportionnelle à $m + m'$ s'ils sont de mêmes noms et à $m - m'$ s'ils sont de noms contraires. Il y a donc lieu d'affecter les masses magnétiques d'un signe. On convient d'attribuer le signe + aux masses nord, le signe - aux masses sud.

Champ magnétique. Intensité du champ. — L'espace qui entoure un aimant ou dans lequel se trouvent distribués des aimants, constitue un *champ magnétique* caractérisé par ce fait qu'un pôle d'aimant y est soumis à une force.

La loi élémentaire régissant les actions magnétiques étant la même que celle relative aux actions électriques, tout ce que nous avons dit de celles-ci s'appliquera à celles-là. Les définitions de la force magnétique ou de l'intensité du champ en un point, du potentiel et du flux, seront les mêmes.

INTENSITÉ DU CHAMP. — On appelle donc *intensité du champ en un point, le quotient de la force exercée sur un pôle placé en ce point par la masse m de ce pôle.*

$$x = \frac{f}{m}.$$

(Pour distinguer les grandeurs magnétiques, on les représente par des majuscules rondes).

Dimensions :

$$[\mathcal{H}] = M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

UNITÉ DE CHAMP OU GAUSS. — *L'unité C. G. S. de champ, qui s'appelle gauss, est l'intensité du champ qui agit avec la force d'une dyne sur un pôle ayant l'intensité d'une unité C. G. S.*

DIRECTION DU CHAMP. — *La direction d'un champ en un point est donnée par la direction de la force agissant sur un pôle en ce point. Une ligne de force est une courbe telle que la direction du champ lui soit tangente en chaque point. Un pôle magnétique supposé libre de se mouvoir décrirait une ligne de force. On considère conventionnellement comme sens des lignes de force, le sens du déplacement d'un pôle nord. La ligne de force est donc une courbe fermée allant du pôle nord au pôle sud à l'extérieur de l'aimant et du pôle sud au pôle nord à l'intérieur. La direction des lignes de force est mise en évidence par l'orientation des grains de limaille du spectre magnétique. Leur direction est également indiquée par celle que prend une petite aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité.*

MOMENT MAGNÉTIQUE. — *Le moment magnétique d'un aimant est le produit de sa masse magnétique par la distance des pôles $Im = \mathcal{A}_o$.*

Dimensions :

$$[\mathcal{A}_o] = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

POTENTIEL MAGNÉTIQUE. — *Le potentiel en un point d'un champ situé à des distances r, r', r'', \dots des masses magnétiques m, m', m'', \dots est*

$$\mathcal{V} = \Sigma \frac{m}{r}.$$

Dimensions du potentiel magnétique

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

VALEUR DU CHAMP EN FONCTION DU POTENTIEL. — La composante de l'intensité du champ dans une direction l en un point où le potentiel est \mathcal{V} , s'exprime par

$$\mathcal{H} = - \frac{d\mathcal{V}}{dl}.$$

Le potentiel magnétique en un point d'un champ est égal au quotient du travail W nécessaire pour amener un pôle nord m de l'infini à ce point, par l'intensité du pôle

$$\mathcal{V} = \frac{W}{m}.$$

SURFACE ÉQUIPOTENTIELLE MAGNÉTIQUE. — Une *surface équipotentielle magnétique* est une surface telle que l'on puisse y déplacer un pôle sans produire de travail.

FLUX DE FORCE MAGNÉTIQUE. — Le *flux de force magnétique* à travers une surface S faisant un angle α avec une surface équipotentielle est égal au produit de la projection de S sur cette surface équipotentielle, par la valeur de \mathcal{H} de l'intensité du champ en cette dernière

$$\mathcal{N} = \mathcal{H} S \cos \alpha$$

Si $\alpha = 0$, $\mathcal{N} = \mathcal{H} S$, d'où pour les dimensions du flux

$$\mathcal{N} = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}.$$

L'unité de flux de force ou maxwell est le flux traversant une surface équipotentielle d'un centimètre carré, dans un champ uniforme d'intensité égale à un gauss.

Action d'un champ uniforme sur un aimant. — *Un champ est uniforme, quand l'intensité magnétique y est constante en grandeur et en direction.* Les surfaces équipotentielles y sont des plans parallèles équidistants. Dans un tel champ, un barreau aimanté n'est soumis à aucune force de translation. Une aiguille aimantée, ainsi qu'on s'en assure en la piquant dans un flotteur, tend simplement à s'orienter suivant la direction des lignes de force sous l'action d'un couple. De ce que l'effet se réduit à un couple, on conclut que la masse magnétique positive d'un aimant est égale à la masse négative, c'est-à-dire que *la somme des masses magnétiques d'un aimant est toujours nulle.*

Appelons α (fig. 64) l'angle que fait la direction du champ uniforme d'intensité H , avec l'axe magnétique d'un barreau aimanté d'intensité polaire m , suspendu par son centre de gravité O.

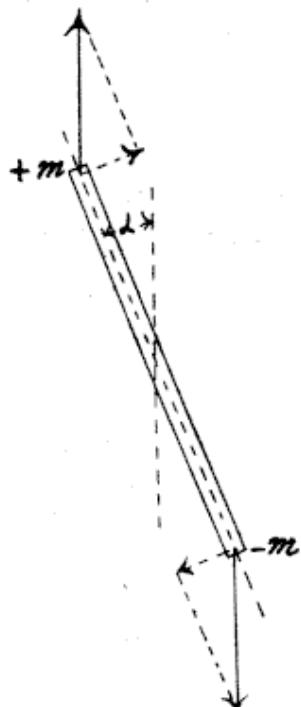


FIG. 64.

La force agissant dans la direction de H et sollicitant le pôle $+m$ est Hm . A l'autre extrémité nous trouvons la force $-Hm$ dirigée en sens inverse. En décomposant ces forces suivant des perpendiculaires à l'axe du barreau, nous obtenons à chaque extrémité les forces $Hm \sin \alpha$, d'où le couple $Hml \sin \alpha = H \lambda \sin \alpha$.

La durée d'une oscillation double de faible amplitude du barreau sera :

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{\Omega}{c}}$$

Ω étant le moment d'inertie du barreau et c le couple maximum qui le sollicite égal à $H \lambda$.

Champ magnétique terrestre. — L'expérience montre que dans les limites d'une salle d'expérience, l'aiguille aimantée suspendue reste parallèle à elle-même et sa durée d'oscillation constante, à condition qu'il n'y ait aucune masse magnétique à proximité. On en conclut que la terre développe un champ magnétique uniforme dans un espace peu étendu. Les lignes de force entrent par la pointe sud de l'aiguille, suivent celle-ci et sortent par sa pointe nord.

Le *méridien magnétique* d'un lieu est le plan vertical mené suivant la direction du champ terrestre, c'est-à-dire suivant la direction de l'axe magnétique d'une aiguille aimantée librement suspendue. Le méridien magnétique est repéré, relativement au méridien géographique, par l'angle appelé *déclinaison* que ces deux plans font entre eux. L'*inclinaison* est l'angle que fait l'axe magnétique de l'aimant avec l'*horizontale* du lieu. Le pôle nord des aimants plonge sous l'*horizon*, dans notre hémisphère, de sorte qu'il faut alourdir le pôle sud pour que l'aiguille se tienne dans un plan horizontal. La composante de l'intensité du champ dans ce plan, s'appelle la *composante horizontale*. Les lignes de force terrestres ne peuvent être

considérées comme parallèles que dans des limites peu étendues. En réalité elles convergent vers deux points appelés *pôles magnétiques terrestres* qui oscillent aux environs des pôles géographiques.

Le champ terrestre est faible. Au 1^{er} janvier 1900 la composante horizontale était au parc St-Maur à Paris de 0,19711 et la composante verticale de 0,42117, l'intensité totale 0,46501.

A la même date et au même endroit on relevait pour la déclinaison occidentale $14^{\circ} 47',56$ et pour l'inclinaison $64^{\circ} 55',2$.

Aimantation par influence. — Certains corps placés dans un champ magnétique, le fer doux par exemple, acquièrent temporairement la propriété magnétique. Les lignes de force viennent s'y concentrer (fig. 65). Leur point d'entrée est un pôle sud, leur point de sortie un pôle nord.

On comprend dès lors comment se forme le spectre magnétique. Sous l'influence du champ, tous les grains de limaille deviennent de petits aimants se dirigeant dans la direction des lignes de force.

De même un aimant attire un morceau de fer doux, par suite de l'aimantation qu'il provoque dans celui-ci.

Les deux corps, influençant et influencé, se touchent toujours par des pôles de noms contraires.

Magnétisme rémanent. — L'aimantation par influence développée dans le fer doux est très énergique, mais peu stable. Elle disparaît sous l'action du moindre choc, dès que l'influence a cessé. Avec la fonte ou mieux l'acier, particulièrement avec l'acier trempé, l'aimantation que l'on obtient dans les mêmes conditions est moins forte, mais beaucoup plus stable. Elle se maintient après la suppression de l'influence et c'est ce qui permet d'obtenir des aimants artificiels. On l'appelle *magnétisme rémanent* et l'on désigne sous le nom de *force coercitive*, l'action qui tend à maintenir le magnétisme rémanent.

Aimants brisés. — Rompons en deux parties égales ou inégales un aimant, par exemple une aiguille d'acier. Nous obtenons deux aimants ayant leurs deux pôles de mêmes intensités, de signes contraires, orientés comme dans l'aimant primitif. Rompons ces deux aimants nous en obtenons quatre



FIG. 65.

et ainsi de suite. Aussi loin que nous pouvons pousser la subdivision, nous observons la même chose.

Il en résulte : 1^o qu'il est impossible d'isoler une masse magnétique soit positive, soit négative; elle sera toujours accompagnée d'une masse égale de signe contraire; 2^o que le magnétisme doit être considéré comme un phénomène moléculaire. 

Hypothèse de Weber. — D'après Weber, un corps magnétique à l'état neutre est constitué de molécules aimantées orientées dans toutes les directions et dont les pôles en regard se neutralisent réciproquement. Quand le corps est amené dans un champ, les axes magnétiques des molécules tendent à s'orienter dans la direction du champ. Les pôles contraires en regard se neutralisent; aux extrémités seulement apparaissent des pôles libres. La force coercitive représenterait la résistance opposée par les molécules à tout changement magnétique.

L'hypothèse de Weber est corroborée par un certain nombre de faits parmi lesquels : 1^o A mesure que le champ auquel est soumis le corps magnétique devient plus intense, l'aimantation tend vers un maximum, vers la *saturation*; 2^o toute cause d'ébranlement moléculaire, aussi bien calorifique que mécanique, favorise l'aimantation pendant le phénomène d'influence et la désaimantation après que l'influence a cessé; 3^o soumis à une influence magnétique croissante, un aimant s'allonge d'abord faiblement, puis se raccourcit, comme si après s'être orientées, les molécules tendaient à se rapprocher, etc.

Corps magnétiques et diamagnétiques. — Jusqu'ici nous n'avons parlé que du fer et de ses dérivés, comme pouvant manifester les propriétés magnétiques. Il en existe d'autres tels que le nickel et le cobalt, quelques composés de fer, l'oxyde magnétique (pierre d'aimant) le perchlorure de fer, le sulfate de fer, solides ou en dissolution. Mais les propriétés magnétiques qu'ils peuvent développer dans les conditions ordinaires sont très faibles. Ils se subdivisent en deux catégories bien distinctes : 1^o Les corps *magnétiques* se comportant comme le fer (fig. 66 Fe) et ayant leur axe d'aimantation parallèle aux lignes de force; 2^o les corps *diamagnétiques* comme le bismuth,

qui prennent une aimantation inverse, en sens contraire des lignes de force (fig. 66 Bi) ; ils paraissent repoussés par les pôles.

En plaçant une solution de sulfate de fer, substance magnétique, dans un verre de montre au-dessus des pôles d'un aimant, on constate la formation d'une cavité au centre, (fig. 67) par suite de l'attraction que subit le liquide de la part des pôles. Au contraire s'il s'agit de bisulfure de carbone, corps diamagnétique, celui-ci repoussé, forme une protubérance au centre.

D'après Becquerel et Faraday, de même que les corps plongés dans un liquide d'une densité supérieure à la leur, semblent repoussés par la terre bien que continuant à être attirés par elle, il se pourrait que la répulsion des corps diamagnétiques soit due au fait qu'ils seraient moins magnétiques que le milieu ambiant.

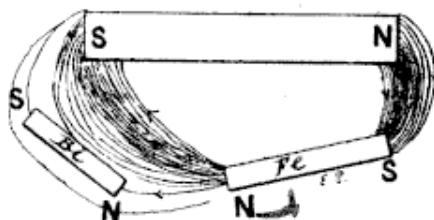


FIG. 66.

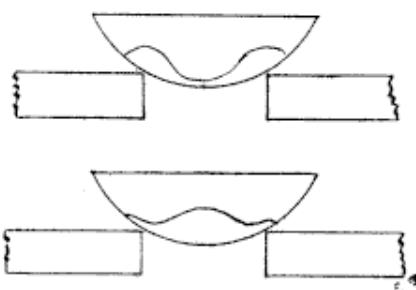


FIG. 67.

§ 2. — Étude théorique des aimants.

Aimant élémentaire. — L'hypothèse de Weber conduit à considérer des aimants *de forme cylindrique, de longueur infiniment petite par rapport aux dimensions finies du champ et dont les pôles sont concentrés sur les faces extrêmes*.

L'intensité d'aimantation d'un aimant élémentaire est le rapport de son moment magnétique à son volume. C'est donc le moment par unité de volume. $\mathcal{J} = \frac{M}{V}$.

Dimensions :

$$[\mathcal{J}] = \frac{M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{5}{2}} T^{-1}}{L^3} = M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

La densité des pôles est le rapport de leur masse magnétique à leur surface. $\sigma = \frac{m}{s}$. En multipliant haut et bas par l , on voit que $\sigma = \mathcal{J}$, c'est-à-dire que la densité et l'intensité d'aimantation sont numériquement identiques et possèdent les mêmes dimensions.

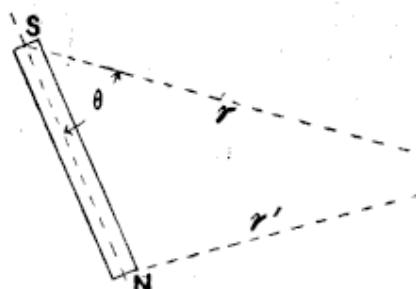


FIG. 68.

Potentiel dû à un aimant élémentaire. — Considérons un point P (fig. 68), situé aux distances r et r' des pôles d'un aimant élémentaire NS.

Le potentiel magnétique en P

$$\mathcal{V} = \Sigma \frac{m}{r} = \frac{m}{r'} - \frac{m}{r} = \frac{m(r - r')}{rr'}.$$

La longueur de l'aimant étant infiniment petite r et r' se confondent et $r = r' + l \cos \theta$, θ étant l'angle de la droite joignant l'aimant au point,

$$\text{Donc } \mathcal{V} = \frac{m l \cos \theta}{r^2} = \frac{m \cos \theta}{r^2}$$

Filet magnétique ou solénoïdal. — Supposons une série d'aimants élémentaires identiques placés bout à bout, le pôle nord de chacun étant en contact avec le pôle sud suivant qu'il neutralise et ainsi de suite. Un tel système s'appelle *filet magnétique ou solénoïdal*. Le filet est neutre dans toute sa longueur, sauf aux extrémités où nous trouvons les masses $+m$ et $-m$.

Le potentiel en un point P situé aux distances r et r' de celles-ci sera :

$$\mathcal{V} = m \left(\frac{1}{r'} - \frac{1}{r} \right)$$

expression ne dépendant que de la position des extrémités et non de la forme du filet.

Fermons maintenant le filet en rejoignant ses deux extrémités, les pôles extrêmes se neutralisent et l'action devient nulle,

$$\text{Si nous posons } \mathcal{V} = m \left(\frac{I}{r} - \frac{I}{r} \right) = c^{\text{te}}$$

et donnons une valeur déterminée au second membre, tous les points satisfaisant à cette équation auront même potentiel, c'est-à-dire seront situés sur des surfaces équipotentielles. On tracerait celles-ci pour diverses valeurs du potentiel, de la même manière qu'en électrostatique pour les masses électriques.

Feuillet magnétique. — Accolons l'un à l'autre des aimants élémentaires identiques de longueur ε , dirigés dans le même sens. Nous formons ainsi une lame de forme quelconque, d'épaisseur infiniment mince, recouverte sur les deux faces de couches magnétiques de même intensité σ et de polarités opposées, portant le nom de *feuillet magnétique*. *Le moment du feuillet par unité de surface* $\varepsilon \sigma = \mathfrak{S}$ *exprime sa puissance*.

$$[\mathfrak{S}] = L \times M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1} = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}$$

Potentiel dû à un feuillet. — Considérons un feuillet courbe (fig. 69) dont la face positive est concave et cherchons quelle est la valeur du potentiel en un point P situé en face de cette concavité. C'est la somme des potentiels dus aux aimants élémentaires constituant le feuillet. L'élément de section ds situé en A, dont l'axe fait l'angle θ avec la droite menée au point P fournit un potentiel :

$$d\mathcal{V} = \frac{\sigma ds \varepsilon \cos \theta}{r^2} = \sigma \varepsilon d\omega$$

puisque $\frac{ds \cos \theta}{r^2}$ représente l'angle solide sous lequel on voit la surface ds du point P.

Pour tout le feuillet nous aurons $\mathcal{V} = \mathfrak{S}\omega$, ω étant l'angle solide sous lequel on voit du point P le *contour* du feuillet, car les cônes élémentaires rencontrant deux fois le feuillet donnent

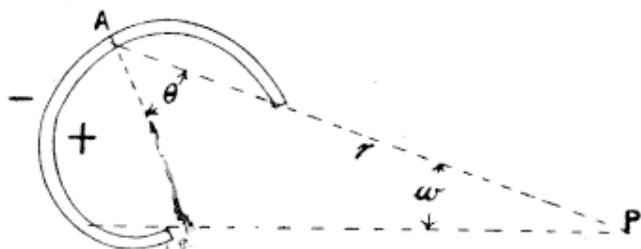


FIG. 69.

un potentiel nul, puisqu'il résulte de la somme de deux potentiels égaux et contraires.

Si le point P se trouve en regard de la face négative du feuillet, le potentiel devient $\mathcal{V} = -\mathfrak{J}\omega$. En effet, une masse positive unité étant attirée par cette face, le travail effectué pour l'amener des limites du champ au point considéré devient négatif.

Diminuons l'ouverture du feuillet jusqu'à la rendre nulle. Son contour n'existant plus, l'angle solide devient nul pour tout point extérieur et égal à 4π pour tout point intérieur. Dans les deux cas la force est nulle puisque $\mathcal{K} = -\frac{d\mathcal{V}}{dn}$ et l'action d'un feuillet formant une surface fermée est toujours nulle.

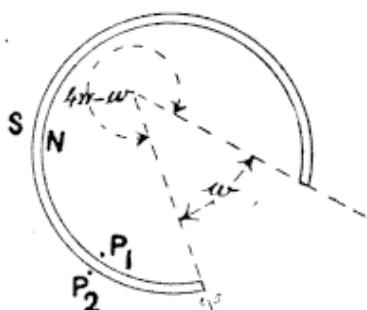


FIG. 70.

Considérons maintenant un point situé à l'intérieur de l'espace entouré par un feuillet courbe (fig. 70). L'angle sous lequel sera vu celui-ci jusqu'aux limites de son ouverture sera $4\pi - \omega$. Pour deux points P_1, P_2 , pris sur une même normale, infiniment près de la surface, l'angle solide ω' sous lequel on voit l'ouverture étant le même, le potentiel en P_1 sera

$$+\mathfrak{J}(4\pi - \omega') \text{ et } -\mathfrak{J}\omega' \text{ en } P_2.$$

Entre P_2 , position de départ, et P_1 , position d'arrivée, la différence de potentiel est par conséquent (ce qui existe en P_1 — ce qui existait en P_2)

$$\mathfrak{J}(4\pi - \omega) + \mathfrak{J}\omega' = 4\pi \mathfrak{J}.$$

Done, quand on passe d'un point de la face négative au point correspondant de la face positive, le potentiel augmente de $4\pi \mathfrak{J}$ quel que soit le trajet effectué.

Energie d'un feuillet dans un champ. — Soit un flux de force dû à un pôle m (fig. 71) situé en regard de la face positive d'un feuillet. D'après ce que nous avons vu, le potentiel en m égal à $+\mathfrak{J}\omega$, correspond

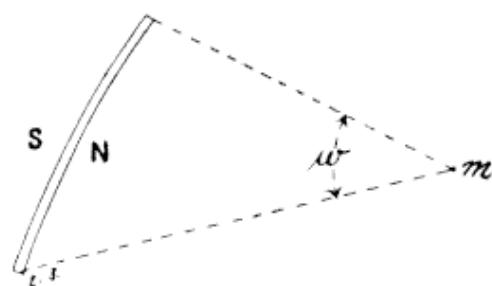


FIG. 71.

au travail dépensé pour amener l'unité positive de magnétisme des limites du champ au point m . Pour y amener la masse m il faudra dépenser un travail m fois plus grand, qui représentera l'énergie relative du feuillet et du pôle

$$W = m \mathfrak{F} \omega.$$

Mais nous avons vu (théorème de Gauss) que $m\omega$ est le flux de force émanant de la masse m concentrée au point m , compris dans le cône d'ouverture ω . Appelons-le \mathfrak{N} nous aurons

$$W = \mathfrak{F} \mathfrak{N}.$$

Si le pôle est situé du côté de la face sud, l'énergie potentielle

$$W = - \mathfrak{F} \mathfrak{N}.$$

Au cas où le flux résulte de la présence de diverses masses magnétiques m, m', m'', \dots l'énergie totale a pour expression

$$W = \pm \mathfrak{F} \Sigma m \omega = \pm \mathfrak{F} \mathfrak{N}.$$

L'énergie relative d'un feuillet et d'un flux s'évalue par le produit de la puissance du feuillet par le flux traversant le contour de celui-ci. Le signe est celui de la face par laquelle entrent les lignes de force. Si le flux est dû à un champ magnétique \mathcal{H} , l'énergie relative s'exprime par $\mathfrak{F} \mathcal{H} S$, la surface S étant limitée par le contour de l'ouverture d'entrée des lignes de force. Un feuillet libre de se mouvoir dans un champ tendra à rendre minimum l'énergie potentielle qu'il possède par rapport au champ, c'est-à-dire à embrasser un flux maximum par sa face négative. Dans le cas d'un feuillet et d'un pôle positif libre de se mouvoir, la position stable sera atteinte quand le pôle est appliqué sur la face négative. Inversement si le pôle est négatif, sa position stable sera sur la face positive du feuillet. Un feuillet magnétique pouvant se déplacer autour d'un axe horizontal perpendiculaire au méridien magnétique tournera jusqu'à ce que sa face négative dirigée vers le sud soit perpendiculaire aux lignes de force terrestres.

Energie relative de deux feuillets. — Soient deux feuillets voisins de puissances \mathfrak{F} et \mathfrak{F}' . Du feuillet \mathfrak{F}' émane un flux \mathfrak{N}'

traversant le feuillet \mathfrak{F} , tandis que le feuillet \mathfrak{F}' envoie un flux \mathfrak{M} à travers le contour de \mathfrak{F}' (fig. 72).

Si des pôles de noms contraires sont en regard, l'énergie du feuillet \mathfrak{F} par rapport à \mathfrak{F}' est

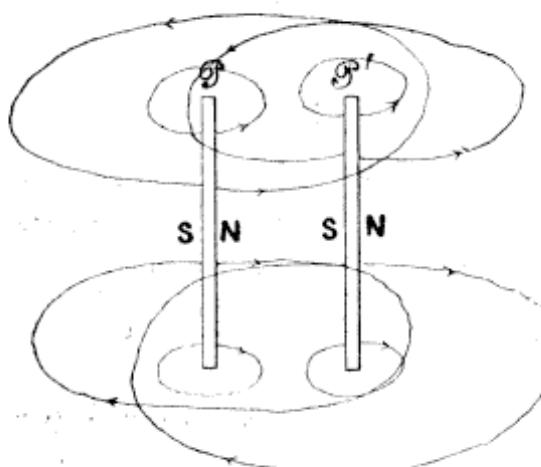


FIG. 72.

$$W = -\mathfrak{F}\mathfrak{M}' = -\mathfrak{F}\mathfrak{F}'\mathfrak{M}'$$

puisque le flux \mathfrak{M}' peut être exprimé par la relation $\mathfrak{M}' = \mathfrak{F}'\mathfrak{M}$. Telle est l'énergie de \mathfrak{F} par rapport à \mathfrak{F}' , c'est-à-dire le travail nécessaire pour amener \mathfrak{F} des limites du champ à la position qu'il occupe.

De même l'énergie de \mathfrak{F}' par rapport à \mathfrak{F} est :

$$W = -\mathfrak{F}'\mathfrak{M} = -\mathfrak{F}'\mathfrak{F}\mathfrak{M}$$

La puissance à dépenser pour amener un feuillet en face de l'autre, étant évidemment la même que l'on déplace l'un ou l'autre de ceux-ci

$$\mathfrak{F}\mathfrak{F}'\mathfrak{M}' = \mathfrak{F}'\mathfrak{F}\mathfrak{M}$$

d'où $\mathfrak{M}' = \mathfrak{M}$ et par conséquent : $\mathfrak{M}' = \frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{F}} = \frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{F}'}$. Le facteur \mathfrak{M} , dit *coefficient d'induction mutuelle* des deux feuillets, représente donc le rapport à sa puissance, du flux qu'un des feuillets envoie à travers l'autre.

Dimensions :

$$[\mathfrak{M}] = \frac{[\mathfrak{M}]}{[\mathfrak{F}]} = \frac{\left[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1} \right]}{\left[M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1} \right]} = [L].$$

CAS DE n FEUILLETS. — Dans le cas de deux feuillets on peut admettre que chaque feuillet contribue autant que l'autre au développement de l'énergie potentielle, de sorte que la part qui lui est attribuable est

$$-\frac{1}{2} \mathfrak{F}\mathfrak{F}'\mathfrak{M}.$$

S'il existe une série de feuillets en présence, l'énergie potentielle totale du feuillet considéré sera

$$\frac{1}{2} \mathcal{J} (\mathcal{S}_1 \mathcal{M}_1 + \mathcal{S}_2 \mathcal{M}_2 + \dots)$$

Aimant uniforme. — Juxtaposons l'un contre l'autre un certain nombre de filets solénoïdaux rectilignes d'égale intensité d'aimantation. Nous formerons un aimant cylindrique présentant à ses extrémités deux couches magnétiques d'intensité d'aimantation \mathcal{J} égales et de signes contraires.

Nous obtiendrons encore le même résultat en empilant l'un sur l'autre par leurs pôles de noms contraires, des feuillets magnétiques circulaires de mêmes puissances.

Nous avons vu en électrostatique que l'action d'un disque infiniment mince chargé à la densité σ , sur un point situé sur son axe est $2\pi\sigma(1 - \cos \alpha)$, α (fig. 73), étant l'angle plan sous lequel on voit le rayon du disque du point considéré.

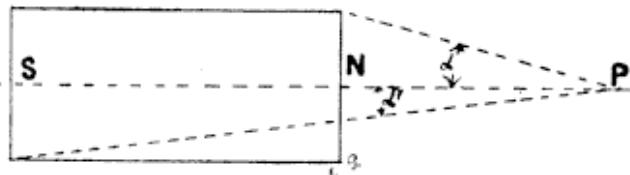


FIG. 73.

L'action au point P due aux deux couches d'intensité \mathcal{J} et $-\mathcal{J}$ sera par conséquent

$$\mathcal{K} = 2\pi\mathcal{J}(1 - \cos \alpha) - 2\pi\mathcal{J}(1 - \cos \alpha') = 2\pi\mathcal{J}(\cos \alpha' - \cos \alpha)$$

α et α' étant les angles plans sous lesquels on voit, du point P, les rayons des deux bases.

Cette expression se transforme aisément en remarquant que $2\pi(1 - \cos \alpha)$ et $2\pi(1 - \cos \alpha')$ représentent les angles solides sous lesquels on voit les deux bases du point P, d'où

$$\mathcal{K} = \mathcal{J}(\omega - \omega'), \text{ puisque } \sigma = \mathcal{J}.$$

On en conclut que l'intensité du champ en un point extérieur de l'axe, regardant la face positive, est égale à la densité superficielle multipliée par la différence des angles solides sous lesquels on voit, du point P, les deux faces de l'aimant.

Si c'est la face négative qui se trouve la plus rapprochée de P, l'expression devient

$$\mathcal{K} = -\mathcal{J}(\omega - \omega').$$

Induction magnétique. — Un aimant envoie autour de lui, dans l'air ambiant, un flux magnétique. Ce flux sort de la région positive de l'aimant, arrive à la région négative et traverse l'aimant en allant du sud au nord à l'intérieur de celui-ci.

On appelle *induction* en un point, le flux par unité de surface en ce point. Elle se représente par un vecteur, c'est-à-dire par une quantité ayant en chaque point une grandeur et une direction déterminée. Quand l'aimant est uniforme, cette grandeur et cette direction restent constantes.

Appelons \mathcal{B} l'induction, \mathcal{N} le flux émanant de l'aimant, S sa section droite, f la force normale à cette section, comptée positivement dans le sens de l'aimantation, σ la densité magnétique. Appliquons le théorème de Gauss à la surface limitée par la région positive et le plan neutre normal à l'axe. Nous aurons :

$$\mathcal{N} - Sf = 4\pi S\sigma$$

d'où

$$\mathcal{B} = \frac{\mathcal{N}}{S} = f + 4\pi \sigma \text{ puisque } \mathcal{N} = S\sigma.$$

Au cas où il y aurait d'autres forces, dues à des masses extérieures s'ajoutant à f , de manière à donner une résultante \mathcal{R} , on aurait

$$\mathcal{B} = \mathcal{R} + 4\pi \sigma.$$

Force magnétique dans une cavité. — Pratiquons une fente infiniment étroite, normale à l'axe de l'aimant. Les deux faces en présence se recouvriront de couches de densités $+\sigma$ et $-\sigma$ qui exercent sur une masse positive égale à l'unité, placée entre elles, une action $4\pi\sigma$ dirigée dans le sens de l'aimantation. Si \mathcal{R} est la résultante des actions extérieures supposées dirigées dans le même sens, l'action totale est $\mathcal{R} + 4\pi\sigma$ ou $\mathcal{R} + 4\pi\sigma$, c'est-à-dire \mathcal{B} . *L'induction magnétique correspond donc à la force agissant sur l'unité de masse dans une cavité infiniment mince normale à l'aimantation.*

Caractéristiques d'un aimant. — Un aimant est complètement défini par son moment et le flux qu'il émet. On mesure ce dernier par les phénomènes d'induction qu'il produit et que nous étudierons plus loin. Quant à son moment, il se détermine aisément.

Détermination du moment magnétique d'un aimant. — Pour des amplitudes suffisamment faibles, un barreau suspendu par un fil sans réaction de torsion sensible, oscillant horizontalement dans le champ magnétique terrestre, effectue une oscillation double pendant un temps :

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{\Omega}{\mathcal{A} \mathcal{M}}}$$

Ω étant le moment d'inertie du barreau, \mathcal{A} son moment magnétique et \mathcal{M} la composante magnétique horizontale terrestre,

On en tire $\mathcal{A} \mathcal{M} = \frac{4\pi^2 \Omega}{t^2}$ (1)

de sorte que si l'on connaît \mathcal{M} , l'équation (1) permet de tirer la valeur de \mathcal{A} .



Magnétomètre. — On pourra déterminer \mathcal{M} en faisant une seconde expérience et s'aidant d'un magnétomètre, appareil comportant simplement une aiguille aimantée de petites dimensions, suspendue au moyen d'un fil sans réaction sensible de torsion.

On place l'aimant dans un plan horizontal, perpendiculairement au méridien magnétique et l'aiguille du magnétomètre à une certaine distance, dans le prolongement de son axe (fig. 74).

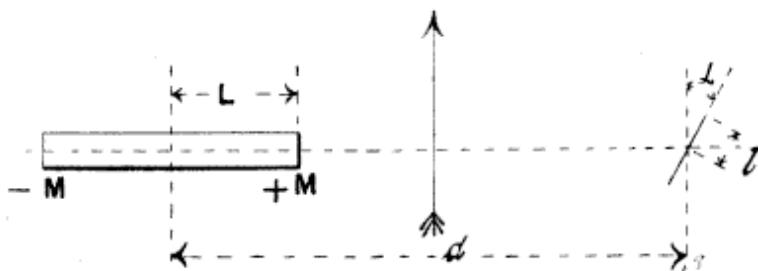


FIG. 74.

ment au méridien magnétique et l'aiguille du magnétomètre à une certaine distance, dans le prolongement de son axe (fig. 74).

Appelons $2L$ la distance polaire de l'aimant, $2l$ celle de l'aiguille, d la distance du centre de l'aimant à celui de l'aiguille, $+M$, $-M$ les pôles de l'aimant dont le moment magnétique $\mathcal{A} = 2M L$, $+m$, $-m$ ceux de l'aiguille aimantée dont le moment $a = 2m l$.

Sous l'influence de l'action normale de l'aimant, l'aiguille dévie d'un angle z par rapport au méridien magnétique et se met en équilibre sous la double action qui la sollicite. Le couple terrestre est $c = a \mathcal{M} \sin z$.

Les dimensions de l'aiguille étant réduites, on peut admettre que les forces exercées sur les pôles de l'aimant sont égales et parallèles. Dans ces conditions le champ dû au barreau au centre de l'aiguille a pour valeur

$$\mathcal{A}' = \frac{M}{(d-L)^2} - \frac{M}{(d+L)^2} = \frac{4M d L}{(d^2 - L^2)^2} = \frac{2 \mathcal{A} d}{(d^2 - L^2)^2}$$

Il produit un couple déviant :

$$c' = a \mathcal{H}' \cos \alpha = \frac{2 a \mathcal{A} d \cos \alpha}{(d^2 - L^2)^2}$$

Quand l'équilibre est établi, le couple déviant c' est égal au couple directeur c ce qui donne :

$$c \mathcal{H} \sin \alpha = \frac{2 a \mathcal{A} d \cos \alpha}{(d^2 - L^2)^2}$$

$$\text{d'où} \quad \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{H}} \left(1 - \frac{L^2}{d^2} \right)^{-2} = \frac{d^3 \operatorname{tg} \alpha}{2}$$

En remplaçant $\left(1 - \frac{L^2}{d^2} \right)^{-2}$ par son développement $1 + \frac{2 L^2}{d^2} + \frac{3 L^4}{d^4} + \dots$ et négligeant les puissances supérieures à la seconde, vu la petitesse de d vis-à-vis de L il vient :

$$\frac{\mathcal{A}}{\mathcal{H}} \left(1 + \frac{2 L^2}{d^2} \right) = \frac{d^3 \operatorname{tg} \alpha}{2} \quad (2)$$

La distance $2 L$ des pôles étant en général inconnue, on l'élimine en procédant à une nouvelle expérience de déviation, pour une distance d' donnant un écart α' tel que

$$\frac{\mathcal{A}}{\mathcal{H}} \left(1 + \frac{2 L^2}{d'^2} \right) = \frac{d'^3 \operatorname{tg} \alpha'}{2} \quad (3)$$

Multipiant (2) par d^2 et (3) par d'^2 puis soustrayant on obtient :

$$\frac{\mathcal{A}}{\mathcal{H}} = \frac{d^5 \operatorname{tg} \alpha - d'^5 \operatorname{tg} \alpha'}{2(d^2 - d'^2)} \quad (4)$$

Les équations (1) et (4) permettent de déterminer les deux inconnues \mathcal{A} et \mathcal{H} .

§ 3. — Aimantation par influence.

Force magnétisante. — Plongé dans un champ magnétique, un corps magnétique s'aimante. La *force magnétisante* à laquelle il est soumis, que nous avons désignée par \mathcal{H} , est la résultante de l'action du champ et des couches superficielles qu'il acquiert du fait de son aimantation. L'aimantation est *uniforme, quand la force magnétisante est partout constante en grandeur et en direction.*

Coefficient d'aimantation ou de susceptibilité magnétique. — L'aimantation se caractérise par l'intensité d'aimantation \mathfrak{I} que peut acquérir un corps sous l'effet d'une force magnétisante \mathcal{H} donnée. La *susceptibilité magnétique* du corps ou son *coefficient d'aimantation* est le rapport de l'intensité d'aimantation à la force magnétisante qui la produit :

$$\chi = \frac{\mathfrak{I}}{\mathcal{H}}$$

$$\text{Dimensions } [\chi] = \left[\frac{M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}}{M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}} \right] = 1. \quad \chi \text{ est donc un}$$

simple facteur numérique.

Le coefficient χ est positif pour les corps magnétiques et négatif pour les diamagnétiques, puisque pour ceux-ci l'aimantation est renversée. En outre, on peut le considérer comme constant pour ces derniers et les corps peu magnétiques, tandis qu'il est une fonction très complexe pour les autres.

Force démagnétisante. — Les pôles libres de densité $\sigma = \mathfrak{I}$ développés aux extrémités du corps aimanté ont un effet inverse à celui du champ magnétisant; ils exercent sur les molécules du corps aimanté une véritable *force démagnétisante*. Cette action n'existe pas dans les cas spéciaux d'un tore et d'un cylindre indéfini.

Cas où l'intensité d'aimantation est constante. — TORE. Quand un tore de révolution est soumis à des forces magnétisantes constantes dirigées suivant la tangente au cercle

parallèle passant en chaque point, son aimantation est constante; aucun pôle libre n'apparaît, puisqu'il est constitué en somme par la juxtaposition de filets solénoïdaux fermés, de sorte que le champ \mathcal{H} auquel il est soumis ne subit aucune modification. Lorsque le champ \mathcal{H} disparaît, le noyau annulaire conserve la plus grande partie de son magnétisme, vu l'absence de force démagnétisante.

CYLINDE. — On observerait les mêmes résultats avec un cylindre infiniment long disposé parallèlement aux lignes de force d'un champ uniforme. Dans un cylindre fini, l'influence démagnétisante des pôles se fait sentir, mais d'autant moins que le cylindre est plus long. On peut la considérer comme négligeable, dès que la longueur du cylindre atteint 4 à 500 fois son diamètre.

Force portante d'un aimant. — **AIMANT ISOLÉ.** Si nous pratiquons une fente normale infiniment mince dans un cylindre indéfini aimanté parallèlement à son axe, les parois opposées se recouvriront de couches magnétiques de densité $\sigma = \mathcal{J}$ et la force avec laquelle la masse $-\sigma$ existant sur l'unité de surface de la face négative attire l'unité de masse positive située en face est comme nous l'avons vu $2\pi\sigma$. Sur l'unité de surface opposée, couverte de la masse $+\sigma$ l'effet attractif sera $2\pi\sigma^2 = 2\pi\mathcal{J}^2$ et pour la section entière on aura $2\pi\mathcal{J}^2 S$.

C'est la force portante de l'aimant, que l'on peut déterminer expérimentalement en tirant l'un des tronçons du cylindre avec une force croissant jusqu'à l'arrachement. S'il faut tirer avec une force de p grammes pour produire le sectionnement on aura

$$2\pi\mathcal{J}^2 S = 981 p$$

d'où

$$\mathcal{J} = \sqrt{\frac{981 p}{2\pi S}}.$$

AIMANT DANS UN CHAMP. — Si le cylindre considéré se trouve soumis à l'influence d'un champ d'intensité \mathcal{H} , celui-ci exercera sur la masse positive $+S\sigma$, une force $+\mathcal{H}S\sigma$ dirigée en sens inverse de l'arrachement, de sorte que la force totale nécessaire pour obtenir celui-ci s'élèvera à

$$\mathcal{H}S\mathcal{J} + 2\pi\mathcal{J}^2 S = (\mathcal{H} + 2\pi\mathcal{J})\mathcal{J}S.$$

Perméabilité magnétique. — Considérons dans un champ uniforme d'intensité \mathcal{H} gauss, c'est-à-dire dans lequel le flux par unité de surface équipotentielle est \mathcal{H} , ou encore dans lequel la force agissant sur l'unité de masse positive est \mathcal{H} dynes, un barreau indéfini parallèle à la direction du champ. L'espace occupé par le cylindre, devient le siège d'un flux d'induction \mathfrak{B} par unité de surface différent de \mathcal{H} , ou encore l'unité positive de masse magnétique y est sollicitée par une force \mathfrak{B} et le rapport

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathcal{H}}$$

est la *perméabilité* du corps constituant le barreau.

D'après cette définition la perméabilité de l'air est prise pour unité, puisque pour celui-ci

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathcal{H}} = 1.$$

Le vide possède sensiblement la même perméabilité:

Le coefficient de perméabilité *dépend du corps constituant le noyau magnétique et est une fonction complexe de l'intensité du champ pour les corps très magnétiques.*

Par la considération des forces agissant sur l'unité de masse positive dans une fente infiniment étroite pratiquée normalement au barreau, nous avons trouvé que

$$\mathfrak{B} = \mathcal{H} + 4\pi \mathcal{J}.$$

Mais $\mathcal{J} = \frac{\mathcal{J}}{\mathcal{H}}$, ou $\mathcal{J} = \mathcal{J} \mathcal{H}$, d'où

$$\mathfrak{B} = \mathcal{H} (1 + 4\pi \mathcal{J}).$$
 Comme $\mathfrak{B} = \mu \mathcal{H}$, on en tire $\mu = 1 + 4\pi \mathcal{J}$.

La perméabilité caractérise entièrement la valeur d'un corps au point de vue magnétique. Est-elle plus grande que celle de l'air, le corps est magnétique; est-elle plus petite, le corps est diamagnétique. En nous reportant aux définitions, nous voyons que les corps magnétiques concentrent les lignes de force, les conduisent mieux que l'air, au contraire des corps diamagnétiques qui les raréfient, les absorbent moins bien que l'air et semblent, en somme, les repousser.

Nous tirons de la dernière relation écrite

$$\mathcal{J} = \frac{\mu - 1}{4\pi}.$$

D'après ce que nous venons de dire, la susceptibilité sera positive pour les corps magnétiques, négative pour les diamagnétiques.

Utilité des deux notions de susceptibilité et de perméabilité. — En somme, nous nous trouvons en présence de deux façons d'envisager les phénomènes magnétiques qui, au premier abord, paraissent faire double emploi l'une avec l'autre. Il n'en est cependant rien. L'intensité d'aimantation, c'est-à-dire la susceptibilité, doit naturellement être prise en considération pour tout ce qui concerne le moment magnétique d'un aimant présentant des pôles libres, tandis que le flux d'induction, c'est-à-dire la perméabilité, facilite considérablement l'étude des phénomènes, dès qu'il s'agit de milieux magnétiques homogènes.

Ecrans magnétiques. — Si l'on enferme des corps soumis à l'action d'un champ magnétique dans une enveloppe magnétique, celle-ci développe des pôles dont l'effet démagnétisant tend à soustraire les corps occlus à l'action du champ. Les lignes de force sont refoulées dans les parois latérales de l'enveloppe, beaucoup plus perméables pour elles que l'air ambiant. Au moyen de plusieurs enveloppes superposées, on arrive à éliminer à peu près complètement l'influence magnétique.

Courbes d'aimantation. Magnétisme rémanent. Force coercitive. — Prenons un cylindre en fer doux allongé que nous plaçons parallèlement aux lignes de force du champ ; augmentons progressivement la valeur du champ et mesurons chaque fois les valeurs correspondantes de la force magnétisante M (qui se confond ici avec l'intensité du champ) que

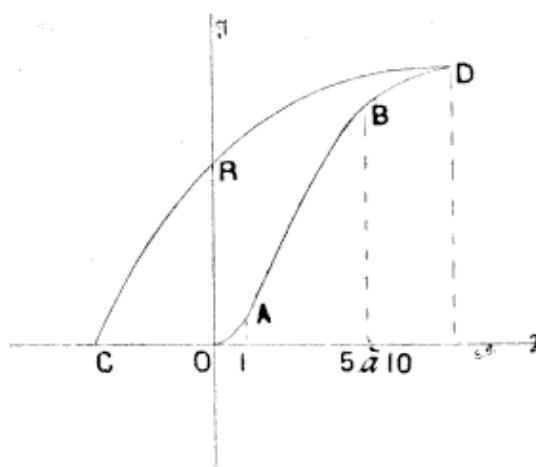


FIG. 75.

nous porterons en abscisses et de l'intensité d'aimantation J que nous porterons en ordonnées. Nous obtiendrons une courbe OABD (fig. 75) dite *courbe du magnétisme* ayant toujours la même allure générale pour le fer, le cobalt et le nickel, dans laquelle on peut distinguer trois parties : 1^o une

partie OA correspondant aux faibles forces magnétisantes, jusqu'à une unité CGS, dans laquelle l'intensité croît lentement et proportionnellement à la force; 2° une partie AB dans laquelle le magnétisme restant proportionnel à la force magnétisante croît très rapidement et se termine par un point d'infexion correspondant à la valeur maximum de z , pour 5 à 10 unités CGS du champ; enfin 3° une partie légèrement incurvée, où le magnétisme ne croît plus que lentement et tend vers un maximum. C'est la *saturation*. D'après MM. Ewing et Low celle-ci serait atteinte quand l'intensité d'aimantation est de 1700 pour le fer forgé, 1240 pour la fonte et 515 pour le nickel.

Ayant porté la force magnétisante à une certaine valeur, faisons-la décroître progressivement. Nous constaterons que l'aimantation ne repasse pas par les mêmes valeurs, courbe DR (fig. 75). Quand la force magnétisante est devenue nulle, le barreau possède encore une grande intensité d'aimantation, mais plus ou moins stable, représentée par l'ordonnée OR. C'est le *magnétisme rémanent*.

Pour annuler complètement le magnétisme rémanent, il est nécessaire de détruire la force moléculaire qui tend à maintenir le magnétisme, la *force coercitive* et pour cela, de soumettre le cylindre à une force magnétisante inverse atteignant la valeur OC et constituant le *champ coercitif*.

Cycle d'aimantation. Hystéresis. — Si après avoir fait décroître la force magnétisante jusqu'à zéro, on la ramène progressivement à sa valeur maximum OF, (fig. 76) on remarque que l'intensité d'aimantation ne repasse pas par les mêmes valeurs RED que dans la période descendante, mais se tient sur une courbe surbaissée RD. L'ensemble DERD forme un *cycle magnétique* et la différence entre les deux courbes, montrant que pour une même valeur de la force magnétisante, l'intensité d'aimantation

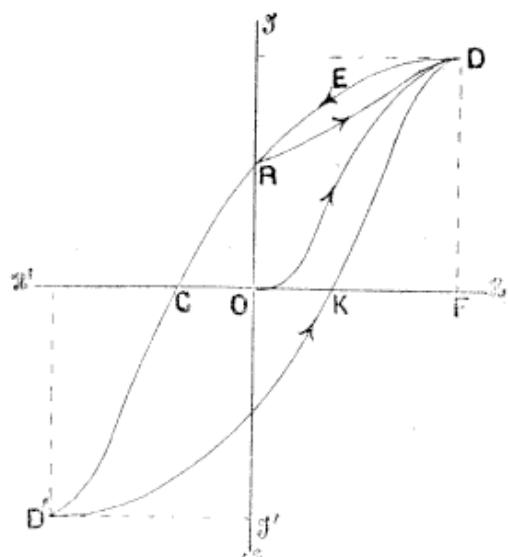


Fig. 76.

mantation est plus faible quand le champ augmente que quand il diminue, constitue le phénomène d'*hystérésis*. Il indique que l'aimantation d'un barreau peut posséder des valeurs différentes pour une même force magnétisante, dépendant non seulement de la grandeur de cette dernière, mais encore des états antérieurs.

Au lieu de nous arrêter à une force magnétisante nulle, renversons sa direction et augmentons-la progressivement jusqu'à une valeur absolue égale à celle du maximum positif OF, puis revenons graduellement au maximum positif et ainsi de suite. Après quelques cycles de l'espèce, les courbes prennent des formes définitives correspondant par exemple à DECD' pour la période décroissante et D'KD pour la période croissante.

Les courbes obtenues dépendent de la nature du métal. Si après avoir dressé une courbe cyclique pour un barreau en fer, on le durcit par une traction dépassant sa limite d'élasticité, puis qu'on le soumette aux mêmes forces magnétisantes que précédemment, on trouve une courbe cyclique surbaissée ; les intensités d'aimantation et le magnétisme rémanent sont moindres, la force coercitive est augmentée.

Variation de la susceptibilité. — En se reportant à la courbe du magnétisme, on voit que la valeur de la susceptibilité est d'abord faible ; elle croît rapidement atteignant pour le fer une valeur de 2 à 300, puis diminue indéfiniment jusqu'à une valeur très faible, (fig. 77). Pour les corps peu magnétiques, elle est toujours inférieure à 0,00001 en valeur absolue,

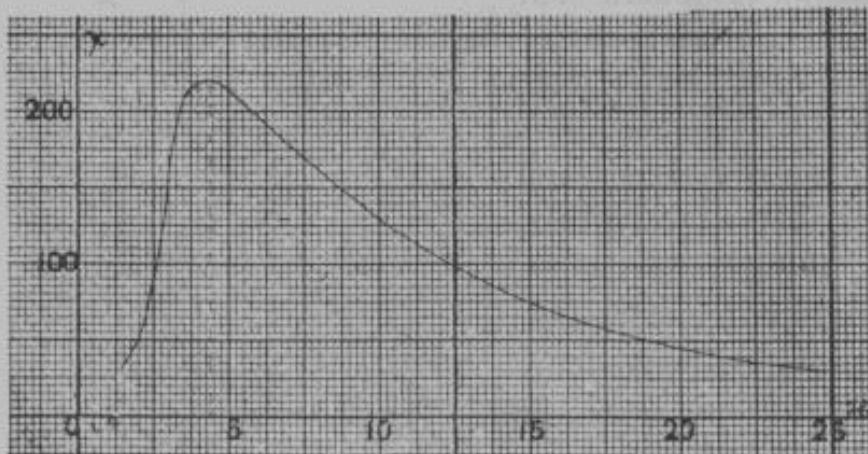


FIG. 77.

c'est-à-dire négligeable vis-à-vis de celle du fer pour les forces magnétisantes moyennes.

Retour à l'état neutre. — Si d'un point quelconque de la courbe descendante, nous ramenons la force magnétisante à une valeur nulle, le barreau ne revient pas à l'état neutre primitif, attendu qu'en augmentant positivement la force magnétisante, la courbe obtenue ne coïncide pas avec celle de départ OD, c'est-à-dire que la susceptibilité a changé. On ne pourra le ramener à l'état neutre, que par une suite de cycles dont l'amplitude diminue progressivement jusqu'à zéro.

En portant le barreau au rouge on le ramène aussi à l'état neutre, mais son état moléculaire se trouve en général modifié.

Enfin, des chocs répétés font disparaître le magnétisme des corps dont la force coercitive est très faible, sans toutefois les faire revenir à l'état neutre primitif.

Perte due à l'hystérésis. Formule de Steinmetz. — Considérons l'unité de volume d'un barreau acquérant une intensité d'aimantation \mathcal{J} , sous l'action d'une force magnétisante \mathcal{M} .

Le travail à effectuer pour augmenter l'intensité d'aimantation de $d\mathcal{J}$ sera équivalent à celui qu'il faudrait développer pour amener cette unité de volume, dont le moment d'aimantation est $d\mathcal{J}$, de l'état neutre, c'est-à-dire des limites du champ,

jusqu'au point considéré où le champ est \mathcal{M} . Ce travail $\mathcal{M}d\mathcal{J}$ est représenté par la surface du trapèze infiniment petit ABCD (fig. 78) de base AB $= \mathcal{M}$. Considérons le cycle F'R'E'F R'F. L'intensité d'aimantation passant de — OR'

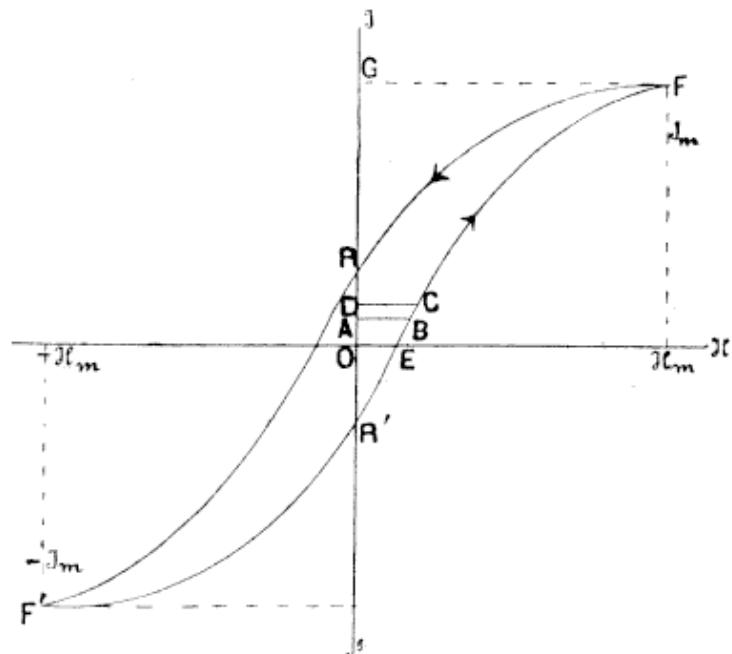


FIG. 78.

à $+\mathcal{I}_m$ en suivant la courbe R' F, le travail développé $\int_{-0 R'}^{\mathcal{I}_m} \mathcal{H} d \mathcal{I}$ est représenté par l'aire R' E F G. Si en faisant décroître la force magnétisante jusqu'à zéro, la courbe des intensités d'aimantation était encore F E R' le travail développé $\int_{\mathcal{I}_m}^{-0 R'} \mathcal{H} d \mathcal{I}$

étant négatif par rapport au premier et équivalent à celui-ci, le barreau restituerait exactement pendant la période décroissante, le travail absorbé pendant la période croissante. Mais la courbe fournie étant F R, le travail restitué n'est représenté que par la surface F G R et il reste un travail dépensé mesuré par l'aire du cycle située à droite de l'axe des \mathcal{I} . En poussant ensuite la force magnétisante à $-\mathcal{H}_m$ donnant l'intensité d'aimantation $-\mathcal{I}_m$ et revenant à zéro, on verrait de même que le travail dépensé est mesuré par la portion de l'aire du cycle comprise à gauche de l'axe des \mathcal{I} , de sorte qu'au total, pour un cycle complet et par centimètre cube de matière, le travail d'aimantation en ergs est fourni par l'aire du cycle exprimée en cm^2 . Ce travail est entièrement converti en chaleur. En le divisant par $4,17 \times 10^7$, on obtiendra le nombre de calories développées.

La forme du cycle magnétique montre que la perte augmente avec la force coercitive ainsi qu'avec l'intensité d'aimantation maximum.

Elle est plus grande pour un barreau au repos qu'à l'état dynamique, particulièrement pour le fer doux, les vibrations diminuant la force coercitive.

En somme, la perte par hystéresis ne se produit que parce que la limite d'élasticité magnétique étant dépassée, la perméabilité varie. C'est ainsi que pour des champs oscillant entre 0,000 04 et 0,04 C. G. S. il n'y a pas de perte par hystéresis, la perméabilité étant constante entre ces limites.

D'après des expériences effectuées par M. Steinmetz, la perte d'énergie en ergs par cm^3 et par cycle, entre les limites d'aimantation atteintes dans les machines industrielles peut s'exprimer par la formule

$$W = \gamma_1 \mathcal{B}^{1.6}$$

\mathcal{B} est l'induction maximum développée, γ_1 un coefficient dépendant de la nature du métal et variant de 0,002 pour du

fer doux recuit à 0,02 pour de la fonte grise contenant 3,5 % de carbone et 0,06 pour de l'acier forgé au manganèse contenant 4,73 % de manganèse.

Renseignements numériques. — La figure 79 donne le diagramme des intensités d'aimantation relevées sur les principaux métaux magnétiques. Bien que comprises entre les limites relativement faibles de 0 à 140 unités C. G. S., ces courbes accusent nettement l'existence d'un maximum. Les inductions correspondantes croissent d'une manière continue. L'induction en effet, est la somme de deux termes dont l'un $4\pi I$ ne tarde pas à devenir sensiblement constant, l'autre \mathcal{M} pouvant croître sans limite.

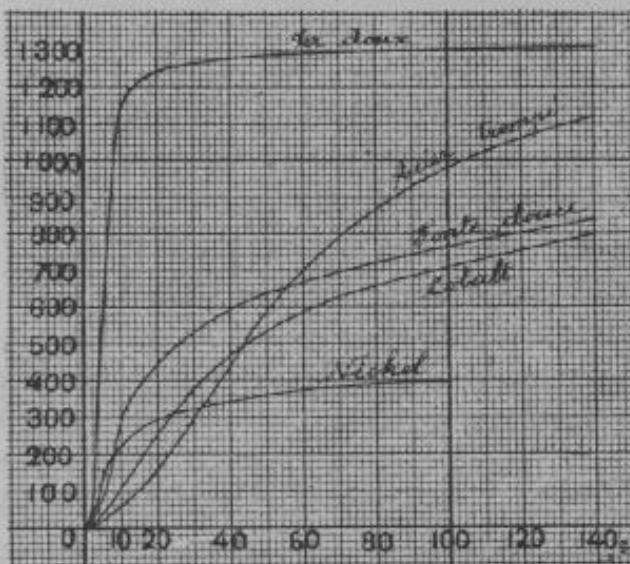


FIG. 79.

FER DOUX. — La courbe du fer doux s'élève très rapidement. Le maximum de \mathcal{M} , qui varie de 150 pour le fer doux ordinaire à 250 pour les fers très doux, se produit au point d'infexion de la courbe, pour des valeurs de la force magnétisante voisines de 3. Quand $\mathcal{M} = 10$ gauss, on approche déjà de la saturation, laquelle correspond à $I =$ environ 1300. En maintenant le fer en vibration pendant l'aimantation, on a pu obtenir pour I la valeur 1600.

Le magnétisme rémanent du fer doux, très élevé et pouvant atteindre 90 % du magnétisme total est essentiellement instable. Si le barreau est court, ou soumis à des chocs, le magnétisme disparaît à peu près entièrement.

La force coercitive, très faible, ne dépasse pas 2,5 et le travail d'hystérisis pour un cycle d'aimantation à peu près maximum a pour limite environ 15 000 ergs.

Acier. — La courbe de l'acier monte d'abord moins rapidement que celle des métaux suivants puis les dépasse,

atteignant presque l'intensité d'aimantation du fer. Les valeurs numériques dépendent essentiellement de sa composition et de la trempe.

Son magnétisme rémanent n'atteint pas la moitié de celui du fer, mais sa force coercitive est très grande. Elle augmente avec la proportion de carbone et surtout de certains métaux : manganèse, chrome, tungstène. L'acier chromé à 1 % possède une force coercitive de 40, celui à 3 % de tungstène 51. De là le choix exclusif de ces métaux pour constituer des aimants permanents. Le travail par cycle atteint dès lors des valeurs élevées : 40 000 à 60 000 pour l'acier doux ; 95 000 pour du fil de piano recuit, 116 000 pour le même fil non recuit, 65 000 pour l'acier chromé recuit et 167 000 pour le même non recuit. Avec l'acier Alleward au tungstène la dépense monte jusqu'à 216 000 ergs par cycle.

Fonte. — L'intensité d'aimantation de la fonte monte assez rapidement et n'atteint que les $\frac{2}{3}$ du maximum du fer, soit environ 800. Force coercitive 12, travail maximum par cycle 30 000 à 40 000 ergs.

Cobalt. — La courbe monte moins rapidement que celle de la fonte douce, puis s'en approche beaucoup. Hystérésis par cycle un peu plus forte que celle de cette dernière 40 000 à 50 000 ergs.

Nickel. — Après une montée très rapide, la courbe s'infléchit brusquement et l'intensité d'aimantation ne dépasse guère la moitié de celle du cobalt pour des forces magnétisantes d'environ 100. Hystérésis 25 000 tombant à 11 000 pour le même métal recuit.

Corps peu magnétiques ou diamagnétiques. — Leurs coefficients d'aimantation sont en général constants. Les courbes d'aimantation se réduisent donc à des droites passant par l'origine. L'hystérésis ne les affecte pas.

Oxygène. — L'oxygène est magnétique aussi bien à l'état gazeux qu'à l'état liquide. Une bulle de savon gonflée d'oxygène est attirée par un fort aimant, tandis qu'une goutte liquide à l'état sphéroïdal se précipite et s'aplatit sur la surface d'un pôle suffisamment puissant.

Bismuth. — C'est le corps le plus diamagnétique. Son coefficient d'aimantation est $-13,25 \times 10^{-65}$ à 20° .

Effet de la durée de l'aimantation. — Soumis à des forces magnétisantes inférieures à 1 unité C. G. S., des barreaux de fer doux à l'état neutre accusent un retard sensible à l'aimantation, dont la valeur maximum n'est atteinte qu'après plusieurs secondes. Ce *trainage magnétique* ne se remarque pas avec le fer dur et l'acier.

Effet de la température. — L'intensité d'aimantation croît jusqu'à une certaine température, pour tomber brusquement à une valeur nulle, à une température dite *critique*, qui est d'environ 775° C pour le fer doux, 690 pour l'acier et 310 pour le nickel.

La susceptibilité des corps peu magnétiques ou diamagnétiques est en général indépendante de la température.

D'après Faraday, tous les corps seraient aptes à devenir magnétiques à une certaine température. Cette opinion a été confirmée par plusieurs découvertes, notamment celle que certains alliages de fer et de nickel, non magnétiques aux températures ordinaires, peuvent s'aimanter fortement quand on les porte un peu en dessous de 0° C.

De même un alliage de ferro-manganèse à 13 % de manganèse n'est magnétique qu'entre 550 et 800° . On l'obtient à l'état magnétique ou non, suivant qu'après l'avoir porté au rouge, on le refroidit brusquement en dessous ou au-dessus de 800° pendant qu'il est sous l'influence du champ.

Aimants permanents.

Généralités. — Les aimants permanents sont le plus souvent façonnés sous la forme de barreaux ou de cylindres droits, ou en fer à cheval. Leur aimantation doit être la plus forte et la plus stable possible.

L'influence démagnétisante due aux pôles étant d'autant plus accentuée que les aimants sont plus courts, ils seront d'autant moins uniformes que leur longueur sera plus petite. Sous l'influence de la répulsion mutuelle de leurs extrémités, en

effet, les filets solénoïdaux qui les constituent ne restent pas parallèles et aboutissent partiellement sur les faces latérales, de sorte que les pôles, points d'application de la résultante des couches superficielles, ne se trouvent plus sur les faces terminales, mais à une certaine distance dans l'intérieur de l'aimant.

L'importance relative des couches intervient elle-même. Une lame mince prendra une aimantation plus forte qu'une lame épaisse de même longueur, le champ démagnétisant y étant plus faible. De même le moment magnétique d'un cylindre creux peut devenir très comparable à celui d'un cylindre plein de même diamètre extérieur.

Choix du métal. Conditions auxquelles il doit satisfaire. —
Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, la meilleure matière à employer pour constituer un aimant permanent est l'acier contenant 0,8 à 1,5 % de carbone et 2 à 3 % de chrome ou de tungstène.

L'acier doit être trempé au-delà de la température critique, soit 700 à 800° suivant sa composition et il y a avantage de faire, au préalable, osciller plusieurs fois sa température au-delà et en deçà du point critique.

Le recuit réduit la force coercitive, mais rend le magnétisme plus stable. Un recuit à 200° le diminue de moitié ; à 100° de 12 à 13 % seulement. En pratique on ne dépasse pas 60 à 70° maintenus pendant quarante-huit heures, ce qui ne diminue la force coercitive que de 1 à 3 %.

Enfin, on se met à l'abri de l'influence démagnétisante éventuelle des chocs, en diminuant de 10 % l'aimantation par l'application d'un champ extérieur.

Résultats obtenus. — Avec des barreaux de section carrée, dont la longueur est de 20 fois le côté, on obtient une intensité moyenne d'aimantation comprise entre 400 et 500 pouvant aller à 560 par l'addition de tungstène. En utilisant des fils d'acier très minces, l'influence démagnétisante devient négligeable et l'on peut atteindre 780.

Variation du moment magnétique avec la température. — Entre les limites des températures atmosphériques, la varia-

tion du moment magnétique d'un barreau est linéaire et donnée par la formule :

$$\lambda_b = \lambda_{b_0} (1 - \alpha t)$$

λ_b étant le moment à t° , λ_{b_0} à 0° et α un coefficient variable d'un acier à l'autre, mais restant inférieur à 0,001.

Procédés anciens d'aimantation. **DOUBLE TOUCHE** — On applique sur le milieu du barreau AB (fig. 80) à aimanter, les extrémités de noms contraires de deux barreaux égaux inclinés de 30° environ et on les écarte simultanément jusqu'aux extrémités A et B. On répète cette opération plusieurs fois de suite sur chacune des faces de AB et on obtient un barreau aimanté nord à l'extrémité qu'abandonne le pôle sud et vice versa.

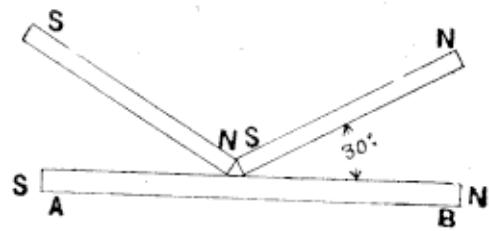


FIG. 80.

DOUBLE TOUCHE SÉPARÉE. — On renforce l'action, en faisant reposer les extrémités du barreau à aimanter sur celles de deux forts aimants fixes dont les polarités sont inverses de celles à obtenir (fig. 81).



FIG. 81.

DOUBLE TOUCHE UNIE. — Enfin on peut laisser les deux barreaux mobiles unis comme dans la figure 80, partir du milieu, aller jusqu'à une extrémité, revenir au milieu et passer ainsi un certain nombre de fois sur les deux moitiés. Ce dernier procédé paraît préférable pour les gros barreaux.

Procédés actuels. EMPLOI DU COURANT. — On recourt aujourd'hui presque exclusivement à l'action du courant électrique que nous étudierons dans les chapitres suivants.

Aimantation sous l'action de la terre. — Un morceau de fer ou d'acier s'aimante sous l'action du champ terrestre.

Placé dans la direction de ce champ et frappé d'un coup de maillet, un barreau de fer doux acquiert, par suite de l'ébranlement, son aimantation maximum et une force coercitive notable. En le plaçant alors transversalement au champ, un

nouveau coup lui enlève tout son magnétisme. De même un faisceau de fils de fer doux, tordu sur lui-même dans la direction des lignes de force terrestre prend une aimantation permanente.

La valeur de χ est d'à peu près 40 pour $\mathcal{K} = 0,46$ valeur du champ terrestre horizontal à Paris.

Conservation des aimants. Armature. — Les aimants doivent être conservés à l'abri des chocs et, d'une manière générale de toute action démagnétisante. Pour éviter l'action nuisible des pôles, on complète leur circuit magnétique par

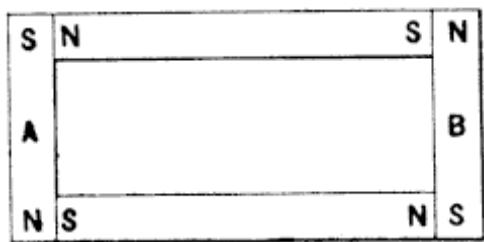


FIG. 82.

des pièces de fer doux qui s'aimantent par influence et absorbent tout le flux. On conserve donc les aimants prismatiques en les plaçant parallèlement dans des boîtes (fig. 82), les extrémités de noms contraires en regard sur les

quelles viennent appuyer les pièces de fer doux A et B, appelées *armatures*.

Quand l'aimant est en fer à cheval, ses deux pôles sont également réunis par une armature. 

CHAPITRE VII

Electromagnétisme.

Expérience d'Oersted. — Oersted constata en 1820 que, traversant un conducteur placé parallèlement à une aiguille aimantée, un courant fait dévier cette aiguille qui tend à se mettre en croix avec le courant (fig. 83).

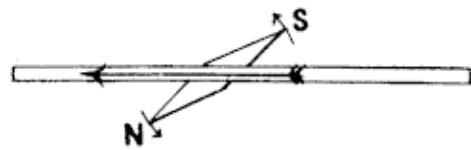


FIG. 83.

RÈGLE D'AMPÈRE. — *Un observateur couché le long du conducteur de manière que la direction du courant aille des pieds à la tête et regardant l'aiguille, voit le pôle nord de celle-ci dévier vers la gauche.*

RÈGLE DE MAXWELL. — Maxwell a donné une règle d'application plus pratique que celle d'Ampère : *Le sens du déplacement d'un pôle nord est donné par celui de la rotation d'un tire-bouchon se déplaçant dans le sens du courant.*

Aiguille astatique d'Ampère — L'action directrice exercée par le champ terrestre s'oppose au déplacement de l'aiguille aimantée. On élimine son influence, de manière à ne laisser subsister que celle du courant, en plaçant l'aiguille au centre d'un cadre (fig. 84) que l'on peut orienter de manière que l'axe de rotation de l'aiguille soit parallèle à la direction du champ magnétique terrestre au point où l'on opère. Dans ces conditions, l'axe magnétique de l'aiguille étant perpendiculaire aux lignes de force terrestres, on constate que le courant met toujours l'aiguille en croix avec lui, quelle que soit son intensité. On en conclut que l'action du courant s'exerce dans un plan perpendiculaire au fil conducteur et en sens opposé sur les deux pôles.

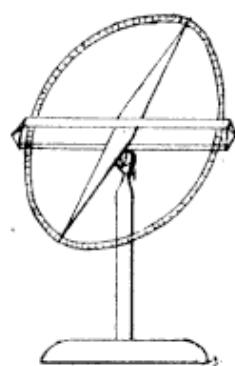


FIG. 84.

Forme du champ magnétique dû à un courant rectiligne. —

Les expériences précédentes prouvent qu'un courant développe un champ magnétique autour de lui dans le milieu ambiant, ce que l'on peut mettre en évidence par son fantôme magnétique. En saupoudrant de limaille de fer une feuille de papier traversée par un conducteur perpendiculaire à son plan, siège d'un courant suffisamment intense, on voit la limaille s'agencer en cercles concentriques au conducteur (fig. 85).

Expression de la force magnétique due à un courant rectiligne. — **LOI DE BIOT ET DE SAVART.** En étudiant l'intensité du champ magnétique créé par un courant, par la méthode des oscillations, Biot et Savart ont reconnu que *la direction du champ est partout perpendiculaire au plan passant par l'axe du conducteur; l'action est proportionnelle à l'intensité du courant et du pôle et inversement proportionnelle à la distance au conducteur.*

$$F = \frac{k i m}{r}$$

soit pour l'intensité du champ

$$x = \frac{k i}{r}$$

k est un facteur de proportionnalité dépendant du milieu ambiant, r la distance du pôle au conducteur. Nous verrons plus loin que pour l'air k est égal à 2.

COURANT ANGULEUX. LOI DE BIOT. — *Un conducteur rectiligne indéfini $M N M'$, (fig. 86) replié en un point N suivant un angle 2α , parcouru par un courant i exerce, sur la masse magnétique placée à une distance r du sommet N sur la bissectrice de l'angle formé par le courant, une force*

$$F = \frac{k i m}{r} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

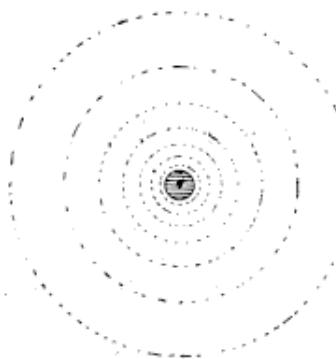


FIG. 85.

La direction de cette force reste perpendiculaire au plan du courant et du pôle.

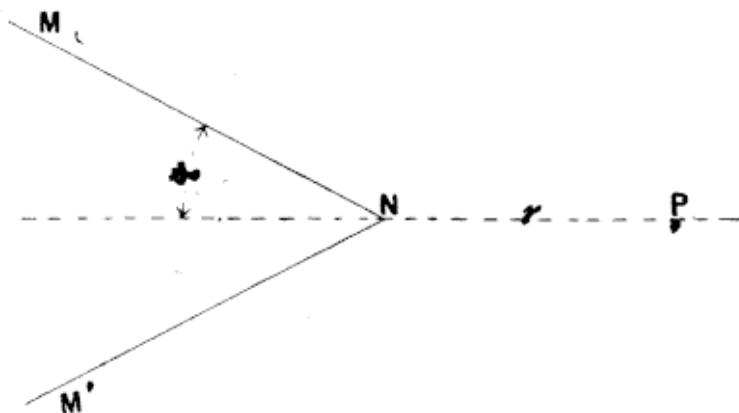


FIG. 86.

Galvanomètre. — Tendons parallèlement au-dessus d'une aiguille aimantée NS, (fig. 87) un conducteur AB. Quand celui-ci est traversé par le courant, l'aiguille prend une position d'équilibre intermédiaire sous l'action des deux systèmes de force agissant dans des plans rectangulaires, qui l'actionnent.

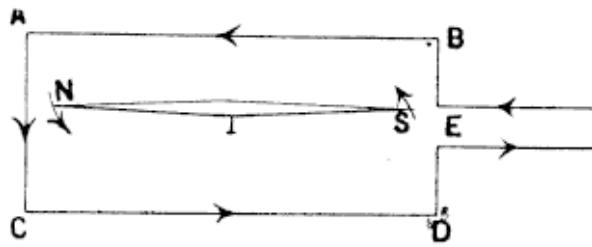


FIG. 87.

Si nous ramenons le fil parallèlement sous l'aiguille, en CD, il est aisément de voir, par l'application d'une des règles précédemment données, que son action coïncide avec celle du brin AB. Les brins AC, DE, EB, agissent d'ailleurs dans le même sens. On a formé ainsi un véritable cadre entourant l'aiguille.

En ramenant le fil suivant un second cadre adjacent au premier on renforce l'action et ainsi de suite, formant une bobine dite aussi *multiplicateur de Schweigger*.

L'action de chaque brin étant proportionnelle à l'intensité du courant, l'action totale de la bobine est également proportionnelle à cette intensité et par conséquent la déviation de l'aiguille peut servir à mesurer cette dernière après étalonnage. On a constitué ainsi un appareil de mesure du courant, un *galvanomètre*.

Courant élémentaire. Loi de Laplace. — De l'équation de Biot, Laplace déduit la formule générale donnant l'action d'un élément de courant sur un pôle :

$$df = \frac{k' i m}{r^2} dl \sin(r, dl).$$

k' est un facteur dépendant du milieu ambiant, auquel on donne la valeur 1 pour l'air, α (fig. 88) l'angle de l'élément avec la droite qui le joint au point P où se trouve la masse m , r la distance à A .

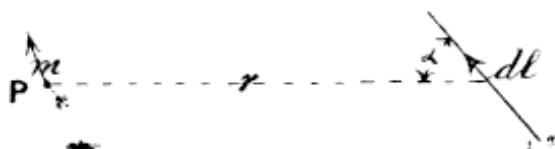


FIG. 88.

La force est normale au plan de l'élément et du pôle ;

sa direction se déduit de la règle d'Ampère ou de celle de Maxwell.

En supposant l'observateur placé le long de l'élément de courant, celui-ci allant des pieds vers la tête, un pôle nord tiendra à se déplacer de sa droite vers sa gauche.

Système électromagnétique C. G. S. — Si dans la formule de Laplace on mesure tout en unités C. G. S., dl et r en cm, df en dynes, m en unités magnétiques C. G. S. l'intensité de courant se trouve définie en grandeur et en dimensions. L'unité d'intensité de courant ainsi fixée permet d'établir un système de mesure des diverses quantités électriques qui porte le nom de *système électromagnétique* dont on a déduit les unités pratiques généralement utilisées en électricité. Nous reviendrons ultérieurement sur ce système.

Action d'un champ magnétique sur un élément de courant. — Réciproquement si le pôle est fixe et l'élément de courant mobile, la réaction étant égale et contraire à l'action, ce dernier tiendra à se déplacer de la droite vers la gauche de l'observateur *regardant l'élément de courant du point P*, le courant allant dans la direction de ses pieds à sa tête. Si la masse magnétique est de signe contraire, les actions sont de sens opposé.

La loi de Laplace permet de mettre aisément en évidence cette action du pôle sur le courant. En effet, $\frac{m}{r^2}$ représente

l'intensité \mathcal{H} du champ dû au pôle m au point où se trouve l'élément de courant. En substituant il vient :

$$df = k' i \mathcal{H} dl \sin(\mathcal{H}, dl).$$

S'il existait plusieurs pôles, \mathcal{H} serait la résultante de l'action qu'ils produisent individuellement au point où se trouve l'élément de courant. La direction de la force électromagnétique peut encore se déterminer autrement.

RÈGLE DES TROIS DOIGTS DE FLEMING. — Plaçons à angles droits le pouce, l'index et le médius de la *main gauche* : l'index dans le sens des lignes de force du champ (induction), le médius suivant la direction du courant, le pouce indiquera alors le sens suivant lequel le conducteur est sollicité (poussé).

Travail développé par le déplacement d'un élément de courant sous l'action d'un pôle. — Abandonné à lui-même, l'élément de courant se déplacera dans la direction de la force qui le sollicite. Pendant le temps infiniment petit dt , il parcourra la longueur $dl' = A D$, (fig. 89) et le travail élémentaire effectué aura

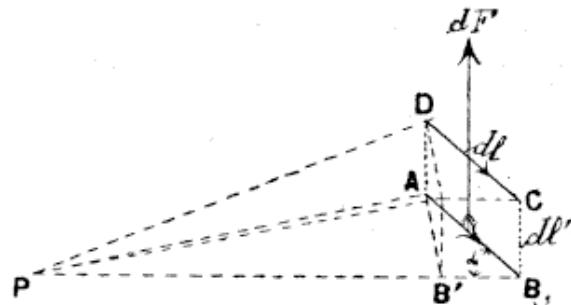


FIG. 89.

$$\text{pour mesure } d T = d F dl' = \frac{k' i m}{r^2} dl \sin(\mathcal{H}, dl) dl'.$$

Mais $dl \sin(\mathcal{H}, dl') = A B'$, projection de dl sur la perpendiculaire à $P B$ abaissée du point A . Done :

$$d T = \frac{k' i m}{r^2} A B' \times A D.$$

Or $A B' \times A D$ est la projection de $ABCD$ surface décrite par l'élément de courant sur une sphère de rayon r et cette surface, divisée par r^2 , représente l'angle solide $d\omega$ sous lequel on voit du point P la surface décrite par l'élément de courant. En définitive $d T = k' i m d\omega$.

L'expression ne change pas dans le cas où le déplacement infiniment petit dont il s'agit est forcé et s'effectue dans une direction quelconque, puisque le travail est toujours égal au produit de la force par le chemin parcouru dans la direction

de la force. Or celle-ci reste constamment perpendiculaire au rayon r et l'on doit donc encore projeter le déplacement sur une sphère ayant pour centre P.

Travail développé par le déplacement d'un courant sous l'action d'un pôle. — Le travail développé par le déplacement

d'un courant de longueur l sous l'action d'un pôle sera égal à la somme de termes tels que $k' i m d\omega$ soit $k' i m \omega$, ω étant l'angle solide sous lequel on voit du point P (fig. 90) la surface A B B' A' décrite par A B.

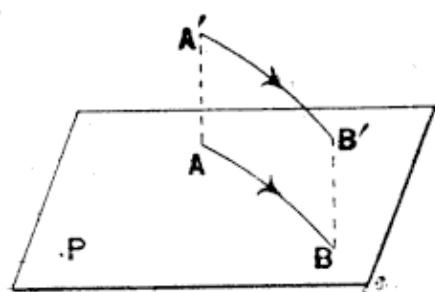


FIG. 90.

Si le courant passe en sens inverse, le déplacement restant le même, le travail *recueilli* sera $-k' i m \omega$. En effet, il faut dans ce cas *dépenser* du travail pour forcer le conducteur à se déplacer en sens inverse de l'action électromagnétique qui le sollicite.

RÈGLE DE FARADAY. — Le produit $m \omega$ représente le flux de force traversant la surface décrite ou balayée par le conducteur siège du courant ou encore le nombre de lignes de force coupées par le conducteur dans son déplacement d'où, k' étant dans le système électromagnétique C. G. S. d'un usage général, égal à l'unité, cette règle de Faraday : *Le travail effectué par un conducteur qui se déplace dans un champ, est égal au produit de l'intensité du courant par le flux de force ou nombre de lignes de force coupées par le conducteur.*

Forme du champ magnétique développé par un courant fermé. — Soit un conducteur fermé A B (fig. 91) représenté

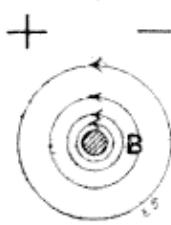
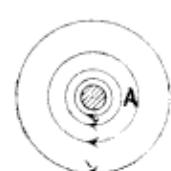


FIG. 91.

par ses traces dans le plan du papier parcouru par un courant allant du lecteur au papier dans la branche A, du papier au lecteur dans la branche B. Il est facile de se rendre compte, le fantôme magnétique le met d'ailleurs en évidence, qu'un flux de lignes de force va entrer par le côté droit de la figure formée par le courant, dit *face négative du courant*, et sortir par le côté gauche dit *face positive du courant*.

Courant mobile d'Ampère. — Ampère a montré l'action d'un champ magnétique sur un courant au moyen du dispositif indiqué (fig. 92) connu sous le nom de *courant mobile d'Ampère*.

Le courant est amené à deux godets A et B contenant du mercure, dans lesquels plongent les extrémités repliées d'un cadre métallique mobile C D E F reposant par son extrémité inférieure seule sur le fond du godet B.

En approchant un aimant, le cadre est dévié. Il tend à présenter sa face négative au pôle nord de l'aimant et vice versa. L'action est maximum quand l'aimant est placé au milieu du cadre.

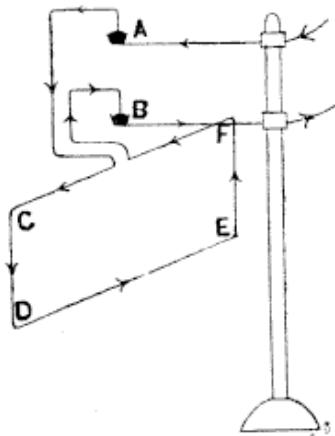


FIG. 92.

Courants de sens contraires et sinueux. — Un conducteur replié sur lui-même (fig. 93) n'exerce aucun effet sur un aimant ou sur un cadre mobile.

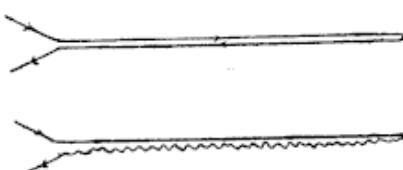


FIG. 93 et 94.

Il en résulte que *deux courants rapprochés égaux et de sens contraires, produisent des effets magnétiques égaux et contraires s'annulant réciproquement*.

Il en est encore de même quand la partie repliée présente des sinuosités ne s'écartant pas trop ou ne s'enroulant pas autour du fil rectiligne (fig. 94). On en conclut que *l'action d'un courant sinueux est identique à celle d'un courant rectiligne voisin ayant les mêmes extrémités*.

Travail développé par le déplacement d'un courant fermé sous l'action d'un pôle. — Considérons un courant fermé A B C D (fig. 95), présentant sa face négative au pôle *m* situé en P et se déplaçant en A' B' C' D'. Déterminons séparément les travaux effectués par les tronçons A B C et A D C que parcouruent des courants égaux et inverses.

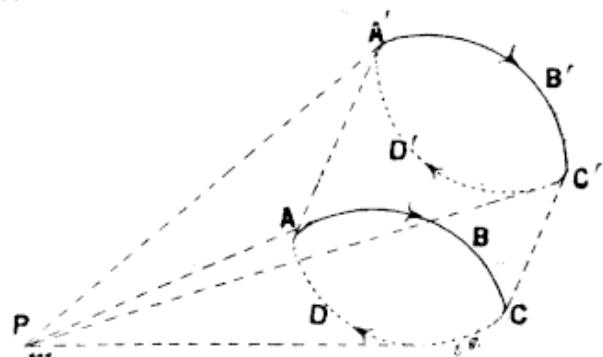


FIG. 95.

Le travail fourni par A B C se déplaçant de A B C en A' B' C' est $k'i m \times \text{angle solide } P A A' B' C' C B A = k'i m$ (angle solide $P A A' D' C' C B A + \text{angle solide } P A' B' C' D' A'$).

Le travail fourni par A D C se déplaçant de A D C en A' D' C' est, le courant étant de sens inverse : $-k'i m \times \text{angle solide } P A A' D' C' C D A = -k'i m$ (angle solide $P A A' D' C' C B A + \text{angle solide } P A B C D A$).

Le travail total = $k'i m$ (angle solide $P A' B' C' D' A' - \text{angle solide } P A B C D A$).

Mais $m \times \text{angle solide } P A' B' C' D' A'$ est le flux π_2 traversant le circuit dans sa seconde position, tandis que $m \times \text{angle solide } P A B C D A$ est le flux π_1 traversant le circuit dans la position de départ. On peut donc écrire

$$T = k'i (\pi_2 - \pi_1).$$

Si le circuit s'éloigne à l'infini, $\pi_2 = 0$ et le travail fourni est $-k'i \pi_1$. Réciproquement, pour amener le courant de l'infini à la position A B C D, il faudra dépenser un travail $+k'i \pi_1$ qui représentera l'énergie relative du courant et du pôle et vice versa, si c'est sa face positive, que le courant présente à la masse $+m$ placée en P. Donc, quand un courant présente sa face positive à un pôle + l'énergie relative du courant et du pôle est $+k'i \pi_1$, π_1 étant le flux envoyé par le pôle à travers la face positive du courant; quand, au contraire, il lui présente sa face négative, l'énergie relative devient $-k'i \pi_1$.

Potentiel magnétique dû à un courant. — Nous avons vu que le potentiel en un point est exprimé par le travail qu'il faut dépenser pour amener l'unité positive d'agent de l'infini en ce point. En faisant $m = 1$, l'expression $\pm k'i \omega$ représentera le travail qu'il faut dépenser pour amener l'unité positive de magnétisme depuis l'infini jusqu'au point d'où l'on voit sous l'angle ω , la face positive ou négative du courant, c'est-à-dire le potentiel magnétique \mathcal{V} dû au courant

$$\mathcal{V} = \pm k'i \omega.$$

Équivalence d'un courant et d'un feuillet magnétique.
Théorème d'Ampère. — L'expression précédente, rapprochée de celle $\pm \mathcal{F} \omega$ trouvée pour le potentiel dû à un feuillet magnétique montre, qu'au point de vue de l'effet magnétique, un

courant fermé correspond à un feuillet de même surface et de puissance $k'i$.

On peut d'ailleurs s'en rendre compte de la manière suivante : découpons la surface A B C D (fig. 96) de forme quelconque que limite le courant i , en petites surfaces $a b c d$, $d c e f$, etc. Supposons que le contour de ces petites surfaces soit traversé par des courants i tous de même sens, constituant autant de feuillets élémentaires de même puissance. Les contours adjacents étant le siège de courants égaux et inverses infiniment voisins, leur action magnétique est nulle (courants de sens contraires voisins). Seuls les éléments linéaires extérieurs sont efficaces et leur action correspond à celle d'un courant unique de même intensité, qui parcourrait le circuit fermé A B C D. *Donc, le feuillet constitué par l'accolement des feuillets élémentaires considérés, peut être remplacé comme effet par un courant i traversant son contour et vice-versa, un courant traversant un conducteur embrassant une surface S correspond, comme effet magnétique à un feuillet de surface S et de puissance $\mathfrak{S} = k'i$.*

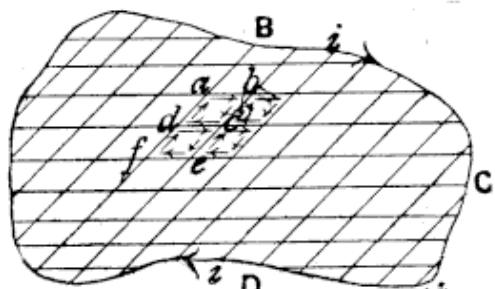


FIG. 96.

En choisissant l'unité d'intensité de manière que $k' = 1$, on arrive au théorème d'Ampère : *L'effet magnétique d'un courant fermé est le même que celui d'un feuillet de même contour, dont la puissance magnétique est égale à l'intensité du courant.*

Unité électromagnétique d'intensité. — Le courant fermé i développe donc un potentiel magnétique $\mathfrak{V} = \pm i \omega$, d'où $i = \pm \frac{\mathfrak{V}}{\omega} = \pm \mathfrak{S}$ et *l'unité d'intensité de courant sera l'intensité du courant produisant l'unité de potentiel en un point d'où l'on voit son contour sous l'unité d'angle*. Ses dimensions sont celles de l'unité de puissance d'un feuillet

$$M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

L'unité pratique l'ampère en vaut le $\frac{1}{10}$. Par suite, avec les unités pratiques le coefficient k' des formules précédentes

vaut $\frac{I}{10}$. Avec les unités C.G.S. électromagnétiques il vaut 1.

Il en est de même du coefficient de la loi de Laplace.

Expression du champ magnétique dû à un courant fermé.

— L'intensité du champ magnétique dû à un courant est dans une direction l

$$\mathcal{H} = - \frac{d\mathcal{V}}{dl} = \mp \frac{id\omega}{dl}.$$

Le flux magnétique total, dont nous avons indiqué antérieurement la forme, est la somme des termes $\mathcal{H} ds$ relatifs à une surface equipotentielle.

Le champ magnétique dû à un courant fermé diffère de celui du feuillet équivalent. Alors que celui de ce dernier se termine aux masses magnétiques égales et contraires des bases du feuillet et que l'unité de masse magnétique positive placée sur la face positive et abandonnée à elle-même viendrait s'appliquer sur sa face négative, après avoir suivi le trajet d'une ligne de force et dépensé le travail $4\pi\mathcal{V}$ aux dépens de l'énergie potentielle relative du feuillet et du pôle, dans le cas du courant, l'unité positive tournerait autour du courant tant que celui-ci passe, en dépensant à chaque tour une énergie $4\pi i$ nécessairement empruntée à la source de courant.

Hypothèse d'Ampère. — D'après Ampère, chaque atome d'un aimant serait le siège d'un courant circulaire ; c'est l'orientation des courants traversant les atomes qui ferait apparaître l'effet magnétique. Pour que cette hypothèse soit plausible, il faut admettre l'existence de courants se perpétuant sans dépense d'énergie, ce qui implique que la résistance électrique n'apparaîtrait qu'à la traversée des espaces interatomiques.

Energie relative d'un courant dans un champ magnétique.

Règle de Maxwell. — Nous avons vu que l'énergie relative d'un courant et d'un pôle est mesurée par le produit de l'intensité du courant par le flux qu'envoie le pôle à travers le circuit du courant. D'une manière générale, le champ magnétique étant indépendant du courant, l'énergie relative du courant et du champ sera $W = -i\mathcal{H}s = -i\mathcal{V}$

\mathcal{H} représentant l'intensité du champ supposé uniforme et \mathcal{V} le flux total passant à travers la face négative du circuit.

Si le circuit se déplace et effectue un certain travail, celui-ci est mesuré par la variation de W . La position d'équilibre atteinte sera stable si l'énergie potentielle est alors minimum, ce qui a lieu quand un flux maximum entre par sa face négative. On en déduit cette règle de Maxwell : *Un courant mobile dans un champ magnétique tend à se déplacer de manière à embrasser un flux maximum par sa face négative.*

Par exemple, un cadre mobile autour d'un axe horizontal perpendiculaire à la direction du champ magnétique terrestre, tourne de manière à orienter sa face positive vers le nord. A ce moment, en effet, le plus grand nombre possible de lignes de force entre par sa face négative.

Cadre astatique. — Par contre, si le cadre est constitué de deux surfaces égales entourées de courants égaux circulant en sens inverses (fig. 97 et 98), l'action due au champ terrestre et en général à tout champ magnétique uniforme traversant les cadres sera nulle.

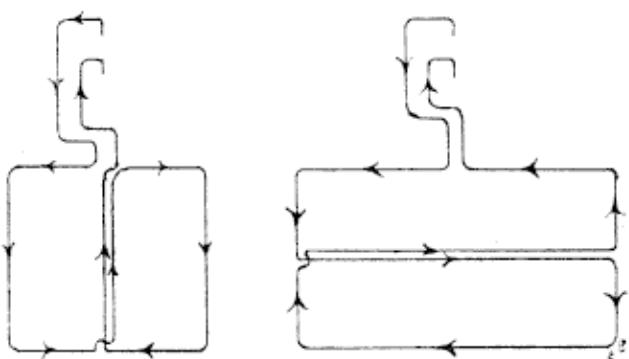


FIG. 97 et 98.

Action mécanique des courants sur les courants. Lois d'Ampère. — En approchant d'un des conducteurs du cadre astatique de la figure 97 un conducteur rectiligne traversé par un courant parallèle à celui passant dans le côté du cadre, on constate que, *si les courants sont de même sens, ils s'attirent ; ils se repoussent, au contraire, quand ils sont de sens inverses.*

De même, en approchant le courant rectiligne du côté inférieur du cadre horizontal astatique, figure 98, on voit celui-ci tourner jusqu'à ce que les deux courants voisins soient parallèles et de même sens. D'où la règle : *Deux courants qui se croisent s'attirent et tendent à se placer parallèlement s'ils convergent vers leur point d'intersection ou en divergent tous deux ; ils se repoussent, au contraire, si l'un s'approche et l'autre s'éloigne du sommet de l'angle de croisement.*

Energie relative de deux courants. — L'assimilation des courants aux feuillets explique aisément l'action mécanique de

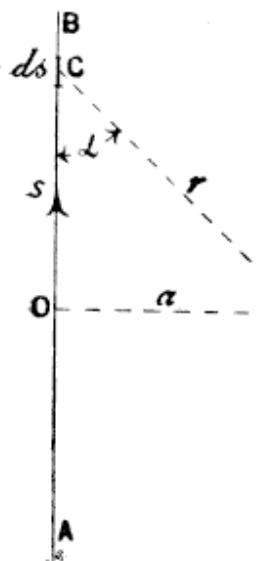
deux courants l'un sur l'autre et permet d'écrire pour l'énergie relative de deux courants l'expression :

$$W = -i i' \mathfrak{M}$$

\mathfrak{M} étant le *coefficient d'induction mutuelle des deux circuits* en présence. $\mathfrak{M}i$ représente le flux envoyé par le courant i , à travers le circuit de i' et $\mathfrak{M}i'$ le flux qu'envoie i' à travers le circuit de i . \mathfrak{M} est donc le flux qu'envoie dans un des circuits l'unité de courant passant dans l'autre. Les courants présentent des faces de noms contraires en regard.

La formule donnant l'énergie relative de deux courants est tout à fait analogue à celle donnant l'énergie relative des deux feuillets magnétiques équivalents. Il existe toutefois une différence profonde entre les deux systèmes. Pour un même déplacement ils fournissent le même travail. Mais l'accomplissement de ce travail pour les feuillets se fait aux dépens de leur énergie potentielle, tandis que pour les courants il y a augmentation de l'énergie potentielle, les deux sources subvenant à la double dépense du travail accompli et de l'accroissement d'énergie potentielle.

Potentiel dû à un courant rectiligne indéfini en un point distant de a du conducteur. — Du point P (fig. 99) où se



trouve la masse magnétique m , abaissons une perpendiculaire sur le conducteur indéfini A B traversé par le courant i et compsons les distances à partir du pied de la perpendiculaire. Considérons en un point C un élément de courant de longueur ds , situé à une distance r de P.

Son action sur la masse m sera, en vertu de la loi de Laplace dans laquelle nous faisons $k' = 1$

$$\frac{mi}{r^2} \cdot ds \sin x$$

FIG. 99. Cette équation contient trois variables s , r et x . Eliminons s et r pour pouvoir l'intégrer.

$$s = a \operatorname{cotg} x \quad \text{d'où} \quad ds = -\frac{a \, dx}{\sin^2 x}$$

D'autre part $r = \frac{a}{\sin \alpha}$

Remplaçant il vient :

$$df = -\frac{mi \sin \alpha d\alpha}{a}$$

L'action totale du conducteur A B aura pour valeur :

$$\int_{\pi}^0 -\frac{mi \sin \alpha d\alpha}{a} = \left[\frac{mi \cos \alpha}{a} \right]_{\pi}^0 = \frac{2mi}{a}$$

Ce qui donne pour l'intensité du champ au point P

$$H = \frac{2i}{a}$$

En pratique on n'a jamais affaire à des courants linéaires. Les conducteurs utilisés sont en général cylindriques et il importe de déterminer ce que devient l'action magnétique dans ce cas.

L'action magnétique d'un conducteur cylindrique rectiligne traversé par un courant I uniformément réparti, en un point extérieur quelconque P, est la même que si le courant était concentré sur l'axe du conducteur.

Considérons (fig. 100) une couronne élémentaire de la section droite du cylindre, et menons par le point P deux plans infiniment rapprochés qui découpent dans cette couronne des éléments ds et ds' .

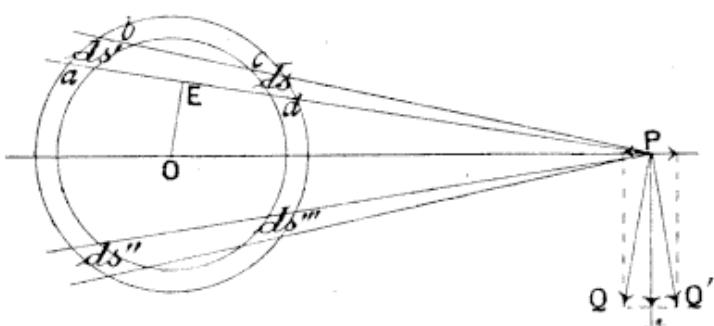


FIG. 100.

L'action des courants traversant ces éléments au point P, perpendiculaire à Pa a pour valeur, en désignant par i la densité du courant

$$2 \frac{i ds'}{Pa} + \frac{2i ds}{Pd} = 2i \left(\frac{ds'}{Pa} + \frac{ds}{Pd} \right).$$

Mais

$$\frac{ds'}{ds} = \frac{ab}{cd} = \frac{Pa}{Pd} \text{ ou } \frac{ds'}{Pa} = \frac{ds}{Pd},$$

ce qui montre que les actions de ds' et ds sont égales et leur action totale vaut

$$2 \cdot \frac{2i ds'}{Pa}.$$

Abaissions de O une perpendiculaire O E sur Pa et supposons transportées en E les intensités $i ds'$ et $i ds$. L'action en P sera

$$\frac{2i(ds' + ds)}{PE} = \frac{2i\left(ds' + ds' \frac{Pd}{Pa}\right)}{PE} = \frac{2i ds' (Pa + Pd)}{PE \cdot Pa} = \\ 2 \cdot \frac{2i ds'}{Pa} = 2 \cdot \frac{2i ds'}{Pa}.$$

L'action est la même que quand les éléments se trouvaient en *a b* et *c d*.

Menons en P une perpendiculaire à Pa sur laquelle nous portons une grandeur PQ proportionnelle à l'action exercée en P par les deux éléments ds' , ds et projetons cette force en PR suivant la perpendiculaire à l'axe OP.

$$PR = \frac{2i(ds' + ds)}{PE} \cos R P Q.$$

$$\text{Mais } \cos R P Q = \cos E P O = \frac{PE}{PO}.$$

$$\text{Donc } PR = \frac{2i(ds' + ds)PE}{PE \cdot PO} = \frac{2i(ds' + ds)}{PO}$$

équation montrant que l'effet est le même que si les courants élémentaires $i ds'$ et $i ds$ étaient concentrés en O.

Si maintenant nous considérons les courants symétriques $i ds''$, $i ds'''$, nous verrons qu'ils donnent lieu, en P, à une force $PQ' = PQ$ perpendiculaire à $P ds''' ds''$, dont la composante suivant la perpendiculaire à OP est aussi égale à PR, tandis que la composante suivant OP est égale et opposée à la composante de PQ suivant la même direction. Il ne reste donc que l'action $2PR$ égale à l'action totale qu'exerceraient en P les courants $i ds$, $i ds'$, $i ds''$, $i ds'''$ transportés en O.

Le courant annulaire considéré se décomposant en un système de surfaces ds , ds' , ds'' , ds''' par le déplacement graduel et symétrique des deux plans secteurs depuis l'axe OP jusqu'aux tangentes extérieures, la proposition est démontrée pour l'anneau envisagé et par suite pour tout le cylindre lui-même,

celui-ci pouvant être découpé en anneaux concentriques juxtaposés d'épaisseurs infiniment petites.

Potentiel en un point de l'axe d'un courant circulaire. —

Soit un courant circulaire de rayon R présentant sa face négative vers P (fig. 101). Le potentiel en ce point est $\mathcal{V} = -i\omega$, ω étant l'angle solide sous lequel on voit le courant du point P . Mais $\omega = 2\pi(1 - \cos\alpha)$.

Donc $\mathcal{V} = -2\pi i(1 - \cos\alpha)$.

Par raison de symétrie, l'intensité est dirigée suivant l'axe de la spire. Elle a pour valeur :

$$\mathcal{K} = -\frac{d\mathcal{V}}{dl} = \frac{d}{dl} 2\pi i \left(1 - \sqrt{\frac{l}{l^2 + R^2}} \right) = -\frac{2\pi i R^2}{(l^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Au centre du cercle l'action devient :

$$\mathcal{K}' = -\frac{2\pi i}{R} = -\frac{li}{R^2},$$

l représentant la longueur du courant. Le signe — indique qu'il y a attraction, c'est-à-dire que la force est dirigée vers la face négative. On peut faire abstraction du signe, à condition de donner à la force la direction voulue.

Si l'on dispose de n courants circulaires assez rapprochés pour que l'on puisse négliger leur distance vis-à-vis de R , l'intensité est au centre

$$n\mathcal{K}' = \frac{2\pi ni}{R}$$

et dirigée de la face terminale négative vers la face terminale positive.

Solénoïde électromagnétique. — Ampère a donné le nom de *solénoïde électromagnétique* (fig. 102) à un système de courants fermés infiniment petits de même surface et de même intensité, distribués à des distances infiniment petites et égales, le long d'une courbe de forme quelconque, appelée directrice, passant par leur centre de gravité et normale en chaque point au plan du courant.

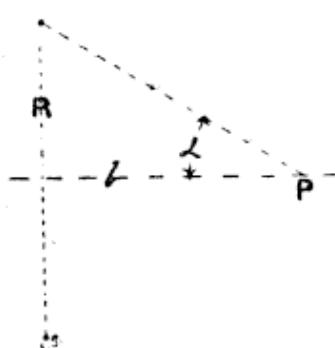


FIG. 101.

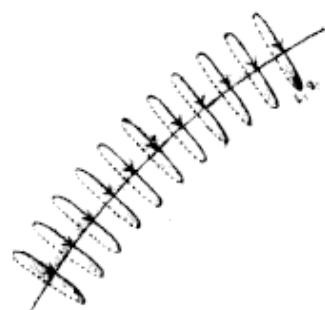


FIG. 102.

Soient s la surface des courants, ε leur distance et i leur intensité. Chacun d'eux peut être remplacé par un feuillet de même contour, de puissance i et d'épaisseur ε .

σ étant la densité magnétique de chacune des faces des feuillets on aura $i = \varepsilon \sigma$ ou $\sigma = \frac{i}{\varepsilon} = i n_i$, n_i étant le nombre de courants par unité de longueur. Nous nous retrouvons ici dans le cas du filet solénoïdal. Les faces magnétiques de signes contraires en regard s'équilibrent mutuellement et il reste aux extrémités de la série, des pôles de masse $m = \pm i n_i s$.

Bobine cylindrique. Force magnétisante. — On obtiendra exactement le même effet qu'avec un solénoïde et l'on arrivera ainsi aux cas à considérer effectivement dans la pratique, en enroulant le fil en spires serrées et presque normales à l'axe du cylindre. Conformément à ce que nous avons vu pour le courant

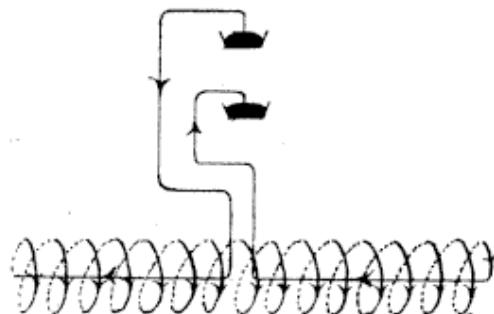


FIG. 103.

sinueux, une spire équivaut à un courant circulaire plus un courant rectiligne de longueur égale au pas. L'action de cette partie est négligeable. On peut d'ailleurs l'annuler, en ramenant le fil intérieurement suivant l'axe (fig. 103) ou en enroulant une seconde couche

dont les spires sont inclinées également en sens inverse.

L'épaisseur des couches étant supposée négligeable devant leur diamètre, les pôles résultant de la bobine ont pour valeur :

$$m = \pm i n_i s$$

n_i étant le nombre de spires par unité de longueur et s leur surface moyenne. Le moment magnétique de la bobine, dont le nombre total de spires est n et la longueur l a pour expression

$$m l = i n s.$$

Une telle bobine, parcourue par un courant, jouit de toutes les propriétés magnétiques d'un aimant cylindrique uniforme.

En ramenant ses deux extrémités suivant son axe et la suspendant par les deux bouts plongeant dans deux godets à

mercure situés sur la verticale de son centre de gravité, on verra qu'elle se comporte exactement comme un aimant.

Dès que le courant passe, son axe vient se placer dans le méridien, la face négative dirigée vers le sud. On peut répéter avec elle toutes les expériences d'attraction et de répulsion des pôles de noms contraires ou de mêmes noms en se servant, soit d'un aimant, soit d'un autre cylindre.

L'action de la bobine sur l'unité de pôle située extérieurement sur son axe du côté de la face positive est, ω et ω' exprimant les angles solides sous lesquels on voit du point considéré les couches terminales positive et négative (fig. 104)

$$\mathcal{H} = \sigma (\omega - \omega').$$

Si l'unité de pôle se trouve *dans le plan de la base* (positive ou nord), cette équation devient

$$\mathcal{H} = \sigma (2\pi - \omega).$$

On aura l'expression du champ *en un point intérieur de la bobine*, en supposant celle-ci scindée en deux tronçons par une section plane contenant le point considéré. De la part du cylindre de droite dans la face négative duquel elle se trouve, l'action est $-\sigma (2\pi - \omega)$. De la part du cylindre de gauche $+\sigma (2\pi - \omega)$. L'action attractive du premier cylindre ayant lieu dans le même sens que l'action répulsive du second, les deux actions s'ajoutent. Nous l'indiquerons en changeant le signe de la première expression, de sorte que l'effet résultant est

$$\mathcal{H} = \sigma (4\pi - \omega - \omega'). \quad (1)$$

Au cas où le cylindre s'étend très loin du point considéré, les angles ω et ω' deviennent négligeables devant 4π et il reste

$$\mathcal{H} = 4\pi\sigma = 4\pi n_1 i.$$

Telle est la valeur de la *force magnétisante* de la bobine. C'est aussi le flux par unité de section normale du cylindre et le flux total est par conséquent

$$\mathcal{H} = 4\pi n_1 i s.$$

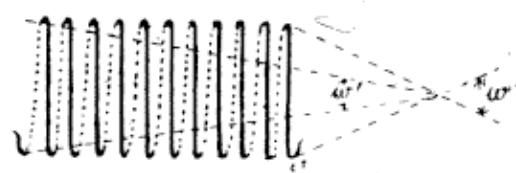


FIG. 104.

L'expression (1) montre que le champ décroît vers les extrémités de la bobine, l'un des angles ω ou ω' prenant alors plus d'importance. De fait, comme on peut s'en assurer au moyen du fantôme magnétique, un certain nombre de lignes de force sortent de l'enroulement vers ses extrémités, sans traverser toutes les spires. Le champ magnétique ne peut donc être considéré comme constant et dirigé parallèlement à l'axe du cylindre, que dans la partie moyenne d'une longue bobine où sa valeur est $\mathcal{H} = 4\pi n_i i$, n_i étant le nombre de spires par unité de longueur.

Direction du champ dans la bobine. — En se reportant à la règle d'Ampère, on voit facilement que *la direction du champ à l'intérieur de la bobine est donnée par le mouvement d'avancement d'un tire-bouchon tournant dans le sens du courant*.

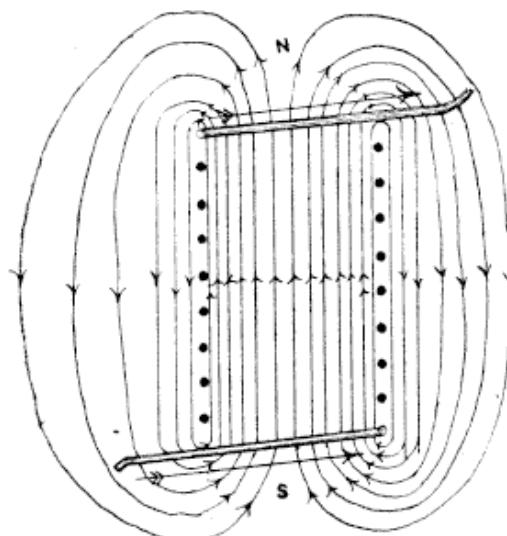


FIG. 105.

La direction est inverse dans l'air ambiant extérieur où le faisceau de lignes de force s'épanouit pour venir rentrer dans la bobine par sa face sud (fig. 105). On peut encore dire que le pôle nord est à la gauche du courant, en se plaçant le long des spires

dans le sens du courant, celui-ci entrant par les pieds.

L'espace emprunté par les lignes de force s'appelle *circuit magnétique*.

Induction dans un long électro-aimant. — Un cylindre de fer doux placé à l'intérieur et parallèlement à l'axe d'une bobine parcourue par un courant, s'aimante uniformément. On a constitué ainsi un électro-aimant.

Si l'action des couches terminales est négligeable, la force magnétisante reste égale à celle de la bobine.

L'intensité d'aimantation est :

$$\mathfrak{J} = \mathfrak{x} \mathcal{H} = 4\pi n_i i \text{ et l'induction}$$

$$\mathfrak{B} = \mu \mathcal{H} = (1 + 4\pi \mathfrak{x}) 4\pi n_i i; \text{ le flux total } \mathcal{N} = \mathfrak{B} s.$$

C'est en se servant d'un tel électro-aimant dont on mesure le moment par une des méthodes précédemment étudiées, qu'ont été réalisées la plupart des expériences donnant les courbes d'aimantation. On annule l'action de la bobine elle-même sur l'aiguille, en lui opposant une bobine identique parcourue par le même courant.

POLES CONSÉQUENTS. — Si le sens de l'enroulement de la bobine est renversé le long du barreau, celui-ci présentera des *points conséquents* (fig. 106), et les pôles rencontrés seront alternativement de

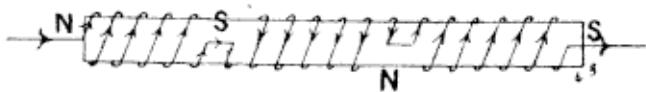


FIG. 106.

signes contraires, les pôles des extrémités étant de noms contraires ou de mêmes noms, suivant que le nombre de renversements est pair ou impair.

Aimant annulaire. — Enroulons uniformément sur un tore en matière magnétique les spires magnétisantes (fig. 107). Le système tout entier pourra être assimilé à un faisceau de filets solénoïdaux accolés dont l'action extérieure sera nulle. Tous ces filets solénoïdaux ne sont pas identiques, attendu qu'ils sont constitués par un même nombre d'aimants élémentaires, également répartis sur des circonférences de longueurs inégales.

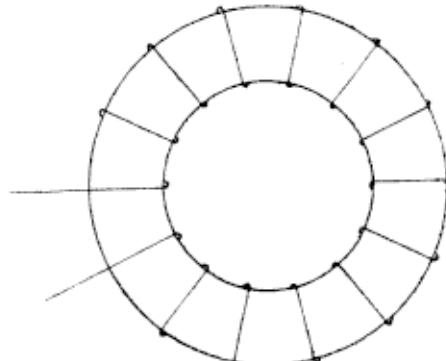


FIG. 107.

Mais si la section du tore est négligeable par rapport à son diamètre, on peut supposer tous les filets identiques au filet moyen et dès lors, n étant le nombre total de spires réparties sur la longueur l de la circonférence moyenne, l'induction sera

$$\mathfrak{B} = \mu \mathcal{M} = \mu 4 \pi \frac{n}{l} i = \mu 4 \pi n_i i$$

et le flux total $\mathfrak{N} = \mathfrak{B} s = \mu 4 \pi n_i i s$.

On déduirait encore cette expression en évaluant le travail effectué par un pôle unité parcourant la circonférence moyenne du tore. Ce travail est $\mathcal{M}l$. Mais en vertu d'un théorème précédemment démontré il est aussi égal à $4 \pi n_i i$, d'où la valeur de \mathcal{M} .

En augmentant graduellement la force magnétomotrice et mesurant chaque fois l'induction acquise par un échantillon

qui n'a jamais été aimanté, on dresse des tableaux caractérisant les diverses substances au point de vue magnétique. Ils permettent de tracer des courbes analogues à celles de la figure 108 dans laquelle nous

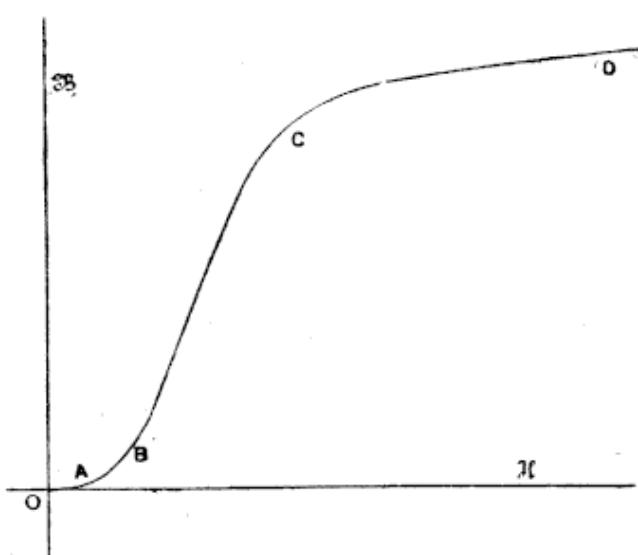


FIG. 108.

retrouvons toutes les particularités vues à propos de l'intensité d'aimantation lors de l'étude du magnétisme.

Voici un tableau relatif à des matériaux de provenance anglaise.

FER FORGÉ RECUIT			FONTE GRISE		
H	B	μ	H	B	μ
2	5 000	2 500	5	4 000	800
4	9 000	2 250	10	5 000	500
5	10 000	2 000	21,5	6 000	279
6,5	11 000	1 692	42	7 000	166
8,5	12 000	1 412	80	8 000	100
12	13 000	1 083	127	9 000	71
17	14 000	823	188	10 000	53
28,5	15 000	526	292	11 000	37
52	16 000	308			
105	17 000	161			
200	18 000	90			
350	19 000	54			

Circuits magnétiques parfaits et imparfaits. — Dans les conditions expérimentales où nous venons de nous placer, le circuit magnétique peut être dit *parfait*; toutes les lignes de force restent confinées dans le tore.

Il n'en est plus de même quand le tore n'est pas complet ou quand l'enroulement ne le recouvre pas complètement. Lorsque le tore est incomplet, les masses magnétiques se développant à ses extrémités libres exercent un effet démagnétisant qui réduit beaucoup le flux induit et celui traversant l'entrefer. Lorsque c'est l'enroulement qui est incomplet (fig. 109), une partie plus ou moins considérable du flux magnétique quitte le fer pour se dériver à travers l'air. On a affaire, dans ces deux derniers cas, à un circuit magnétique *imparfait*.

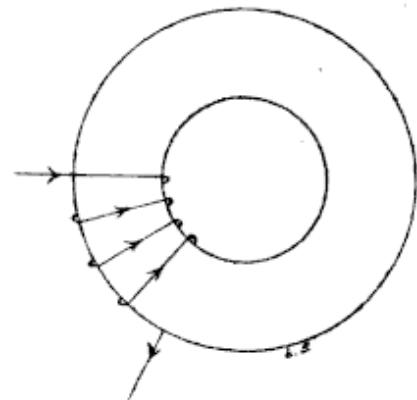


FIG. 109.

Force magnétomotrice. Réductance. — Reprenons la formule :

$$\mathcal{N} = \mathcal{B}s = \mu 4\pi n_i i s = \mu \frac{4\pi n_i s}{l} = \frac{4\pi n_i}{\mu s}$$

Sous cette forme, elle est entièrement semblable à la loi d'Ohm : \mathcal{N} flux magnétique correspond au flux électrique, à l'intensité ; $4\pi n_i$ correspond à la force électromotrice ou à la différence de potentiel et on lui donne, pour cette raison, le nom de *force magnétomotrice* ou différence de potentiel magnétique ; elle se représente par \mathcal{F} . Enfin le dénominateur correspond, au point de vue magnétique, à la résistance électrique ; c'est la *résistance magnétique ou réductance*, on la représente par \mathcal{R} .

L'unité de réductance porte le nom d'oersted. C'est la réductance qu'offre au passage des lignes de force, un cube d'air d'1 cm de côté, le flux entrant par une face et sortant par l'autre.

L'oersted, comme d'ailleurs le gauss et le maxwell, est une unité C. G. S. dérivée.

La formule précédente peut donc s'écrire $\mathcal{F} = \mathcal{N} \mathcal{R}$ et s'énoncer : *La force magnétomotrice ou différence de potentiel magnétique est égale au produit du flux par la réductance du circuit.*

On remarquera que l'expression de la réductance $\mathcal{R} = \frac{l}{\mu s}$ est de forme entièrement analogue à celle de la résistance

$R = \frac{l}{c s} \cdot c$, la conductibilité, marque l'aptitude du corps dont est fait le conducteur à véhiculer le flux électrique ; elle correspond exactement à la perméabilité, qui marque la capacité du corps dont est façonné le circuit magnétique, à absorber le flux magnétique.

L'analogie ne réside toutefois que dans la structure des formules car, alors que c la conductibilité ne varie qu'avec la nature et la température du conducteur, μ varie non-seulement avec ces quantités, mais encore avec l'induction et les états magnétiques antérieurs par lesquels le corps a passé.

Application des lois de Kirchhoff au circuit magnétique. — Quoi qu'il en soit, et sous la réserve que μ est essentiellement variable avec les facteurs que nous venons d'indiquer on pourra, en considérant que les lignes de force forment toujours des circuits fermés soit dans les corps magnétiques, soit dans l'air ou les autres corps non-magnétiques, appliquer aux flux magnétiques et aux réluctances les lois de Kirchhoff.

Réluctances en tension. — Prenons le cas d'un circuit hétérogène comportant des réluctances $\mathfrak{R}', \mathfrak{R}'', \mathfrak{R}''' \dots$ placées en série. La réluctance totale $\mathfrak{R} = \mathfrak{R}' + \mathfrak{R}'' + \mathfrak{R}''' + \dots$ et la force magnétomotrice totale nécessaire pour le faire traverser par le flux \mathfrak{N} .

$$\mathfrak{F} = \mathfrak{N} (\mathfrak{R} + \mathfrak{R}' + \mathfrak{R}'' + \dots).$$

Réluctances en dérivation. — Si les flux partiels sont dérivés $\mathfrak{N} = \mathfrak{N}' + \mathfrak{N}'' + \dots$ tandis qu'on trouverait pour la réluctance combinée, par un raisonnement entièrement semblable à celui employé pour trouver la résistance combinée :

$$\mathfrak{R}_c = \frac{1}{\sum \frac{1}{\mathfrak{R}}}$$

Les diverses réluctances partielles devraient se calculer en prenant pour μ les valeurs correspondant aux états magnétiques atteints dans les diverses dérivations.

Coefficient d'Hopkinson. — Dans le cas de la dérivation à travers l'air, il naît une difficulté du fait que l'on ne peut définir exactement le circuit emprunté par les lignes de force.

Soit à produire un certain flux \mathcal{N}' dans la partie B (fig. 110) d'un anneau incomplètement recouvert. Appelons \mathcal{N}'' le flux dérivé dans l'air, \mathcal{R}' et \mathcal{R}'' les réluctances respectives du fer et de l'air, \mathcal{N} le flux total développé par l'enroulement. L'application des lois de Kirchhoff nous donnera pour le flux \mathcal{N}' la valeur :

$$\mathcal{N}' = \mathcal{N} \frac{\mathcal{R}''}{\mathcal{R}' + \mathcal{R}''} \text{ d'où } \mathcal{N} = \frac{\mathcal{R}' + \mathcal{R}''}{\mathcal{R}''} \mathcal{N}' = \nu \mathcal{N}'$$

c'est-à-dire qu'il faudra produire en A un flux \mathcal{N} plus grand que \mathcal{N}' . Le facteur plus grand que l'unité ν s'appelle *coefficient de perte de flux ou coefficient d'Hopkinson*. \mathcal{R}'' ne pouvant être évalué directement, on détermine ν expérimentalement aussi exactement que possible.

En somme, les choses se passent dans ce cas, *comme si la réluctance de la partie \mathcal{N}' du noyau supposée exister seule était devenue ν fois plus grande*. Au point de vue du calcul de la force magnétomotrice nécessaire il faudra donc multiplier par ν la réluctance de cette partie du noyau.

Force magnétomotrice nécessitée par un circuit hétérogène portant un enroulement incomplet. — Soit un circuit hétérogène constitué par divers noyaux placés en série, dont une partie seulement porte des enroulements, présentant les réluctances \mathcal{R} , \mathcal{R}' , ... dont plusieurs n'absorbent pas complètement le flux émis par les enroulements. On aura

$$\mathcal{N} = \frac{4\pi n i}{\mathcal{R} + \nu' \mathcal{R}' + \nu'' \mathcal{R}'' + \dots}$$

d'où $4\pi n i = \mathcal{N} \mathcal{R} + \mathcal{N} \nu' \mathcal{R}' + \mathcal{N} \nu'' \mathcal{R}'' + \dots$

Mais pour faire traverser tout le circuit magnétique par le flux \mathcal{N} , il faut disposer des forces magnétomotrices $4\pi n' i = \mathcal{N} \mathcal{R}$, $4\pi n'' i = \mathcal{N} \nu' \mathcal{R}'$, ... ce qui montre la manière dont se décompose la force magnétomotrice totale nécessaire $4\pi n i$.

GILBERTS ET AMPÈRES-TOURS. — Les formules écrites ci-dessus étant en unités C. G. S., si i est exprimé en ampères, il faudra

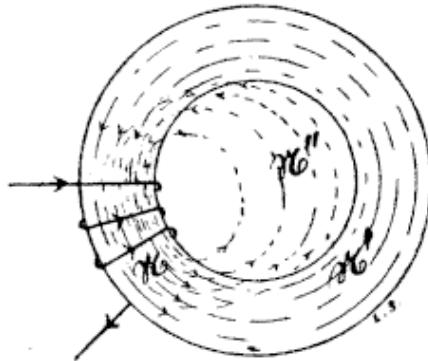


FIG. 110.

les multiplier par 10^{-4} , l'unité pratique l'ampère correspondant au dixième de l'unité C. G. S. On a donc

$$\mathcal{F} = \frac{4\pi n i}{10}$$

unités C. G. S., i étant exprimé en ampères.

L'unité C. G. S. de force magnétomotrice s'appelle gilbert. C'est la force magnétomotrice nécessaire pour faire passer un flux égal à une unité C. G. S. ou maxwell dans une réluctance égale à 1 unité C. G. S. ou oersted. 1 gilbert = 1 maxwell \times 1 oersted.

Le produit $n i$ porte le nom d'ampères-tours. L'ampère-tour correspond à une seule spire traversée par un ampère. Quand dans la formule précédente, $n i = 1$, la force magnétomotrice $\mathcal{F} = \frac{4\pi}{10}$ gilberts. C'est la force magnétomotrice due à un ampère-tour. Donc, lorsque la force magnétomotrice est donnée en ampères-tours, il suffit de la multiplier par $\frac{4\pi}{10}$ pour l'obtenir en unités C. G. S. ou gilberts et vice-versa on réduira une force magnétomotrice exprimée en gilberts en ampères-tours, en la multipliant par $\frac{10}{4\pi}$, soit approximativement 0,8.

L'inverse de la perméabilité s'appelle la *réluctivité*.

APPLICATION. — Cherchons le nombre d'ampères-tours à enrouler sur un noyau annulaire en fer doux d'une longueur de $0^m 14$ suivant l'axe, d'une section de 2 centimètres carrés, pour y faire passer un flux de 30 000 maxwells, soit le soumettre à une induction de 15 000 gauss.

Nous trouvons dans le tableau de la page 178, qu'à l'induction de 15 000 correspond pour le fer doux une perméabilité de 526. Donc $\mu = 526$, $l = 14$, $s = 2$, $\mathcal{N} = 30\ 000$. En remplaçant les lettres par leur valeur dans la dernière formule, il vient :

$$30\ 000 = \frac{4\pi n i \cdot 10^{-4}}{\frac{14}{526 \cdot 2}}, \text{ d'où } n i = 318 \text{ ampères-tours,}$$

ce que l'on pourra réaliser, par exemple, au moyen de 100 spires traversées par un courant de 3,18 A.

Influence d'un entrefer sur la réluctance d'un circuit. — Par définition la perméabilité de l'air est égale à l'unité. La réluctance d'un circuit composé d'une masse en fer, de longueur l sous la section s possédant la perméabilité μ et d'un volume d'air $l' \times s'$ est

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu s} + \frac{l'}{s'}.$$

μ atteignant dans les parties de la courbe utilisées dans les machines la valeur 1 000, le second terme sera, en général, très important, et il y aura avantage, afin de réduire la dépense de courant nécessaire pour produire un flux donné \mathfrak{N} , de diminuer le plus possible l'entrefer.

APPLICATION. — Reprenons notre noyau annulaire de 14 centimètres de longueur et d'une section de 2 centimètres carrés. Pratiquons-y une section droite, puis écartons les lèvres de la section d'un centimètre. Supposons que la section du flux dans l'entrefer reste égale à celle du fer et calculons le nombre d'ampères-tours qui sera dès lors nécessaire pour faire encore traverser le noyau par un flux de 30 000 maxwells.

Nous aurons

$$\mathfrak{N} = \frac{4 \pi n i \cdot 10^{-4}}{\frac{l}{\mu s} + \frac{l'}{s}},$$

dans laquelle $\mathfrak{N} = 30 000$, $l = 14$, $\mu = 526$, $s = 2$, $s' = 2$ et $l' = 1$, d'où $n i = 12 260$, soit 38,6 fois plus qu'avant !

A densité constante du courant et à égalité de volume occupé par l'enroulement, la force magnétomotrice reste constante. — En effet, I étant le courant total traversant le conducteur, i la densité du courant ou $\frac{I}{s}$ on a

$$4 \pi n I = 4 \pi n i s = 4 \pi i S.$$

Puisque i est constant, on peut découper la surface totale transversale S du conducteur de la bobine de quelque manière que l'on veut, sans modifier son effet.

On remarquera également que la chaleur dégagée par le passage du courant ne varie pas non plus. L'effet Joule est $I^2 R$. Appelons d le diamètre du fil nu utilisé, $D = d(1 + k)$ le diamètre du fil revêtu de son isolant, l sa longueur, ρ la résistance spécifique en ohms.

On a

$$R = \frac{4 \rho l}{\pi d^2}, I = \frac{\pi d^2}{4} i, \text{ effet Joule } W = R I^2 = \frac{\pi d^2 i^2 \rho l}{4}.$$

Le volume occupé par le fil

$$V = \frac{\pi D^2 l}{4} = \frac{\pi d^2 (1 + k)^2 l}{4}.$$

Tirant de cette expression la valeur de d^2 et la portant dans la précédente il vient

$$W = \frac{V \rho i^2}{(1 + k)^2}$$

quantité constante si i et V restent invariables.

Force portante d'un électro-aimant. — Nous avons trouvé précédemment, que la force nécessaire pour rompre un aimant placé dans un champ magnétique était, par unité de section normale à l'aimant et à la direction du champ, $2\pi \mathfrak{J}^2 + \mathfrak{H} \mathfrak{J}$. S'il s'agit d'un électro-aimant, il y a encore lieu d'y ajouter la force nécessaire pour séparer en deux tronçons la bobine magnétisante supposée indéfinie. L'intensité magnétique des pôles développés tout le long de son axe (et neutralisés l'un par l'autre) est $m = \pm n_i i$. Il en résulte une force portante par unité de surface $2\pi m^2 = 2\pi n_i^2 i^2$. Mais $\mathfrak{H} = 4\pi n_i i$ d'où $n_i i = \frac{\mathfrak{H}}{4\pi}$. Remplaçant il vient $\frac{\mathfrak{H}^2}{8\pi}$.

La force nécessaire par unité de section pour produire la rupture du noyau de l'électro sera dès lors :

$$2\pi \mathfrak{J}^2 + \mathfrak{H} \mathfrak{J} + \frac{\mathfrak{H}^2}{8\pi} = \frac{(\mathfrak{H} + 4\pi \mathfrak{J})^2}{8\pi} = \frac{\mathfrak{B}^2}{8\pi}$$

et la force totale d'arrachement $P = \frac{\mathfrak{B}^2 S}{8\pi}$.

Section à donner au noyau. — On adopte généralement la forme circulaire, afin d'économiser la longueur de fil nécessaire, la section circulaire étant la surface que possède un périmètre minimum. Cependant on admet parfois la section carrée pour augmenter la compacité de l'appareil. Cette forme exige, non-seulement une plus grande longueur de fil, mais elle favorise les pertes de flux, les lignes de force ayant une ten-

dance à se concentrer sur les arêtes et à rayonner par celles-ci dans l'air ambiant.

Fil à utiliser. — On emploie du fil en cuivre le plus pur possible, pour réduire l'échauffement. Quand la section est très forte, on la rend parfois plus maniable en la constituant au moyen de brins cordés ou de bandes superposées. Ces dernières présentent l'avantage de réduire l'espace perdu.

FAIBLE TENSION. — Le fil des petites bobines est généralement isolé à la soie. Comme les parties extérieures et terminales sont particulièrement exposées au point de vue mécanique, il y a lieu de les renforcer en les constituant d'un conducteur de plus fort diamètre.

MOYENNE TENSION. — Pour tensions moyennes, le fil se recouvre de deux ou trois couches de coton ou d'une tresse de même substance.

HAUTE TENSION. — Quand il s'agit de hautes tensions, les couches successives de fil sont séparées par du coton imprégné de gomme laque, de la fibre vulcanisée, du mica ou de l'ébonite. On subdivise parfois l'enroulement par des cloisons en ébonite normales à l'axe. On évite ainsi le voisinage immédiat de conducteurs à potentiels très différents, lesquels pourraient provoquer la formation d'étincelles perçant l'isolant.

Calcul d'un électro-aimant. — Les considérations développées précédemment indiquent nettement la voie à suivre dans la construction des électro-aimants : employer les matériaux le plus perméables possible ; éviter les entrefer et même les joints qui, quelque bien rodés qu'ils soient, présentent toujours une certaine réluctance. La forme en fer de cheval d'une pièce est la plus avantageuse.

La puissance d'un électro-aimant se mesure par la force portante qu'il est capable de développer. Nous avons trouvé pour celle-ci :

$$P = \frac{\mathfrak{B}^2 S}{8\pi}.$$

Pour une force portante déterminée, il y a intérêt, afin d'économiser les matériaux, d'admettre pour \mathfrak{B} la plus grande valeur possible, puisqu'alors S acquerra sa valeur minimum.

Or, si l'on examine la courbe du magnétisme, on voit qu'il n'est pas avantageux de dépasser l'induction de 16 000, parce qu'au-delà, les accroissements de l'induction deviennent de plus en plus faibles par rapport à ceux de la force magnétisante. On se donnera donc $\mathfrak{B} = 16\ 000$. Dès lors, si P est connu, S est déterminé, et le problème du calcul d'un électro-aimant apte à développer une force portante fixée revient à la détermination des bobines capables de produire l'induction \mathfrak{B} .

Il faudra, en outre, avoir soin de donner aux parois latérales de la ou des bobines, une surface assurant une dissipation suffisante de la chaleur dégagée par effet Joule. On admet généralement pour les grandes bobines des machines industrielles 10 à 20 cm² par watt dépensé.

APPLICATION. — *Quelles sont les dimensions et le nombre de spires d'un électro-aimant qui, traversé par un courant de 5 ampères, développe une force portante de 25 kilogrammes ?*

Le kilogramme correspondant à 981 000 dynes et $\mathfrak{B} = 16\ 000$, la formule écrite précédemment donne

$$S = \frac{25 \cdot 981\ 000 \cdot 8 \cdot 3,14}{16\ 000} = 2,4 \text{ centimètres carrés.}$$

Adoptons pour notre électro-aimant la forme en fer à cheval. Comme nous aurons alors deux couples de surfaces portantes ayant la même efficacité (surfaces de contacts de l'armature et des noyaux), nous pourrons prendre une section moitié moindre, soit 1,2 centimètre carré.

Nous avons vu que le flux

$$\mathfrak{N} = \frac{4\pi ni\mu S}{10l} \text{ ou } 4\pi ni = \frac{10\mathfrak{N}l}{\mu S} = \frac{10\mathfrak{B}l}{\mu},$$

i étant exprimé en ampères. Telle est la force magnéto-motrice nécessaire.

La table donnée plus haut montre que, pour l'induction 16 000, la perméabilité est égale à environ 300 ; l sera mesuré sur l'épure de l'électro-aimant que l'on aura pu dresser dès que l'on connaît S . Admettons 14 centimètres.

$$4\pi ni = \frac{10 \cdot 16\ 000 \cdot 14}{300} = 7\ 460,$$

d'où $ni = 594$, et enfin i étant égal à 5, le nombre total de

spires sera $\frac{594}{5} = 118$, soit enfin 59 spires pour chacune des bobines chaussant les branches de l'électro-aimant. Le fil utilisé aura une section de 2,5 millimètres carrés, si l'on admet une densité de courant de 2A par millimètre carré. On enroulera le fil de manière à obtenir une surface de refroidissement suffisante.

FORME A DONNER AUX EXTRÉMITÉS POLAIRES. — Reprenons la formule

$$P = \frac{\mathfrak{B}^2 S}{8\pi},$$

dans laquelle S représente la surface de contact supposée égale à celle des noyaux. Si on la réduit progressivement, les lignes de force vont s'y concentrer vu la grande réluctance du milieu ambiant. \mathfrak{B} augmentera et, dans certaines limites, la force portante également. Le maximum d'effet sera donc obtenu en donnant aux extrémités polaires une forme conique que l'on remarque dans les appareils de levage et ceux utilisés en chirurgie pour l'extraction des objets en fer de l'organisme.

Divers types d'électro-aimants. — ELECTRO-AIMANT DROIT. L'électro-aimant présente un noyau droit (fig. 111) sur lequel le fil conducteur, généralement isolé par du coton ou de la soie, est bobiné par couches superposées enroulées toujours dans le même sens de gauche à droite dans une couche, puis de droite à gauche dans la suivante et ainsi de suite. Le fil est retenu latéralement par deux joues en matière isolante, ébonite, buis, etc.

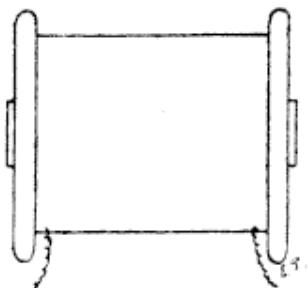


FIG. 111.

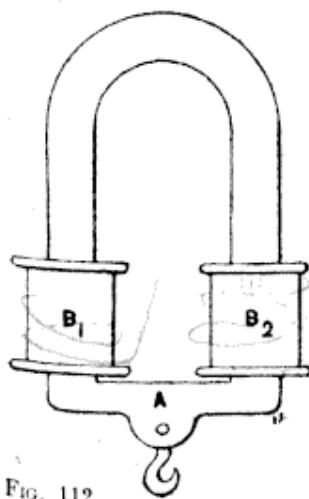


FIG. 112.

FER A CHEVAL. — Dans l'électro-aimant en fer à cheval, le noyau est recourbé de manière à présenter deux branches parallèles dont on chausse les extrémités des deux bobines magnétisantes B_1, B_2 (fig. 112). Celles-ci sont enroulées dans le même sens si l'on suit l'axe du noyau ; en sens inverse si l'on regarde les bobines par les extrémités du noyau. Une armature A permet de fermer le circuit magnétique et ainsi d'augmenter considérablement la force attractive des pôles.

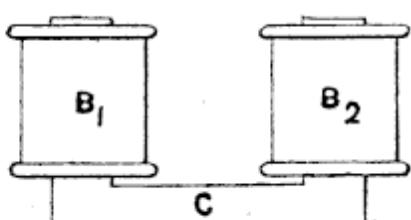


FIG. 113.

Souvent le fer à cheval est constitué de trois pièces (fig. 113), deux noyaux droits parallèles chaussés des bobines B_1 , B_2 , leurs extrémités en regard étant réunies d'un côté par une culasse en fer doux C .

ELECTRO POLARISÉ. — Lorsqu'on veut disposer d'électro-aimants très sensibles, on donne aux noyaux une aimantation permanente (fig. 114) en utilisant par exemple un aimant permanent en fer à cheval, dont les extrémités portent les noyaux en fer doux des électros. On amène ainsi le magnétisme des noyaux dans un état tel que le moindre renforcement de la force magnétisante produit une grande augmentation du magnétisme (partie droite de la courbe du magnétisme).

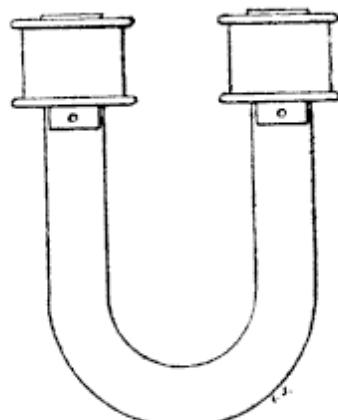


FIG. 114.

ELECTRO-AIMANT CUIRASSÉ. — On arrive encore à obtenir deux surfaces portantes mais avec une seule bobine et sans recourir au fer à cheval, en entourant la bobine d'un anneau cylindrique C en fer, venant se poser sur la culasse B .

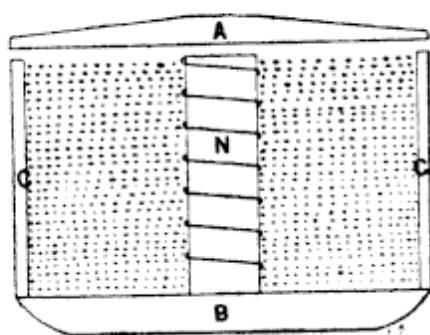


FIG. 115.

L'armature A est ainsi attirée par le noyau et l'anneau. Cet électro-aimant possède une forme très compacte, la réluctance est faible, mais on ne peut y tolérer de fortes densités de courant dans la bobine, son refroidissement étant fortement enrayé par la cuirasse qui l'entoure.

ARMATURE A DÉPLACEMENT LATÉRAL. — Dans tous les électro-aimants que nous venons d'étudier, le déplacement de l'armature s'effectue dans le sens des lignes de force, augmentant directement l'entrefer, ce qui réduit rapidement le flux utile et par suite l'intensité des pôles et la force attractive.

Quand on veut disposer de déplacements longs, se faisant sous des efforts considérables, il convient de conserver un

entrefer réduit d'un bout à l'autre de la course en ne permettant à l'armature qu'un mouvement latéral. C'est le cas pour l'électro-aimant (fig. 116) dans lequel l'armature A suspendue à des ressorts R R, tend à obliquier vers la droite pour se placer symétriquement aux axes des noyaux.

SOLÉNOÏDES A NOYAU MOBILE. — Lorsque la course de l'armature doit être

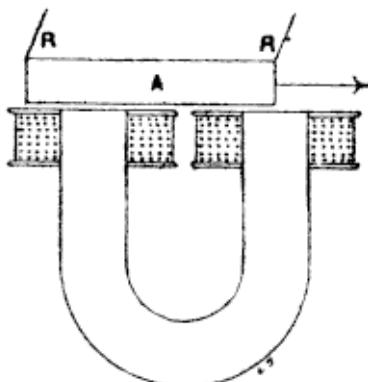


FIG. 116.

considérable, pour une faible variation de la force attractive, on met à contribution l'effort de succion d'un solénoïde allongé A A (fig. 117) sur un noyau cylindrique B.

Le noyau B s'aimante par influence et est attiré vers l'axe du solénoïde avec une force proportionnelle au produit de l'intensité du champ que développe la bobine par l'intensité du pôle induit. Le noyau étant suffisamment long, on pourra négliger l'influence répulsive de son extrémité supérieure. Au fur et à mesure qu'il descendra, la force augmentera en raison du renforcement du champ dû à la diminution de la

réductance, puis la force diminuera par suite de la diminution du champ vers l'extrémité de la bobine, pour enfin s'annuler quand le noyau, placé symétriquement par rapport à l'enroulement, absorbe un flux maximum.

On régularise l'effort attractif exercé sur le noyau quand la course est considérable, soit en lui donnant une forme conique, soit en lui laissant sa forme cylindrique et le constituant de rondelles en fer séparées par des rondelles isolantes d'épaisseur d'autant plus grande que l'on approche plus de l'extrémité plongeante du noyau.

SOLÉNOÏDES CUIRASSÉS A NOYAU MOBILE. — Les derniers appareils étudiés n'exercent, sur leurs noyaux, qu'un effort relativement faible, en raison de la grande réductance de leur circuit magnétique. On diminue celle-ci en cuirassant la bobine

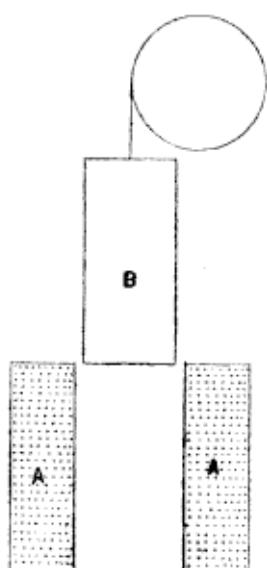


FIG. 117.

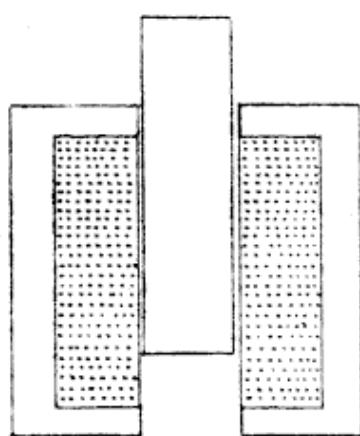


FIG. 118.

comme l'indique la figure 118. A remarquer que, dans ce cas, l'influence magnétique extérieure étant nulle, le noyau n'est attiré que lorsqu'il est introduit dans un des orifices de la cuirasse.

ELECTRO-AIMANT DE RUHMKORFF. — Destiné à produire des champs très intenses. Il est constitué par un noyau en fer doux d'une pièce, doublement coudé N_1 , N_2 , N_3 (fig. 119), portant les bobines magnétisantes B_1 , B_2 , B_3 .

Les noyaux des bobines B_1 et B_3 , qui ont le même axe, sont filetés et peuvent être rapprochés à volonté. En outre, ils sont percés à leur centre d'un canal que l'on obture, s'il y a lieu, au moyen d'un cylindre en fer doux.

Quand on doit disposer d'un champ uniforme, on munit les extrémités en regard des noyaux, d'armatures ayant la forme

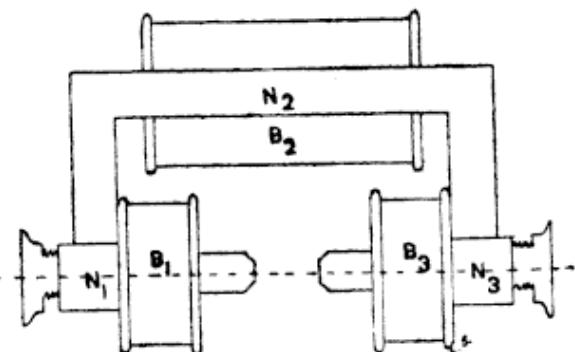


FIG. 119.

de disques. Si l'on veut obtenir des champs intenses, les armatures sont façonnées en troncs de cônes à 120° d'ouverture. Le champ peut alors atteindre 30 000 gauss pour une distance de 3 mm entre les bases des troncs de cônes.

INTERRUPEUR AUTOMATIQUE. — On utilise souvent l'électro-aimant pour provoquer des interruptions rythmées d'un circuit. A cet effet son enroulement est mis en rapport avec une source d'électricité A (fig. 120) et d'autre part avec le contact de repos D d'une armature constituée par un noyau magnétique B monté sur un ressort relié à l'autre pôle de la source par l'intermédiaire d'un interrupteur I. Le contact D est constitué par des rondelles platinées pour réduire l'oxydation due aux étincelles de rupture du circuit.

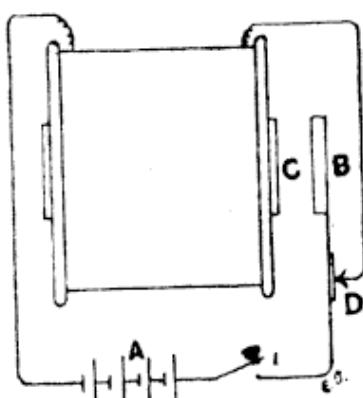


FIG. 120.

Quand on ferme l'interrupteur, le courant traversant l'électro aimante son noyau, lequel attire l'armature B. Celle-ci se déplaçant rompt le circuit en D, d'où disparition de l'aimantation, retour de B à sa position primitive sous l'action du ressort, refermeture du circuit et ainsi de suite.

Obtention des aimants en acier. AIMANT DROIT. — Pour aimanter un barreau d'acier, on le place symétriquement dans une bobine composée de quelques spires que l'on fait traverser par un courant intense. On promène la bobine d'une extrémité à l'autre et on la ramène enfin au milieu, après avoir passé le même nombre de fois au-dessus de chaque moitié et l'on interrompt le courant.

FER A CHEVAL. — S'il s'agit d'un aimant en fer à cheval, on utilise une bobine double dont le fil est enroulé en forme de 8, dans laquelle on engage les deux branches du fer à cheval et que l'on fait aller et venir le long des branches droites du fer. L'aimantation ainsi obtenue est intense et régulière.

Aimantation transversale. — Ce que nous avons vu jusqu'ici a trait à l'aimantation longitudinale. Supposons maintenant qu'autour d'un fil de cuivre droit isolé parcouru par un courant, nous enroulions un fil de fer en spires jointives. L'axe de ce fil se trouvant à la distance r de l'axe du fil de cuivre, le champ magnétique moyen agissant sur le fer aura pour valeur $\frac{2I}{r}$ et le fil de fer pourra être considéré comme constitué par la juxtaposition de filets solénoïdaux; l'effet magnétique extérieur sera nul. En déroulant le fil, on trouvera ses extrémités aimantées en sens inverses.

De la même manière un fil de fer traversé par un courant s'aimante transversalement, de sorte qu'en le sectionnant longitudinalement suivant son axe, on trouverait les arêtes opposées aimantées inversement.

CHAPITRE VIII.

Effets divers dus au champ magnétique.

a) Action sur la lumière.

Pouvoir rotatoire magnétique. — Placée dans une direction parallèle ou oblique par rapport aux lignes de force magnétiques, toute substance transparente, solide, liquide ou gazeuse, jouit de la propriété de faire tourner le plan de polarisation d'un rayon de lumière qui la traverse. L'effet est maximum dans le premier cas ; il est nul quand la direction des lignes de force et celle du rayon lumineux sont à angle droit ; il est proportionnel à la composante du champ suivant la direction du rayon pour les positions intermédiaires.

La rotation est moins grande pour les corps biréfringents que pour les monoréfringents. Parmi les solides, le verre pesant de Faraday (borosilicate de plomb) et parmi les liquides le sulfure de carbone sont le plus affectés.

L'expérience se réalise comme l'indique la figure 121. La

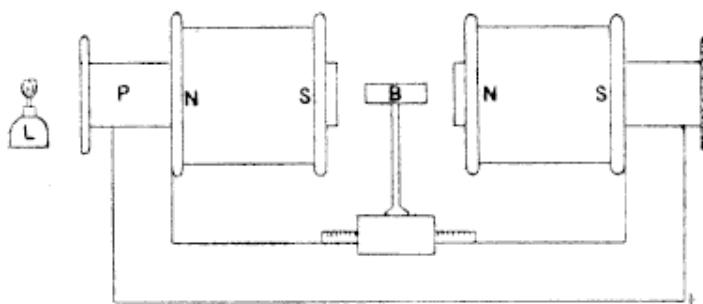


FIG. 121.

substance expérimentée se place en B sur un chariot mobile, entre les deux noyaux creux d'un électro-aimant de Faraday pourvu

d'un côté d'un polariseur P, de l'autre d'un analyseur A. La source de lumière se trouve en L.

La lumière étant homogène et l'analyseur à l'extinction, on constate que le rayon lumineux réapparaît quand on fait passer le courant. Il faut tourner l'analyseur d'un angle λ sur le limbe I pour le faire apparaître de nouveau. Le renversement du courant fait dévier le plan de polarisation en sens inverse d'un angle égal.

La rotation est dite *positive* quand elle a lieu dans le sens de la marche du courant. C'est le cas pour les substances diamagnétiques. Elle est *négative* dans le cas contraire. Les corps magnétiques font dévier le plan de polarisation les uns positivement, les autres négativement.

Loi de Verdet. — *La rotation du plan de polarisation entre deux points est proportionnelle à la différence de potentiel magnétique qui existe entre ces deux points, ou au travail produit par le déplacement de l'unité de pôle entre ces deux points.*

$$\theta = \rho (\mathcal{V} - \mathcal{V}') = \rho \mathcal{M} e$$

\mathcal{V} et \mathcal{V}' sont les potentiels magnétiques en deux points distants de e pris sur le trajet des rayons lumineux, ρ est la rotation que fournit la substance considérée, pour une différence de potentiel égale à l'unité. Elle porte le nom de *constante de Verdet*. La valeur de cette quantité varie à peu près en raison inverse du carré de la longueur d'onde, pour les diverses raies du spectre.

Galvanomètre optique. — L'équation écrite en dernier lieu nous donne un moyen commode de mesurer l'intensité d'un courant en valeur absolue.

Plaçons en effet une longueur e de la substance dans un champ uniforme, par exemple suivant l'axe d'une longue bobine possédant n_1 spires par unité de longueur et traversée par le courant i . L'intensité du champ ou différence de potentiel magnétique par centimètre aura pour valeur :

$$\mathcal{M} = 4\pi n_1 i.$$

θ étant la rotation observée on aura :

$$\theta = \rho 4\pi n_1 i e.$$

Moyennant la connaissance de θ , ρ , n_1 et e , i , sera connu.

On peut éluder la nécessité de posséder un enroulement uniforme à nombre de spires *connu* par unité de longueur, en enfermant simplement la substance polarisable, du sulfure de carbone par exemple, dans un long tube obturé par des glaces et entouré en son milieu par une bobine de forme quelconque, possédant n spires (fig. 122).

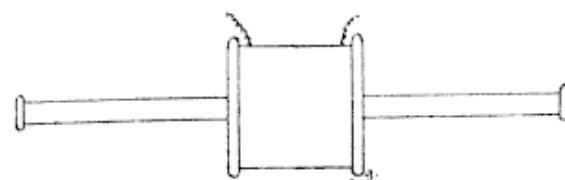


FIG. 122.

Le tube étant assez long pour que l'action de la bobine soit négligeable sur ses extrémités, le rayon lumineux qui le traverse passe d'un point où le potentiel magnétique est nul, à un autre où il atteint $4\pi ni$. On a donc :

$$\theta = \rho 4\pi ni.$$

Phénomène de Keer. — Tombant sur la surface polie d'un morceau de fer, un rayon de lumière polarisée dans un des azimuths principaux reste polarisé dans le plan primitif et peut être éteint par un analyseur. Si on aimante alors le fer, *la lumière reparait dans l'analyseur*.

Phénomène de Zeemann. — Dans celui-ci le champ n'agit plus sur un rayon en voie de propagation, mais bien sur un rayon en voie de formation.

Une flamme de sodium par exemple, est placée dans le champ d'un électro-aimant et l'on observe, au moyen d'un appareil dispersif, le rayon correspondant à l'une des raies D, soit dans la direction des lignes de force, soit normalement à celles-ci.

Dans la direction des lignes de force la raie D, simple avant l'établissement du champ, se dédouble sous l'action de celui-ci, en deux raies situées à égale distance de part et d'autre de la place qu'occupait la raie qui a disparu. Toutes des deux sont polarisées circulairement et en sens contraire. La plus réfrangible, c'est-à-dire celle dont la période est la plus courte, tournant dans le sens du courant.

Dans la direction perpendiculaire aux lignes de force, la ligne simple est remplacée, quand le champ magnétique agit, par trois raies dont la centrale occupe la position de la raie primitive. Toutes trois sont polarisées rectilignement : la médiane parallèlement aux lignes de force, les deux autres normalement.

Ces phénomènes varient avec les raies. Quelques-unes ne se dédoublent pas ; d'autres donnent un grand nombre de composantes.

b) Action sur le courant.

Phénomène de Hall. — Supposons une plaque rectangulaire métallique mince traversée par un courant amené suivant son axe de figure A B, (fig. 123) et se propageant de A vers B.

Les milieux des côtés C et D sont au même potentiel, comme l'accuse un galvanomètre G reliant ces deux points.

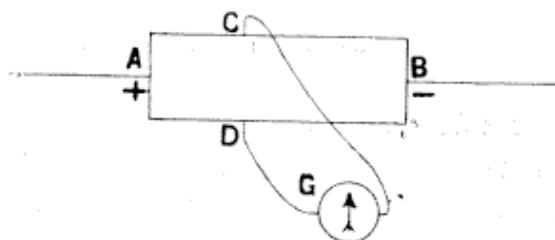


FIG. 123.

Mais, dès qu'un champ magnétique intense traverse normalement la plaque, une portion plus ou moins grande du courant se dérive dans le galvanomètre. Il en est de même pour une décharge instantanée.

L'électricité est entraînée dans le sens de la force électromagnétique, c'est-à-dire de D vers C dans la plaque et de C vers D à travers le galvanomètre pour le fer, le cobalt, le zinc ; en sens inverse ou de D vers C dans le galvanomètre pour le nickel, l'or, l'argent, le bismuth. L'effet est nul pour le platine et le plomb.

Appelons V_1 et V_2 les potentiels aux points C et D, R la résistance comprise extérieurement entre ces deux points, i l'intensité du courant dérivé et I l'intensité du courant principal. En vertu de la loi d'Ohm

$$V_1 - V_2 = E = i R.$$

D'autre part l'expérience montre que la loi du phénomène est donnée par la formule

$$E = K \frac{I \mathcal{H}}{e}$$

K étant une constante, \mathcal{H} l'intensité du champ et e l'épaisseur de la lame.

K possède les valeurs suivantes :

Bismuth	— 8580	Cobalt	+	2,40
Nickel	— 14	Fer	+	7,85
Or	— 0,66	Antimoine	+	14

le signe + indiquant que la déviation des courants concorde avec le sens de la force électromagnétique.

Pour le bismuth on remarque un autre phénomène, l'augmentation de la résistance quand il est plongé dans un champ magnétique. Cette augmentation de résistance peut servir à la mesure du champ (pince de Lenard).

c) Déplacements électromagnétiques.

Action du courant sur l'aiguille aimantée.— Soit un courant rectiligne perpendiculaire à la feuille de papier dont la trace est en A (fig. 124) et une aiguille aimantée N S. Nous savons

que les lignes de force du courant sont des circonférences concentriques à l'axe du conducteur. Par conséquent les surfaces équipo-tentielles sont des plans passant par cet axe et, puisque

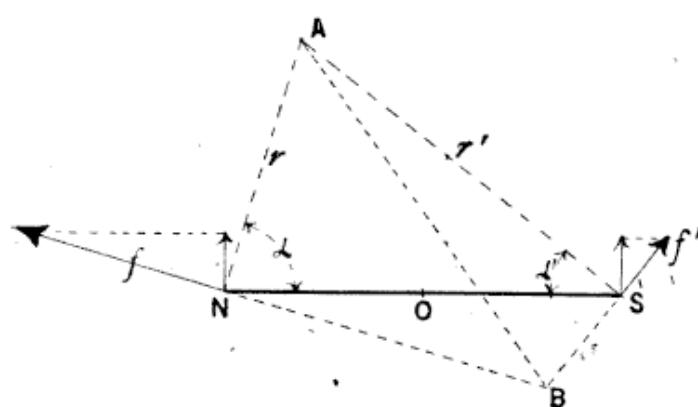


FIG. 124.

entre deux surfaces équipo-tentielles le travail effectué est le même, alors que les parcours suivant les lignes de force sont proportionnels à la distance à l'axe, nous en concluons que les intensités aux divers points sont inversement proportionnelles aux distances à l'axe. Cette propriété résulte d'ailleurs directement de la loi de Biot et Savart

$$f = \frac{2im}{r}.$$

En appelant f et f' les forces appliquées aux masses $+m$ et $-m$ de l'aiguille, r et r' leurs distances à l'axe, nous aurons

$$fr = f'r'.$$

Puisque la somme des moments est nulle par rapport au point A, c'est que la résultante des forces passe par ce point. Dans le cas de la figure, elle est dirigée vers le conducteur. Si l'aiguille était retournée ou si le courant passait en sens contraire, sa direction serait inverse. Ceci nous explique pourquoi,

dans l'expérience d'Arago, les grains de limaille s'attachent au conducteur.

Supposons maintenant l'aiguille mobile autour de son centre de figure O. Ses extrémités seront soumises à deux forces normales à sa direction, tendant à la faire tourner en sens inverse

$$f \cos x \text{ et } f' \cos x' = \frac{f r}{r'} \cos x'.$$

Si le point A se trouve sur la circonférence tracée sur NS comme diamètre, $x' = 90^\circ - x$ et les deux forces étant égales, l'aiguille est en équilibre.

Si, au contraire, le point A se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur du cercle, l'aiguille tournera dans un sens ou dans l'autre jusqu'à ce que la condition d'équilibre soit réalisée.

Rotation d'un courant par un aimant. — Un courant mobile dans un champ magnétique tend à se mouvoir dans le sens de la force électromagnétique qui le sollicite. Si les dispositions sont prises pour qu'il se trouve continuellement placé dans la même situation vis-à-vis du champ, il tournera indéfiniment. Ce sera le cas pour un conducteur ABC (fig. 125) mobile autour d'un axe coïncidant avec l'axe de l'aimant NS et se terminant dans la région neutre de celui-ci. Le flux coupé par ABC sera maximum si le point C est au milieu de l'aimant. m étant la masse d'un pôle, le flux qui en émane est $4\pi m$ d'après le théorème de Gauss. Le couple moteur C provoquant la rotation de ABC est constant et le travail par tour $2\pi C$. Ce travail est égal, en vertu de la règle de Faraday à $4\pi m i$, i étant l'intensité du courant traversant le conducteur, d'où

$$C = \frac{4\pi m i}{2\pi} = 2m i.$$

Il est indépendant de la grandeur et de la forme du conducteur ABC. La vitesse que ce dernier prend va en croissant jusqu'à ce que les résistances passives donnent un couple

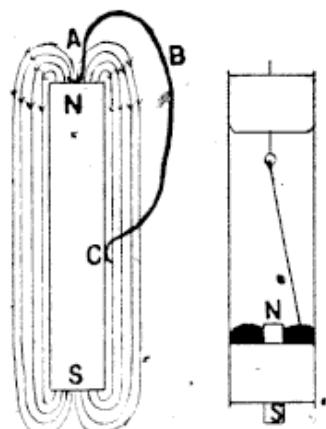


FIG. 125 et 126.

équilibrant le couple moteur. A ce moment le régime est atteint et la vitesse devient uniforme. Le mouvement s'inverse, quand on renverse la direction du courant.

L'expérience se réalise simplement, ainsi que l'indique la fig. 126, au moyen d'un tube fermé par deux bouchons dont l'inférieur, recouvert de mercure, laisse émerger le pôle d'un aimant. Le bouchon supérieur est traversé par un conducteur recourbé en œillet, auquel on suspend un fil de platine plongeant dans le mercure. Ce fil prend un mouvement de rotation autour du pôle, dès qu'un courant le traverse.

Roue de Barlow, disque de Faraday. — Dans la roue de Barlow (fig. 127) et le disque de Faraday (fig. 128) on profite du déplacement pour faire tourner un axe. A cet effet dans le premier appareil, la roue plonge ses dents inférieures dans un godet à mercure

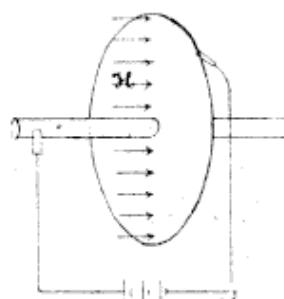
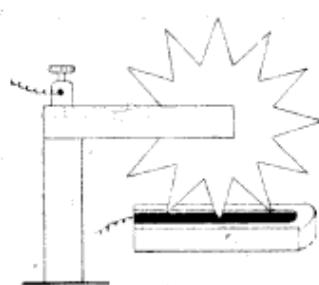


FIG. 127 et 128.

et faire tourner un axe. A cet effet dans le premier appareil, la roue plonge ses dents inférieures dans un godet à mercure

placé entre les branches d'un aimant en fer à cheval, le courant étant amené à la roue d'une part, au mercure d'autre part, tandis que dans le second appareil, le disque placé normalement au champ, reçoit le courant au moyen de balais frottant sur son axe et sa jante.

En appelant S la surface du disque de Faraday, le flux coupé par tour est $\mathcal{H} S$ et le travail $\mathcal{H} S i$. Il est indépendant de la vitesse.

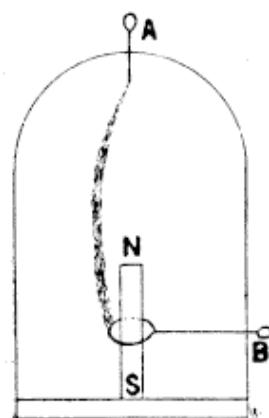


FIG. 129.

Rotation de liquides et de gaz. — Lorsque le courant traverse un liquide, celui-ci se déplace également sous l'effet de la force électromagnétique, propriété utilisée dans certains compteurs d'énergie.

Le déplacement se produit aussi avec les gaz. L'expérience se réalise très élégamment en faisant jaillir une effluve entre deux électrodes A et B (fig. 129) comprenant entre elles un pôle d'aimant.

On met ce phénomène à profit pour couper l'arc consécutif à la rupture dans certains interrupteurs, en faisant traverser l'étincelle par un flux magnétique intense.

Rotation d'un aimant par un courant. — Inversement, si le courant est rendu fixe, tandis que l'aimant est mobile, c'est ce dernier qui se déplacera.

Par exemple un aimant cylindrique N S (fig. 130) convenablement lesté pour flotter sur le mercure Hg un de ses pôles restant en dehors, tournera indéfiniment autour du courant amené ou partant par un conducteur central.

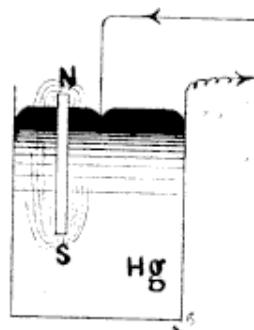


FIG. 130.

Rotation d'un courant par un courant. —

En produisant le flux magnétique au moyen d'un solénoïde traversé par un courant, les expériences antérieures permettent d'obtenir la rotation d'un courant par un courant.

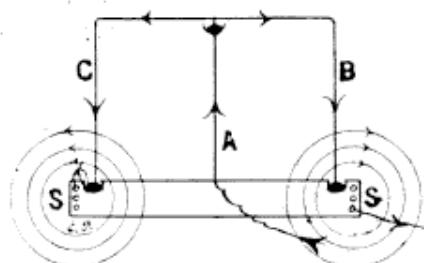


FIG. 131.

Par exemple si le courant montant par la tige centrale A (fig. 131) et descendant par les deux conducteurs latéraux B et C qui plongent dans une rigole de mercure, passe d'abord dans quelques spires entourant en S S le vase à mercure, on aura exactement réalisé les conditions de l'expérience (fig. 129).

lissé les conditions de l'expérience (fig. 129). L'effet des conducteurs descendants B et C est d'ailleurs concordant, puisque B et C sont symétriquement placés par rapport au champ magnétique émis par le solénoïde S S.

Action de deux courants parallèles. — Il résulte des expériences précédentes qu'un courant tend à traverser normalement le champ magnétique dans lequel il se trouve, ce que nous savions d'ailleurs par ce que nous avons vu en électromagnétisme. Si donc deux courants sont parallèles et de même sens, l'un A (fig. 132) indéfini et fixe, l'autre B de longueur finie et mobile, ce dernier sera sollicité à se déplacer dans le plan des deux courants. Les règles vues précédemment, notamment la règle des trois doigts, nous montreront que les courants tendent à se



FIG. 132.

rapprocher. La force sollicitant les conducteurs peut d'ailleurs se calculer aisément. Le champ en B dû au courant i , perpendiculaire au plan des conducteurs a pour expression en unités électromagnétiques C. G. S., r étant la distance des conducteurs.

$$\mathcal{K} = \frac{2i}{r}.$$

Mais en vertu de la loi de Laplace, la force agissant sur la longueur dl de courant i' est

$$df = \mathcal{K} i' dl \sin(\mathcal{K}, dl) = \mathcal{K} i' dl$$

et pour la longueur l

$$f = \frac{2i}{r} i' l.$$

Cette force varie comme l'action sur un pôle, en raison inverse de la distance.

Courants fermés. — Un courant fermé étant l'équivalent d'un feuillet magnétique tendra, comme ce dernier, à se placer dans la position où le flux pénétrant par sa face négative est maximum.

Soient \mathfrak{M}_1 et \mathfrak{M}_2 les flux embrassés dans les positions de départ et d'arrivée. En supposant que le courant i soit resté constant dans la spire, le travail effectué est

$$T_i^* = i (\mathfrak{M}_2 - \mathfrak{M}_1).$$

Si le flux magnétique est produit par un second courant fermé d'intensité i' et que \mathfrak{M}_1 et \mathfrak{M}_2 soient, dans les positions 1 et 2, le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits, c'est-à-dire le flux qu'envoie un circuit dans la face négative de l'autre quand il est traversé par le courant unité

$$\mathfrak{M}_1 = \mathfrak{M}_1 i', \quad \mathfrak{M}_2 = \mathfrak{M}_2 i'$$

$$\text{d'où} \quad T_i^* = i i' (\mathfrak{M}_2 - \mathfrak{M}_1).$$

Pour une variation infiniment petite

$$dT = i i' d\mathfrak{M}.$$

Par exemple un cadre A (fig. 133) mobile dans le champ terrestre autour d'un axe vertical, s'orientera de manière à placer sa face négative perpendiculairement à la direction du méridien magnétique, c'est-à-dire de manière que l'opérateur placé vers le sud et regardant

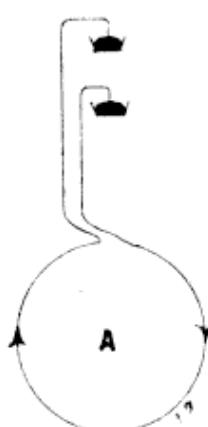


FIG. 133.

vers le nord, voie le courant tourner dans le sens des aiguilles d'une montre. Si au moment où

la spire arrive dans la position de maximum de flux embrassé par sa face négative, on renverse la direction du courant, la spire continuera son mouvement de rotation. Le travail produit par tour sera $2iS\mathcal{M}$. De même un cadre C C (fig. 134)

mobile autour d'un axe horizontal A A' s'oriente de manière à présenter sa face négative perpendiculairement à l'aiguille d'inelinaison.

Enfin, un cavalier C C', (fig. 135) flottant de part et d'autre sur deux bains de mercure B B' dans lesquels on amène les pôles d'une source d'électricité, va se déplacer, dès qu'un courant passe, de manière à faire entrer le plus grand flux possible par sa face négative. Ceci montre qu'un conducteur siège d'un courant, tend à acquérir la plus grande surface possible et à prendre notamment la forme circulaire qui possède la plus grande surface sous le plus faible périmètre.

Explication des actions magnétiques et électromagnétiques par la notion des lignes de force. — On peut se rendre compte des actions magnétiques et électromagnétiques en attribuant, avec Faraday, certaines propriétés simples aux lignes de force.

Faraday les assimilait à des filets élastiques tendus se repoussant mutuellement quand ils ont la même direction, s'attirant quand ils sont de sens contraires et ayant une tendance à se raccourcir en empruntant le chemin le plus perméable magnétiquement.

Le trajet des lignes de force est pratiquement mis en évidence par les fantômes magnétiques. Considérons (fig. 136) un aimant inducteur N S, auprès duquel nous amenons un morceau de fer doux S N. Celui-ci présentant un trajet plus perméable, les lignes de force s'y concentreront en s'allongeant et, en vertu de leur tendance à se raccourcir, l'attireront contre le noyau.

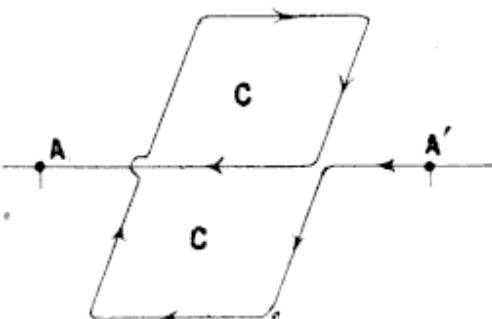


FIG. 134.

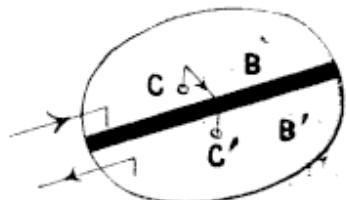


FIG. 135.

inducteur NS où il viendra prendre une position stable en raison de l'attraction existant entre les masses polaires de noms contraires.

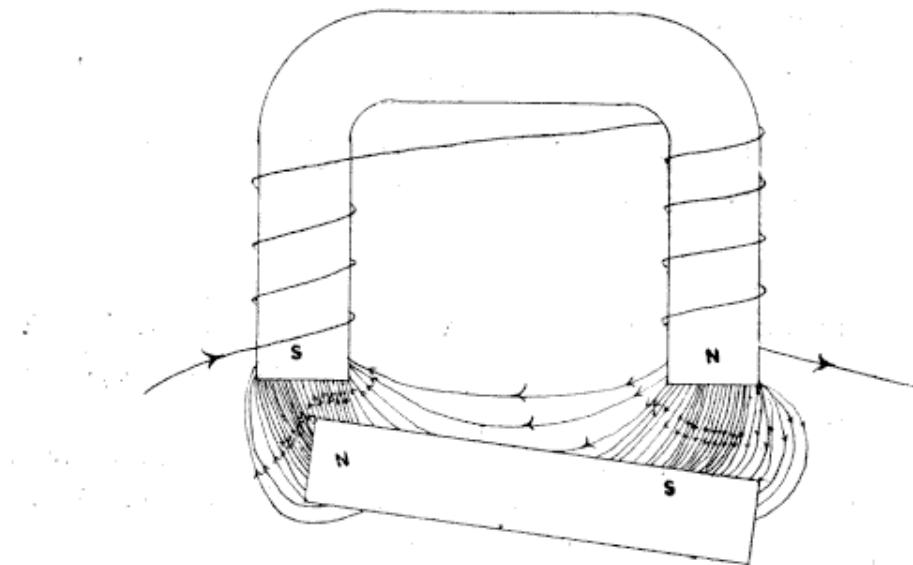


FIG. 136.

De même les lignes de force voisines de deux courants rectilignes de même sens étant de sens contraires s'attirent, se déforment (fig. 137) et, ayant une tendance à reprendre leur position symétrique, poussent les deux conducteurs l'un vers l'autre.

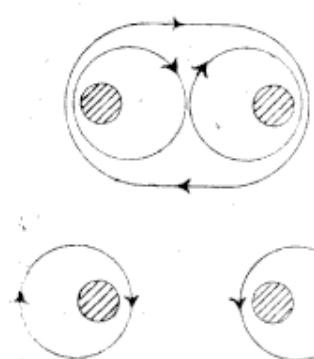


FIG. 137 et 138.

Si au contraire les courants sont de sens inverses, les lignes de force voisines étant de même sens se repoussent et écartent les conducteurs l'un de l'autre (fig. 138).

CHAPITRE IX.

Induction électromagnétique.

§ I. — Généralités.

Phénomène d'induction. — Toute variation dans la valeur du flux magnétique traversant un circuit y développe un courant dit *induit*, naissant et cessant en même temps que la variation.

La direction de ce courant est toujours telle que le flux qu'il engendre tend à s'opposer à la variation du flux inducteur, le réduisant s'il augmente, l'augmentant s'il diminue.

Loi générale de l'induction. — Soit un circuit de résistance totale r , alimenté par une source de force électromotrice E , siège d'un courant dont l'intensité donnée par la loi d'Ohm est

$$i = \frac{E}{r} \quad \text{d'où} \quad E i dt = i^2 r dt.$$

Cette égalité signifie que la puissance électrique dépensée à chaque instant par la source est complètement transformée en chaleur par effet Joule.

Supposons le circuit plongé dans un champ magnétique. Le conducteur qui le constitue sera, comme nous le savons, soumis à une force électromagnétique perpendiculaire en chaque point au plan du courant et du champ, de sorte que si l'une des portions du conducteur est suffisamment mobile, elle se mettra en mouvement, produisant un travail dT pendant le temps dt . Ce travail ne peut s'accomplir qu'aux dépens de la source d'électricité, seul générateur d'énergie du système et comme E et r sont constants par hypothèse, il faut nécessairement que pendant le temps infiniment petit considéré le courant ait pris une nouvelle valeur i , telle que

$$E i dt = i^2 r dt + dT.$$

Mais en vertu de la règle de Faraday, le travail accompli par un conducteur se déplaçant dans un champ est égal au produit de l'intensité du courant par le nombre de lignes de force coupées pendant le déplacement. Done :

$$dT = i d\mathfrak{N}, \text{ d'où } E i dt = i^2 r dt + i d\mathfrak{N}.$$

et enfin $i = \frac{E - \frac{d\mathfrak{N}}{dt}}{r}.$

Le numérateur étant nécessairement homogène, le terme

$$-\frac{d\mathfrak{N}}{dt}$$

doit représenter une force électromotrice qui, ainsi que son signe l'indique, tend à diminuer l'intensité du courant.

D'une manière générale, l'effet de l'induction est donc de développer une force électromotrice

$$E_i = -\frac{d\mathfrak{N}}{dt}.$$

Supprimons le générateur d'électricité, faisons parcourir au conducteur mobile *le même chemin qu'auparavant pendant le même temps*, tout sera resté le même, sauf que $E = 0$.

Nous aurons

$$i = \frac{-\frac{d\mathfrak{N}}{dt}}{r}.$$

Cette dernière équation montre qu'un circuit immobile, traversé par un flux magnétique variable, est également le siège d'une force électromotrice d'induction *toujours égale et de signe contraire au taux de variation du flux rapporté au temps*.

Siège de la force électromotrice d'induction. Règle de Faraday. — La variation du flux embrassé par un circuit mobile ne peut se produire que si des lignes de force en sortent ou y entrent, c'est-à-dire que si tout ou moins une partie des conducteurs du circuit coupent des lignes de force. *Ce sont les conducteurs coupant des lignes de force et eux seuls qui sont le siège de la force électromotrice induite.* On peut donc encore dire que la force électromotrice induite

dans un conducteur est égale au nombre de lignes de force coupées dans l'unité de temps. Si le champ est uniforme, ce nombre est égal au *produit de l'intensité du champ par la projection sur un plan perpendiculaire à sa direction de la surface décrite par le conducteur pendant l'unité de temps*. Voilà pour la grandeur de la force électromotrice induite ; voyons maintenant comment on détermine son sens.

Loi de Lenz. — Le circuit étant fermé, un courant induit prend naissance. Ce courant se trouvant dans le champ magnétique inducteur subit de la part de celui-ci un effet mécanique ; il est soumis à une force. Lenz a reconnu et il est facile de s'en assurer expérimentalement, que la force électromagnétique qui sollicite le conducteur est opposée à son déplacement et il ne peut évidemment qu'en être ainsi, en vertu du principe de la conservation de l'énergie. En d'autres termes, *la force électromagnétique due à la réaction du courant induit, sur le champ inducteur, tend à empêcher le mouvement*.

On peut déduire de cette règle le sens de la force électromotrice induite. Le sens du mouvement du conducteur dans le champ étant connu, il suffit de chercher à l'aide du bonhomme d'Ampère par exemple, quelle est la direction du courant développant une force de sens opposé au mouvement.

APPLICATION. — Soit un circuit constitué par quatre conducteurs rectangulaires A B C D (fig. 139) dont le quatrième C D peut glisser d'un mouvement uniforme sur A D et B C dans le sens A D, B C. Le champ magnétique dirigé de l'avant à l'arrière étant perpendiculaire au plan de la feuille de papier, en appelant v la vitesse du conducteur C D de longueur l se déplaçant de dx pendant le temps dt .

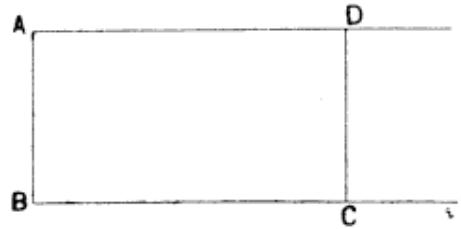


FIG. 139.

$$E_i = - \frac{d \mathcal{H}}{dt} = - \frac{\mathcal{H} l dx}{dt} = - \mathcal{H} l v.$$

Pour obtenir le sens de E_i , cherchons la direction du courant donnant une force électromagnétique dirigée de C vers B. En regardant dans la direction du champ, nous voyons que le

courant doit entrer par les pieds, c'est-à-dire marcher dans le sens C D. C'est précisément celui de la force électromotrice induite. La règle du bonhomme d'Ampère étant d'application incommode, on en a cherché d'autres plus simples.

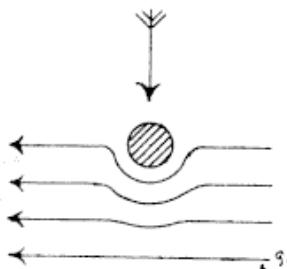
Règle de Maxwell ou du tire-bouchon. — Si l'on suppose qu'un tire-bouchon avancé en tournant dans la direction du champ, le sens de la rotation indique le sens positif de la force électromotrice. Or, lorsque le flux ou le nombre de lignes de force diminue, la force électromotrice

$$-\frac{d \mathcal{E}}{dt}$$

est positive, puisque l'accroissement $d \mathcal{E}$ est négatif. Si le flux augmente, elle est négative, puisqu'alors l'accroissement $d \mathcal{E}$ est positif, c'est-à-dire qu'elle est orientée en sens inverse du mouvement du tire-bouchon. En résumé, *la force électro-motrice d'induction est orientée dans le sens de la rotation d'un tire-bouchon enfoncé dans la direction des lignes de force lorsque le flux décroît; elle est orientée en sens inverse quand le flux croît.*

Règle de Fleming ou des trois doigts. — La règle de Maxwell n'est pas applicable quand le conducteur est rectiligne. On peut alors se servir de la règle de Fleming mais en utilisant la *main droite*. Le pouce, l'index et le médius placés à angles droits sont dirigés : le pouce dans le sens du mouvement (vers lequel le conducteur est *poussé*), l'index dans le sens du champ (induction), le médius indique le sens de la force électromotrice.

Règle de Cruciani. — La règle de Fleming n'est pas toujours d'application aisée. Celle de M. Cruciani (1) au contraire, s'applique dans tous les cas avec la plus grande facilité.



Les lignes de force étant considérées comme des filets déformables, le conducteur qui les coupe les fait d'abord fléchir (fig. 140) et il suffit de faire tourner un tire-bouchon dans le sens de leur enroulement pour obtenir, par son mouvement, le sens de la force électro-motrice induite.

FIG. 140

(1) *Bulletin de l'Association des Ingénieurs-Electriciens sortis de l'Institut Montefiore*, T. I. de 1890, p. 331.

Par exemple, soit un champ dirigé de droite à gauche et coupé par un conducteur animé d'un mouvement de haut en bas. Les lignes de force tendront à s'enrouler autour de lui comme l'indique la figure et, en faisant tourner un tire-bouchon dans le sens de l'enroulement, on en déduit que la force électromotrice est dirigée de l'observateur vers la feuille de papier.

Disque de Faraday. — Prenons comme second exemple le disque de Faraday. Relions les deux balais métalliques frottant l'un sur l'axe, l'autre sur la circonference du disque par un conducteur de résistance R (fig. 141) et imprimons au disque un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire ω , r étant le rayon du disque et \mathcal{H} l'intensité du champ perpendiculairement à ce dernier, un rayon quelconque coupe pendant un tour complet du disque $\pi r^2 \mathcal{H} = S \mathcal{H}$ lignes de force. Le tour s'effectuant pendant T secondes une force électromotrice moyenne $E_i = - \frac{\pi r^2 \mathcal{H}}{T}$ y sera développée. Remplaçons T en fonction de la vitesse angulaire $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n$ d'où

$$E_i = - \frac{r^2 \mathcal{H} \omega}{2} = - S \mathcal{H} n.$$

En négligeant la résistance du disque, l'intensité sera

$$i = \frac{n S \mathcal{H}}{R}.$$

APPLICATION. — *Quelle devrait être la surface d'un disque tournant à raison de 10 tours par seconde autour d'un axe horizontal situé dans le méridien magnétique suivant la direction des lignes de force terrestres, pour que la force électromotrice qu'il développe soit de 1 volt, la composante horizontale du champ terrestre étant 0,2 unité C. G. S. ?*

Nous tirons de l'équation établie plus haut

$$S = \frac{E}{n \mathcal{H}} = \frac{10^8}{10 \times 0,2} \text{ soit un rayon de 40 mètres.}$$

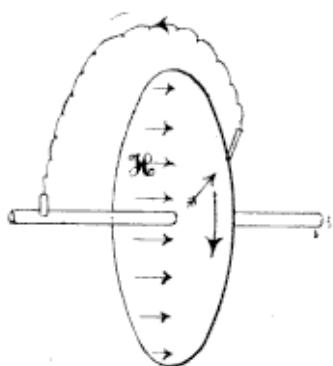


FIG. 141.

Induction unipolaire. — Si l'on fait tourner d'un mouvement uniforme avec la vitesse angulaire ω autour d'un pôle nord d'intensité m l'arc A B C (fig. 142), il sera le siège d'une force électromotrice d'induction ($4\pi m$ lignes de force coupées par tour en vertu du théorème en Gauss)

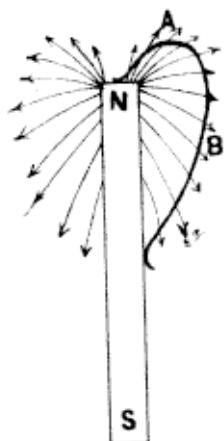


FIG. 142.

Quantité d'électricité induite. Mesure de l'intensité d'un champ. — L'intensité du courant dû à une variation de flux est à un moment quelconque

$$i = -\frac{d \mathcal{N}}{dt}.$$

La quantité d'électricité induite par la variation totale du flux passant de 0 à \mathcal{N} pendant le temps t sera

$$q = \int_0^t i dt = \int_0^{\mathcal{N}} -\frac{d \mathcal{N}}{r} = -\frac{\mathcal{N}}{r}.$$

Le flux revenant ensuite à zéro induira la quantité

$$\int_{\mathcal{N}}^0 -\frac{d \mathcal{N}}{r} = \frac{\mathcal{N}}{r}$$

égale à la précédente mais de signe contraire, c'est-à-dire qu'elle se déplace en sens inverse.

La quantité d'électricité est indépendante du temps que la variation a mis à s'accomplir. Si le temps est fort court, la quantité q parcourt le circuit à la façon d'une décharge et se mesurera au moyen d'un galvanomètre balistique. Nous démontrerons plus loin que la première déviation de l'équipage de cet appareil est proportionnelle à la quantité d'électricité ayant traversé son cadre.

INCLINOMÈTRE DE WEBER. — Soit une bobine de surface S enroulée de n spires, que nous placerons verticalement, perpendiculairement au méridien magnétique. Ses extrémités sont en rapport avec deux bagues isolées (fig. 143) sur lesquelles frottent deux balais reliés à un galvanomètre balistique G .

En retournant la bobine face pour face, la variation de flux,

entièrement due à la composante horizontale \mathcal{H} sera $2nS\mathcal{H}$ et l'on aura

$$q_1 = \frac{2nS\mathcal{H}}{R} = \frac{x_1}{k}$$

x_1 étant la première elongation du galvanomètre.

Plaçons ensuite la bobine horizontalement et faisons lui effectuer une demi-rotation autour d'un axe horizontal. La composante verticale \mathfrak{S} interviendra seule et l'on aura

$$q_2 = \frac{2nS\mathfrak{S}}{R} = \frac{x_2}{k}$$

$$\text{d'où } \frac{\mathcal{H}}{\mathfrak{S}} = \frac{x_1}{x_2} = \tan I$$

ce qui donnera la valeur de l'inclinaison

et, si la constante k du galvanomètre est connue ainsi que n , S et la résistance totale du circuit, les valeurs de \mathcal{H} et \mathfrak{S} .

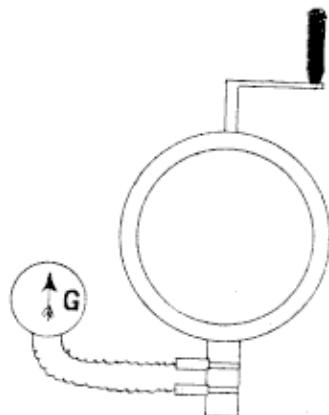


FIG. 143.

COURBE DU MAGNÉTISME D'UN AIMANT. — De même, si l'on fait glisser par petites impulsions égales une bobine enserrant exactement un aimant, un galvanomètre balistique relié à la bobine donne des elongations proportionnelles à l'intensité du champ dans les diverses régions de l'aimant, ce qui permet de tracer sans difficulté la courbe de répartition de son magnétisme.

Mesure du flux d'induction. — Soit une longue bobine de section s , siège d'un courant i , renfermant un noyau cylindrique allongé en fer doux N S (fig. 144) de section s' placé suivant l'axe de la bobine. n , étant le nombre de spires par unité de longueur, l'intensité du champ régnant dans le vide de la bobine sera $\mathcal{H} = 4\pi n_i i$ et l'induction dans le cylindre $\mathfrak{B} = \mu \mathcal{H}$.

Le flux traversant une des spires de la bobine a pour expression

$$(s - s')\mathcal{H} + \mu \mathcal{H} s' = \mathcal{H}(s - s' + \mu s')$$

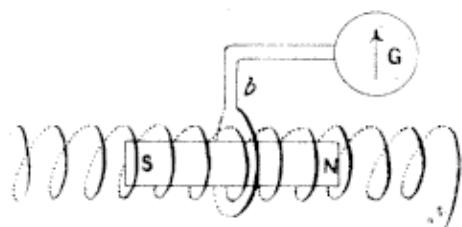


FIG. 144.

et le flux total à travers les n spires de la bobine

$$\mathfrak{N} = n \mathcal{H} (s - s' + \mu s')$$

En renversant le courant on mesurera, à l'aide d'une bobine auxiliaire b , la variation de flux $2\mathfrak{N}$ qui en résulte, ce qui permettra de déterminer subsidiairement la perméabilité μ .

Selfinduction. — Ecrivons l'équation générale précédemment trouvée sous la forme :

$$E i dt = i^2 r dt + i d \mathfrak{N}.$$

Il y a lieu de distinguer, dans le flux \mathfrak{N} , la partie due au courant lui-même. *On appelle coefficient de selfinduction le flux émis dans le circuit par unité de courant.* Le flux dû à la selfinduction sera $\mathfrak{L} i$.

Pour une variation di du courant, la variation du flux propre est $\mathfrak{L} di$ d'où, en désignant par \mathfrak{N}_e le flux extérieur

$$d \mathfrak{N} = d \mathfrak{N}_e + \mathfrak{L} di.$$

Remplaçant dans l'équation précédente et divisant par $i dt$

$$E = i r + \frac{d \mathfrak{N}_e}{dt} + \frac{\mathfrak{L} di}{dt}.$$

Au cas où il n'y a pas de source d'électricité dans le circuit $E = 0$ et l'on a

$$0 = i r + \frac{d \mathfrak{N}_e}{dt} + \frac{\mathfrak{L} di}{dt}$$

en supposant que \mathfrak{L} soit invariable.

Si pendant le temps dt , le flux extérieur n'a pas varié on a simplement $0 = i r + \frac{\mathfrak{L} di}{dt}$.

Valeur du coefficient de selfinduction. — Le coefficient \mathfrak{L} dépend de la *forme du circuit* et du *milieu dans lequel il est plongé*. La forme du circuit électrique a une influence directe sur les dimensions du circuit magnétique, donc sur la réluctance et par suite sur le flux, tandis que la nature du milieu ambiant intervient au point de vue de la perméabilité. Si la bobine est complètement entourée de fer, nous avons vu que pour les faibles inductions, la perméabilité est plusieurs milliers de fois plus grande que celle de l'air, ce qui majore d'autant le coefficient de selfinduction.

Il en résulte que le coefficient de selfinduction est en général variable, ses variations étant corrélatives de celles de la perméabilité. Il est constant et *minimum* pour un enroulement donné, lorsque le circuit magnétique est exclusivement constitué de matière non-magnétique, l'air par exemple, ou de substance magnétique entièrement saturée. Dans les deux cas $\mu = 1$. \mathcal{L} est pratiquement constant dans la partie sensiblement droite de la courbe du magnétisme.

Quoiqu'il en soit il y a donc lieu, pour le préciser, non seulement d'indiquer l'intensité du courant traversant la bobine, mais encore, pour pouvoir tenir compte de l'hystérésis, de spécifier les états magnétiques antérieurs.

Soit une bobine enroulée régulièrement autour d'un axe circulaire.

En appelant n_1 le nombre de spires par centimètre suivant son axe et s la section, le flux magnétique intérieur est exprimé pour un courant i par

$$\mathcal{H}s = 4\pi n_1 i s.$$

Le flux total traverse successivement les n spires de la bobine. Par suite le flux à travers celle-ci est :

$$\mathcal{H} = n \cdot \mathcal{H}s$$

et le coefficient de *selfinduction* a par définition pour valeur :

$$\mathcal{L} = \frac{\mathcal{H}}{i} = 4\pi n_1 n s = \frac{4\pi n^2 s}{l}.$$

Il est donc proportionnel au carré du nombre des spires.

Une telle bobine ayant 10 spires par unité de longueur, une longueur de 30 centimètres et une section de 5 centimètres carrés aurait un coefficient de *selfinduction* constant de $1,88 \cdot 10^5$ unités C. G. S. ou

$$\frac{1,88 \cdot 10^5}{10^9} = \frac{1,88}{10^4} \text{ henrys. (*)}$$

S'il y a dans la bobine un noyau en fer de perméabilité actuelle μ , le coefficient devient :

$$\mathcal{L}' = 4\pi n_1 n s \mu.$$

(*) Le henry, unité pratique de selfinduction, vaut 10^9 unités C. G. S. comme nous le verrons plus loin.

Cette expression est applicable à un électro-aimant droit de grande longueur, à condition de négliger l'influence des extrémités. Vers celles-ci, en effet, les lignes de force divergent et sortent latéralement, produisant une dispersion du flux.

La valeur élevée que peut acquérir le coefficient μ explique les effets inductifs infiniment plus considérables que ceux des bobines sans noyau, fournis par les électro-aimants.

Effet de la selfinduction. Extra-courant de fermeture et de rupture.—La valeur de la force électromotrice de selfinduction :

$$E_s = - \frac{\mathcal{L} di}{dt}$$

montre que quand le courant croît, di étant positif, la force électromotrice de selfinduction est négative ; *elle s'oppose à l'établissement du courant*. Au contraire si le courant décroît, di étant négatif, la force électromotrice est positive, *elle tend à prolonger le courant*. On peut facilement s'en rendre compte expérimentalement.

Soit une bobine B (fig. 145) avec ou sans noyau magnétique, sur laquelle nous dérivons un galvanomètre G et que peut

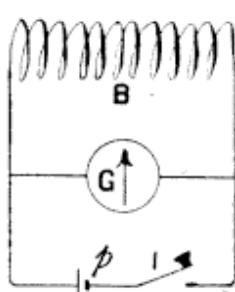


FIG. 145.

alimenter une pile p quand on ferme l'interrupteur I. Celui-ci étant fermé, un certain courant traverse le galvanomètre et fait dévier son aiguille. Ramenons celle-ci au zéro et rompons le circuit, l'aiguille dévie en sens inverse, indice du passage d'un courant émis par la bobine après la rupture du circuit de la pile, dans le même sens que celui qui la traversait. C'est l'*extra-courant de rupture*.

Si maintenant nous amenons l'aiguille dans la position qu'elle atteignait en régime permanent, puis que nous fermions le circuit, nous constatons qu'elle se déplace au-delà de la déviation permanente ensuite atteinte, comme si la bobine B présentait, au premier moment, une obstruction plus grande, ou comme si elle envoyait, au début un courant i' s'ajoutant à celui de la pile. C'est l'*extra-courant de fermeture*.

Equation du courant à la fermeture. — **CONSTANTE DE TEMPS.** — En remplaçant \mathcal{M} par sa valeur $\mathcal{L} di$ dans l'équation générale il vient :

$$i = \frac{E - \mathfrak{L} \frac{di}{dt}}{r}$$

d'où en séparant les variables :

$$\frac{di}{E - ir} = - \frac{dt}{\mathfrak{L}}$$

Au bout du temps t le courant possédera l'intensité définie par

$$\int_0^t \frac{di}{E - ir} = \int_0^t \frac{dt}{\mathfrak{L}}$$

ou $-\frac{1}{r} \log_e \frac{E - ir}{E} = \frac{t}{\mathfrak{L}}$

et enfin repassant des logarithmes aux nombres

$$i = \frac{E}{r} \left(1 - e^{-\frac{rt}{\mathfrak{L}}} \right)$$

dans laquelle e est la base des logarithmes népériens.

Le rapport $\frac{\mathfrak{L}}{r}$ s'appelle la *constante de temps* du circuit.

On le désigne habituellement par τ et l'on écrit :

$$i = \frac{E}{r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Le courant n'atteint théoriquement sa valeur permanente $I = \frac{E}{r}$ qu'au bout d'un temps $t = \infty$. Pratiquement le terme $e^{-\frac{rt}{\mathfrak{L}}}$ décroît assez rapidement pour être négligeable après un temps fort court.

La courbe de l'intensité en fonction des temps s'élève rapidement à partir de l'origine, puis tend vers une asymptote parallèle à l'axe des temps (fig. 146).

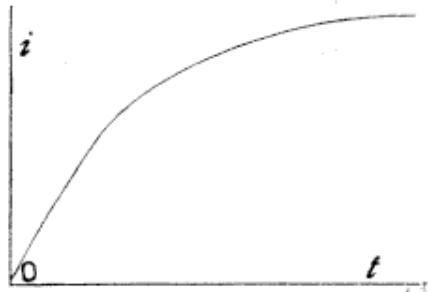


FIG. 146.

Développons l'exponentielle en série :

$$e^{-\frac{rt}{\mathfrak{L}}} = 1 - \frac{rt}{\mathfrak{L}} + \frac{r^2 t^2}{1 \cdot 2 \mathfrak{L}^2} - \frac{r^3 t^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \mathfrak{L}^3} + \dots$$

Si le temps considéré est très petit, nous pourrons négliger les termes à partir du troisième et il reste

$$i = \frac{E t}{\mathfrak{L}}$$

montrant qu'à l'instant de la fermeture du circuit la selfinduction acquiert une valeur prépondérante, la résistance étant momentanément négligeable.

La quantité d'électricité passant dans le circuit pendant la période variable du courant est

$$\begin{aligned} q &= \int_0^t i dt = \int_0^t \frac{E}{r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) dt = \frac{E}{r} t - \frac{E}{r} \int_0^t e^{-\frac{t}{\tau}} dt \\ &= \frac{E}{r} \left(t - \tau \right) + \frac{E}{r} \tau e^{-\frac{t}{\tau}}. \end{aligned}$$

A partir d'une certaine valeur de t dépendant de la grandeur de τ , le second terme devient négligeable et l'on a simplement

$$q = \frac{E}{r} \left(t - \tau \right)$$

$\frac{E}{r} t$ est la quantité qui aurait passé pendant le temps t si le courant avait pris instantanément son régime permanent ; $\frac{E}{r} \tau$ est la quantité dont l'extra-courant a diminué la première.

En la considérant comme ayant passé en sens inverse dans le circuit, on peut dire que $\frac{E}{r} \tau$ représente la quantité d'électricité due à l'extra-courant inverse ou de fermeture.

APPLICATION. — *Une bobine mesure 500 ohms et a un coefficient de selfinduction de 15 henrys. Quelle sera la valeur de l'intensité du courant après 0,01 de seconde ?*

$$\frac{rt}{\varrho} = 0,33; e^{-\frac{rt}{\varrho}} = 1,39.$$

L'intensité sera au bout de 0,01 de seconde :

$$i = \frac{E}{r} \left(1 - \frac{1}{1,39} \right) = \frac{E}{r} \left(1 - 0,72 \right) = 0,28 \frac{E}{r},$$

soit les 0,28 de sa valeur permanente.

Equation du courant à l'ouverture. — A l'ouverture du circuit le courant se continue par une étincelle dont on ignore la résistance. Pour simplifier, nous supposerons que la résistance du circuit est maintenue constante par la substitution à la pile d'une résistance équivalente.

L'équation différentielle du courant sera dans ces conditions

$$i = \frac{-\mathcal{L} \frac{di}{dt}}{r}$$

laquelle par intégration entre $I = \frac{E}{r}$ et i donne

$$i = \frac{E}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

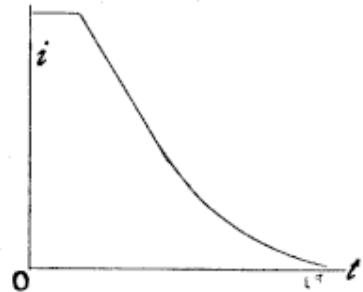


FIG. 147.

Ce courant décroît rapidement (fig. 147).

La quantité d'électricité transportée par l'extra-courant est

$$q' = \int_0^t i dt = \frac{E}{r} \int_0^t e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{E}{r} \tau \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Pour une valeur suffisante de t , $q' = \frac{E \tau}{r}$. C'est précisément la quantité correspondant au courant inverse de fermeture.

La quantité totale d'électricité développée par la pile est $q + q' = \frac{E t}{r}$, la même que s'il n'y avait pas eu d'action inductive.

En somme, l'effet de la selfinduction est d'augmenter la résistance apparente des conducteurs pendant la période variable, sans toutefois modifier la quantité totale d'électricité déplacée, puisque l'extra-courant d'ouverture restitue l'exacte quantité dont l'extra-courant inverse a diminué le débit à la fermeture du circuit.

Energie intrinsèque d'un courant. — Pendant la période de fermeture, le courant doit surmonter à chaque instant la force contre-électromotrice de selfinduction, développant un travail distinct de l'effet Joule et qui s'emmagasiné sous forme d'énergie potentielle dans le circuit.

Pour en déterminer la valeur, il suffira, partant de l'équation générale

$$i = \frac{E - \mathcal{L} \frac{di}{dt}}{r}$$

d'écrire que cette énergie potentielle n'est rien autre que l'excédant de l'énergie développée par la pile pendant la période

variable, sur celle dissipée par effet Joule pendant le même temps. Multipliant par $i dt$, chassant le dénominateur et intégrant entre les limites correspondantes on aura

$$\int_0^t E i dt - \int_0^t i^2 r dt = \int_0^t \mathfrak{L} i di = \frac{\mathfrak{L} I^2}{2}.$$

Cette énergie intrinsèque, emmagasinée dans le flux magnétique de la bobine, reste constante tant que le courant ne varie pas. Quand le courant cesse, le champ magnétique disparaît en la restituant.

EXEMPLE. — *Un électro-aimant de coefficient de selfinduction de 25 henrys est traversé par un courant de 10 ampères. Quelle est la valeur de son énergie potentielle ?*

L'énergie emmagasinée est

$$\frac{2500}{2} = 1250 \text{ joules} = 1250 \times 10^7 \text{ ergs} = \frac{1250}{9,81} \text{ soit } 127,5 \text{ kilogrammètres.}$$

Si à la rupture du circuit cette énergie se dissipe en $\frac{1}{2}$ seconde, la puissance développée correspond à

$$\frac{127,5 \times 2}{75} = 4,73 \text{ chx.}$$

D'autre part si la rupture est très rapide, la variation de flux est brusque, de sorte que la force électromotrice peut atteindre des valeurs dangereuses.

Effets de la selfinduction dans le cas des courants dérivés. —

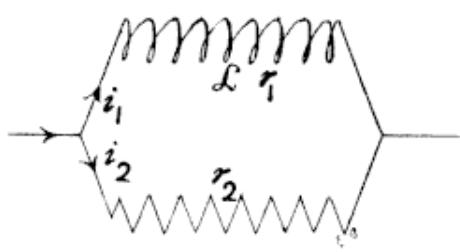


FIG. 148.

Si de deux conducteurs de résistances r_1 , r_2 placés en dérivation (fig. 148) l'un présente un coefficient de selfinduction \mathfrak{L} , voyons ce qui va se passer lorsque nous fermons puis ouvrons le circuit.

Appliquons la seconde loi de Kirchhoff à la boucle r_1 , r_2 pendant la période variable

$$r_1 i_1 - r_2 i_2 = - \mathfrak{L} \frac{di_1}{dt}.$$

Intégrant entre les limites correspondantes de temps et de courant après avoir multiplié par dt

$$r_1 \int_0^t i_1 dt - r_2 \int_0^t i_2 dt = - 2 \int_0^t di_1 = 0$$

car les intensités initiales et finales étant nulles, le terme $- 2 \int_0^0 di_1 = 0$ et l'équation précédente peut s'écrire :

$$r_1 q_1 - r_2 q_2 = 0 \text{ ou } \frac{q_1}{q_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

montrant que les quantités qui ont traversé les deux branches sont en raison inverse des résistances, tout comme si la branche r_1 avait été dénuée de selfinduction. Celle-ci ne modifie donc pas la répartition dans le cas de la décharge d'un conducteur à travers les deux dérivation par exemple.

Il est à remarquer qu'il n'en serait plus de même si, la décharge s'effectuant dans un galvanomètre pourvu d'un shunt, l'aiguille commençait à se déplacer avant que la décharge fût terminée. Par suite de la force contre électromotrice que ce déplacement induirait dans le cadre, la quantité totale d'électricité traversant ce dernier serait diminuée et la formule ordinaire du shunt ne serait applicable que moyennant correction.

Effet d'une capacité shuntée et d'une selfinduction mises en série dans un circuit dérivé. — Considérons le cas un peu plus compliqué où, dans la dérivation présentant une selfinduction, se trouve placé en série avec la selfinduction un condensateur shunté (fig. 149).

Lorsque l'interrupteur est abaissé, un courant permanent traverse les deux dérivation, I étant l'intensité dans la branche inductive, le condensateur se trouvera chargé au potentiel $R I$ et sa charge sera $q = C R I$.

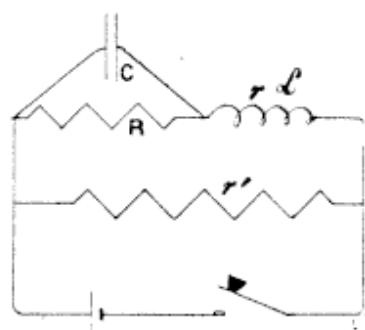


FIG. 149.

Au moment de la rupture du circuit de la pile, le courant I disparaît, et le condensateur se décharge tendant à envoyer dans la résistance $r' + r$ un courant opposé à l'extra-courant de selfinduction.

Soient à un moment donné i le courant dans la branche du

condensateur, i_1 le courant traversant R , i_2 celui traversant $r' + r$ (fig. 150).

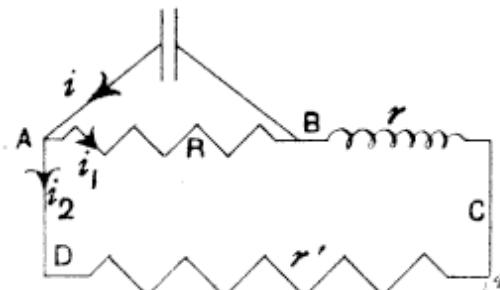


FIG. 150.

Appliquée au point A la première loi de Kirchhoff donne :

$$i = i_1 + i_2.$$

Multiplions par dt et intégrons entre les limites de la période variable

$$\int i dt = \int i_1 dt + \int i_2 dt$$

ou

$$q = q_1 + q_2 \quad (1)$$

Appliquons à la maille A B C D la seconde loi de Kirchhoff

$$i_1 R - i_2 (r + r') = -d \frac{\mathcal{L} i_2}{dt},$$

multiplions par dt et intégrons en remarquant qu'au temps

$$t = 0, i_2 = I$$

$$\int i_1 R dt - \int i_2 (r + r') dt = -\mathcal{L} \int_{+I}^0 di_2 = \mathcal{L} I$$

ou

$$R q_1 - (r + r') q_2 = \mathcal{L} I.$$

Éliminons q_1 au moyen de la relation $q_1 = q - q_2$

$$R (q - q_2) - (r + r') q_2 = \mathcal{L} I. \text{ Mais } q = C R I$$

d'où

$$C R^2 I - q_2 (R + r + r') = \mathcal{L} I$$

et

$$q_2 = \frac{(C R^2 - \mathcal{L}) I}{R + r + r'}$$

ou encore en changeant le signe de q_2 lequel est arbitraire, puisque nous avons choisi arbitrairement comme direction positive celle de la rotation des aiguilles d'une montre :

$$q_2 = \frac{I (\mathcal{L} - C R^2)}{R + r + r'}$$

Une capacité shuntée par une résistance R , mise en série avec un coefficient de selfinduction, joue un effet inverse à celui-ci ; elle correspond à un coefficient de selfinduction négatif égal à $C R^2$.

En particulier si $\mathcal{L} = C R^2$, la décharge du condensateur dans la branche dérivée r' est nulle.

Enroulements sans induction. — Il peut être utile de disposer d'enroulements dépourvus de *selfinduction*. Comment les obtenir ? Considérons un bobinage effectué au moyen de deux fils isolés enroulés simultanément. Il nous donne deux enroulements à nombres égaux de spires agissant sur le même circuit magnétique et y produisant, en vertu de la relation générale trouvée précédemment, des flux égaux et de même polarité quand ils seront parcourus par des courants égaux et de même sens

$$\mathfrak{N} = \frac{4\pi ni}{\mathfrak{R}}.$$

Réunissons maintenant entre eux les deux enroulements à une de leurs extrémités adjacentes, et admettons-y un courant quelconque. Après avoir traversé un des enroulements, le courant traversera l'autre *en sens inverse*. Il tendra donc, dans ce second enroulement, à développer un flux égal et contraire

$$\mathfrak{N} = -\frac{4\pi ni}{\mathfrak{R}},$$

de sorte que l'effet magnétique résultant sera nul.

De la même manière, deux fils droits voisins ou deux conducteurs cordés ensemble, ne donnent pas lieu à des effets d'induction appréciables, quand ils sont traversés par des courants égaux et opposés.

Influence de la continuité du circuit magnétique sur la valeur du coefficient de selfinduction. — Nous avons vu que, dans le cas d'une bobine annulaire à noyau en fer doux fermé sur lui-même, de section s , toutes les lignes de force restent confinées dans ce dernier. Le flux traversant chaque spire a pour valeur $\mathfrak{B}_m s$. Si nous renversons le courant, le flux est inversé et devient $-\mathfrak{B}_m s$. Sa variation est donc $\mathfrak{B}_m s - (-\mathfrak{B}_m s) = 2\mathfrak{B}_m s$ pour une variation $2i$ du courant. Le coefficient

$$\mathfrak{L} = \frac{n 2 \mathfrak{B}_m s}{2i} = \frac{n \mathfrak{B}_m s}{i}.$$

Lorsqu'au lieu de renverser le courant on le fait varier alternativement entre 0 et i , quand le courant revient à zéro, le noyau reste le siège d'une induction rémanente considérable

\mathfrak{B}_o de sorte que pour une variation $+i$ du courant, la variation de flux n'est plus que $n(\mathfrak{B}_m - \mathfrak{B}_o)s$, et le coefficient

$$\mathfrak{L} = \frac{n(\mathfrak{B}_m - \mathfrak{B}_o)s}{i}$$

se trouve considérablement réduit.

On accentue les variations dans ce dernier cas en sectionnant légèrement le noyau. Dès qu'il existe un entrefer, en effet, son influence démagnétisante est telle que le flux rémanent $n\mathfrak{B}_o s$ disparaît presque complètement avec la force magnétomotrice.

§ 3. — **Induction mutuelle.**

Lorsqu'un circuit est voisin d'un autre, une partie du flux qu'il développe traverse ce dernier et y provoque un phénomène d'induction, en vertu de la loi générale précédemment établie. On désigne habituellement par \mathfrak{M} le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits et on le définit par *le rapport du flux qui traverse un circuit à l'intensité du courant dans l'autre circuit* ou encore par *le flux magnétique qu'y envoie l'unité de courant passant dans le second circuit*. Ainsi que nous l'avons démontré à propos des feuillets magnétiques, ce coefficient possède la même valeur pour chaque enroulement par rapport à l'autre. \mathfrak{M} est d'ailleurs constant ou variable, suivant que le milieu emprunté par le flux est de perméabilité constante ou variable.

Soit un circuit voisin d'un autre, le coefficient d'induction mutuelle étant \mathfrak{M} . Quand un courant d'intensité i_2 se développe dans le second, le flux traversant chaque spire du premier sera $\mathfrak{M} = \mathfrak{M} i_2$ et il naîtra dans chaque spire de celui-ci une force électromotrice d'induction

$$e_m = - \frac{d \mathfrak{M}}{dt} = - \frac{d \mathfrak{M} i_2}{dt} = - \mathfrak{M} \frac{di_2}{dt}$$

si \mathfrak{M} est constant.

Considérons maintenant le cas général où deux circuits fixes dans lesquels agissent des forces électromotrices E_1, E_2 , possèdent un coefficient d'induction mutuelle constant \mathfrak{M} , des résistances r_1, r_2 , des coefficients de selfinduction constants \mathfrak{L}_1 et \mathfrak{L}_2 .

A un moment quelconque de la période variable on aura

$$i_1 = \frac{E_1 - \mathcal{Q}_1 \frac{di_1}{dt} - \mathfrak{M} \frac{di_2}{dt}}{r_1} \quad (1)$$

$$i_2 = \frac{E_2 - \mathcal{Q}_2 \frac{di_2}{dt} - \mathfrak{M} \frac{di_1}{dt}}{r_2} \quad (2)$$

Multiplions respectivement (1) et (2) par $i_1 dt$ et $i_2 dt$ et additionnons en séparant dans le second membre les termes contenant les coefficients d'induction

$$E_1 i_1 dt + E_2 i_2 dt - (i_1^2 r_1 + i_2^2 r_2) dt = \mathcal{Q}_1 i_1 d i_1 + \mathcal{Q}_2 i_2 d i_2 + \mathfrak{M} (i_1 d i_2 + i_2 d i_1).$$

Cette équation montre que l'énergie fournie par les piles ne se transforme pas complètement en chaleur ; l'excédent est emmagasiné grâce aux phénomènes d'induction et représenté à chaque instant par

$$\mathcal{Q}_1 i_1 d i_1 + \mathcal{Q}_2 i_2 d i_2 + \mathfrak{M} (i_1 d i_2 + i_2 d i_1).$$

L'énergie intrinsèque totale existant lorsque le régime permanent est atteint de part et d'autre sera donc fournie par l'intégration de la quantité précédente soit

$$\frac{\mathcal{Q}_1 i_1^2}{2} + \frac{\mathcal{Q}_2 i_2^2}{2} + \mathfrak{M} i_1 i_2.$$

Les deux premiers termes représentent les énergies intrinsèques des circuits, le troisième leur énergie mutuelle.

Si $E_2 = 0$, le courant du second circuit résultera exclusivement de l'induction mutuelle. En multipliant par dt et chassant le dénominateur, l'équation (2) donne dans ces conditions

$$i_2 r_2 dt = -\mathcal{Q}_2 d i_2 - \mathfrak{M} d i_1.$$

Intégrons de 0 à t en remarquant que les limites correspondantes sont pour le courant dû à la selfinduction 0, celles du courant inducteur 0 et I_1 ,

$$r_2 \int_0^t i_2 dt = -\mathcal{Q}_2 \int_0^0 d i_2 - \mathfrak{M} \int_0^{I_1} d i_1$$

$$\text{ou } \int_0^t i_2 dt = -\frac{\mathcal{Q}_2}{r_2} \int_0^0 d i_2 - \frac{\mathfrak{M}}{r_2} \int_0^{I_1} d i_1$$

ou encore

$$q_2 = - \frac{\mathfrak{M}}{r_2} I_1 = - \frac{\mathfrak{M} E_1}{r_2 r_1}.$$

Lors de l'ouverture du circuit inducteur on a de même :

$$q_2' = \int_0^\infty i_2 dt = - \frac{\mathfrak{L}_2}{r_2} \int_0^\infty d i_2 - \frac{\mathfrak{M}}{r_2} \int_{I_1}^\infty d i_1 = + \frac{\mathfrak{M}}{r_2} I_1 = \frac{\mathfrak{M} E_1}{r_2 r_1}$$

quantité égale et de signe contraire à la précédente.

Relation entre le coefficient d'induction mutuelle et ceux de selfinduction. — Soient deux bobines superposées enroulées autour d'un même axe présentant l'une n_1 , l'autre n_2 spires. \mathfrak{M}_1 étant le flux moyen à travers une spire de la première bobine quand l'unité de courant la parcourt, son coefficient de self-induction vaut par définition $\mathfrak{L}_1 = n_1 \mathfrak{M}_1$ et son coefficient d'induction mutuelle par rapport à la seconde bobine, si tout le flux qu'elle développe traverse intégralement celle-ci :

$$\mathfrak{M} = n_2 \mathfrak{M}_1.$$

Inversement si \mathfrak{M}_2 est le flux moyen créé à travers les spires de la seconde bobine quand le courant unité la parcourt

$$\mathfrak{L}_2 = n_2 \mathfrak{M}_2 \text{ et } \mathfrak{M} = n_1 \mathfrak{M}_2.$$

On tire de ces équations

$$\mathfrak{M}^2 = \mathfrak{L}_1 \mathfrak{L}_2 \text{ ou } \mathfrak{M} = \sqrt{\mathfrak{L}_1 \mathfrak{L}_2}.$$

Cette expression donne une valeur maximum du coefficient d'induction mutuelle qui n'est atteinte qu'à condition que tout le flux créé par une bobine traverse intégralement l'autre.

En général il n'en est pas ainsi. Pour envoyer le flux \mathfrak{M}_1 à travers la seconde bobine, la première doit développer $\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}'_1$, de sorte que son coefficient de selfinduction est en réalité $\mathfrak{L}_1 = n_1 (\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}'_1)$ le coefficient d'induction mutuelle restant $\mathfrak{M} = n_2 \mathfrak{M}_1$.

Semblablement $\mathfrak{L}_2 = n_2 (\mathfrak{M}_2 + \mathfrak{M}'_2)$ avec $\mathfrak{M} = n_1 \mathfrak{M}_2$. Il en résulte que $\mathfrak{M}^2 = n_1 n_2 \mathfrak{M}_1 \mathfrak{M}_2 < \mathfrak{L}_1 \mathfrak{L}_2$. Les deux bobines coaxiales étant de plus en plus écartées l'une de l'autre, le flux qu'elles s'envoient mutuellement diminue d'une manière graduelle. Il devient nul ainsi que le coefficient d'induction mutuelle quand elles se trouvent à l'infini l'une de l'autre. Il est également nul si les deux bobines sont placées à angle droit.

Induction dans les masses métalliques. Courants de Foucault. — Jusqu'ici nous n'avons envisagé que l'induction se produisant dans des circuits linéaires. Une masse métallique, qui peut d'ailleurs être considérée comme le résultat de la juxtaposition de circuits linéaires soudés l'un à l'autre, sera le siège de phénomènes d'induction dès que ces circuits embrasseront des flux magnétiques variables.

Par exemple, en faisant tourner un disque métallique massif D D (fig. 151) entre les pôles opposés de deux électro-aimants, il se développera, dans toutes les parties du disque soumises à des variations de flux, des *courants dits de Foucault*.

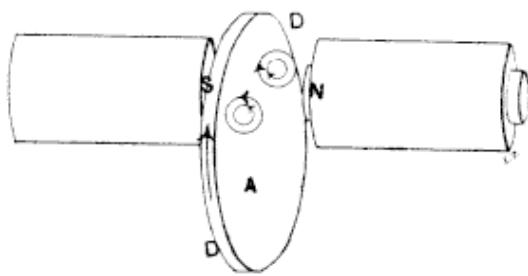


FIG. 151.

Dans la partie A du disque où les flux vont en augmentant, la force électromotrice d'induction est négative et les courants auront le sens de la flèche; dans la partie médiane au droit des expansions polaires où le flux reste constant aucun courant ne sera développé; enfin dans la partie A' symétrique de A, où le flux diminue, la force électromotrice d'induction est positive, les courants sont de sens opposé à ceux induits en A.

On peut aisément tracer les lignes équipotentielles dans un disque animé d'un mouvement de rotation uniforme, en appliquant en différents points deux balais métalliques légers en rapport avec un galvanomètre. Les directions des courants seront perpendiculaires aux lignes équipotentielles.

Les courants circulaires ainsi développés engendrent des flux magnétiques donnant, dans la partie A, des pôles de mêmes noms que les pôles inducteurs dont ils s'approchent, et dans la partie A' des pôles de noms contraires. Il en résulte un couple résistant dont le travail a pour contre-partie l'effet Joule créé par les courants dans le disque.

C'est une conséquence de la loi de Lenz que Foucault a mise en évidence de la manière suivante: le disque de la figure 151 est lancé d'un mouvement de rotation rapide qui exigerait un temps fort long pour que l'arrêt se produise spontanément. Mais, dès que l'on rend actif l'électro-aimant, le disque s'arrête.

presque instantanément. Si, vainquant le couple résistant notable qu'il oppose tant que le courant passe, on entretient son mouvement de rotation, il s'échauffe par effet Joule. On dispose ainsi d'un moyen dont M. Violle s'est servi pour mesurer l'équivalent mécanique de la caloric.

De même, si l'on fait osciller une masse métallique entre les pôles d'un électro-aimant, les oscillations s'effectuent à l'ordinaire tant que celui-ci est inactif; dès que le courant le parcourt, la masse vient directement s'arrêter sur la verticale comme si elle se trouvait tout à coup plongée dans un milieu visqueux s'opposant énergiquement à son mouvement.

Inversement une aiguille aimantée oscillant dans le voisinage de parois métalliques aura son mouvement amorti. Cette propriété est mise à contribution pour rendre apériodique l'équipage des galvanomètres.

Moyens de réduire les courants Foucault. — Appelons r la résistance d'un circuit dans lequel se propagent des courants de Foucault, i leur intensité. La puissance développée par effet Joule est :

$$i^2 r = \frac{e^2}{r} = \frac{\left(\frac{d \mathcal{N}}{d t}\right)^2}{r}$$

Or la quantité $d \mathcal{N}$ représente la variation de flux à travers une section S normale à celui-ci. Plus nous diminuons cette section, plus la variation est faible. Comme d'autre part la résistance des circuits dans lesquels se propagent les courants ne varie pas, puisque si leur section devient plus petite leur longueur se réduit à proportion, on voit que la perte d'énergie par courants de Foucault sera diminuée autant qu'on le veut en sectionnant convenablement les masses métalliques sièges des variations de flux. Dans le cas du disque, il suffira de le diviser en secteurs plus ou moins étroits par des traits de scie radiaux. Quand il s'agit d'électro-aimants parcourus par des courants variables, on constitue leur noyau soit de minces fils en fer vernis ou plutôt oxydés, le vernis et l'oxyde jouant le rôle d'isolants; soit de tôles oxydées minces empilées dans le sens des lignes de force.

REMARQUE. — La résistance des matériaux croissant avec la température, la quantité de chaleur développée par seconde $\frac{e^2}{r}$ diminue avec l'augmentation de température des masses métalliques.

Ecran électromagnétique. — Les courants de Foucault développent un champ magnétique opposé au champ inducteur, réduisant par conséquent celui-ci et enrayant sa propagation à travers la masse métallique. On en conclut qu'une enveloppe métallique joue, vis-à-vis de son contenant, le rôle d'écran pour les actions électromagnétiques. L'effet est d'autant plus marqué que le métal utilisé est plus conducteur, puisque toutes choses égales, les courants sont alors plus intenses.

§ 4. — **Valeur du coefficient de selfinduction dans le cas d'un circuit constitué par deux longs conducteurs parallèles.**

A. Conducteurs filiformes. — Soient deux conducteurs filiformes C, C' , (fig. 152) traversés par un courant i , parallèles, situés à une distance d et suffisamment longs pour pouvoir être considérés comme indéfinis.

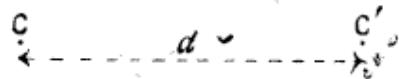


FIG. 152.

Le passage du courant dans les deux conducteurs va créer un flux traversant la boucle qu'ils forment et c'est ce flux par unité de courant qui, étant entièrement embrassé par celui-ci, constituera le coefficient de selfinduction du circuit. Chaque conducteur intervenant pour moitié dans la formation du flux, il suffira de calculer le flux dû à un conducteur, puis de le doubler. Soit μ_0 la perméabilité du milieu. Considérons le flux compris dans l'espace limité par deux plans normaux aux conducteurs et distants d'un centimètre.

L'intensité du champ en un point distant de a du conducteur C est $\frac{2i}{a}$. Le flux dans un tube concentrique d'épaisseur da est $\mu_0 \frac{2i da}{a}$ et le flux compris de o à d

$$\int_0^d \mu_2 2i \frac{da}{a} = 2\mu_2 i \log_e d.$$

Le second conducteur donnera le même flux, soit un flux total $4\mu_2 i \log_e d$ et le coefficient de selfinduction du circuit par unité de longueur aura pour valeur $4\mu_2 \log_e d$.

B. Conducteurs cylindriques. — Les deux conducteurs de perméabilité μ_1 , écartés de d centimètres ont un rayon r cm (fig. 153).

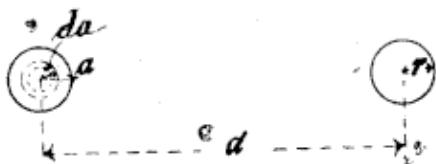


FIG. 153.

Nous ne pourrons calculer le flux relatif au coefficient de selfinduction comme dans le cas précédent, attendu que le courant n'embrasse que partiellement la partie du flux magnétique intérieur régnant dans les conducteurs.

Par exemple, pour tous les points situés à une distance a du centre le flux magnétique extérieur au cercle de rayon a intervient au point de vue de la selfinduction parce que toutes les lignes de force encerclent les filets de courant passant par ces points, tandis qu'au contraire toute la partie du flux comprise dans la section πa^2 n'intervient pas, étant intérieure à ces courants.

Pour déterminer le coefficient de selfinduction \mathcal{L} , relatif au conducteur lui-même, nous appliquerons l'équation trouvée précédemment :

$$q = \frac{\mathcal{L}}{R} = \frac{\mathcal{L} i}{R}.$$

Considérons un tube concentrique au conducteur, de rayon intérieur a et d'épaisseur da . En supposant le courant i uniformément réparti dans toute la section πr^2 du conducteur, la section centrale πa^2 sera parcourue par une intensité

$$\frac{i \pi a^2}{\pi r^2} = \frac{i a^2}{r^2}.$$

L'effet magnétique de ce courant sur un point quelconque du tube considéré sera le même que s'il était concentré suivant l'axe (p. 171) et l'intensité du champ qu'il développe à la distance a sera dans ces conditions :

$$\frac{2 i a^2}{a r^2} = \frac{2 i a}{r^2},$$

l'induction magnétique résultante étant

$$\mathfrak{B}_a = \frac{2 \mu_1 i a}{r^2}$$

et le flux compris par unité de longueur dans le tube élémentaire considéré :

$$d \mathfrak{N}_a = \mathfrak{B}_a d a = \frac{2 \mu_1 i a d a}{r^2}.$$

C'est ce flux qui, embrassant le conducteur intérieur compris dans le tube, joue un rôle efficace au point de vue de la selfinduction.

Nous pourrons donc écrire, en appelant ρ la résistivité du métal considéré, que la quantité dq induite dans le conducteur de rayon a par le développement ou la disparition du flux $d \mathfrak{N}$ aura pour expression par unité de longueur :

$$d q = \frac{2 \mu_1 i a d a}{r^2} \times \frac{\pi a^2}{\rho}$$

d'où pour toute l'épaisseur du conducteur

$$q = \int_0^r \frac{2 \mu_1 i \pi a^3 d a}{\rho r^2} = \frac{\mu_1 i \pi r^2}{2 \rho} = \frac{\mathfrak{L}_1 i}{R} = \mathfrak{L}_1 i \times \frac{\pi r^2}{\rho}$$

et enfin $\mathfrak{L}_1 = \frac{\mu_1}{2}$.

A ce coefficient viendra s'ajouter celui \mathfrak{L}_2 relatif à l'espace compris extérieurement au conducteur considéré jusqu'à l'axe de l'autre.

Le champ magnétique développé en dehors de C à la distance b de son axe $\mathfrak{N}_2 = \frac{2 i}{b}$, provoque une induction magnétique $\mathfrak{B}_2 = \frac{2 \mu_2 i}{b}$. Dans un tube élémentaire d'épaisseur $d b$, de longueur 1, le flux sera :

$$d \mathfrak{N}_2 = \frac{2 \mu_2 i d b}{b}$$

et le flux extérieur cherché

$$\mathfrak{N}_2 = \int_r^d \frac{2 \mu_2 i d b}{b} = 2 \mu_2 i \log_e \frac{d}{r}$$

d'où

$$\mathfrak{L}_2 = 2 \mu_2 \log_e \frac{d}{r}.$$

En réalité la valeur exacte est un peu plus compliquée que celle indiquée ci-dessus, attendu que dans le demi-conducteur C' la perméabilité est, non μ_2 , mais μ_1 . Toutefois le champ magnétique dû à C étant le plus faible à la distance d nous pourrons admettre que les perméabilités de l'air et du métal y sont les mêmes. D'ailleurs, pour les conducteurs industriels que nous aurons à envisager, $\mu_2 = \mu_1$.

Le coefficient de selfinduction dû à l'unité de longueur d'un seul des conducteurs est donc ainsi

$$\mathfrak{L}_1 + \mathfrak{L}_2 = \frac{\mu_1}{2} + 2 \mu_2 \log_e \frac{d}{r}$$

et pour la boucle formée par les deux conducteurs

$$\mathfrak{L} = 2 \left(\frac{\mu_1}{2} + 2 \mu_2 \log_e \frac{d}{r} \right) \quad (1)$$

S'il s'agit de conducteurs en cuivre suspendus dans l'air,

$$\mu_1 = \mu_2 = 1.$$

d'où

$$\mathfrak{L} = 2 \left(\frac{1}{2} + 2 \log_e \frac{d}{r} \right) \quad (2)$$

Pour une longueur L du circuit le coefficient sera L fois plus grand attendu qu'il est proportionnel à sa longueur.

La partie du coefficient relative à l'espace occupé par le métal, $\frac{1}{2}$, équation (2), est en général beaucoup plus faible que celle correspondant au milieu ambiant $2 \log_e \frac{d}{r}$. Si nous considérons en effet un circuit constitué de deux conducteurs aériens en cuivre, distants de 25 cm, le second terme vaut 3,332 soit près de sept fois le premier.

D'autre part l'expression logarithmique relative à la partie du circuit magnétique extérieure aux conducteurs montre qu'à partir d'un certain écartement l'augmentation du coefficient de selfinduction devient négligeable. Par exemple :

pour $r = 1$ et $d = 10$ cm, $\mathfrak{L}_2 = 2,736$

» = » = 15 » = 3,04

» = » = 20 » = 3,26.

Donc en doublant l'écartement (passant de 10 à 20 cm) le coefficient de selfinduction n'augmente que de 20 % environ.

Enfin, en ce qui concerne le flux dans le conducteur lui-même, l'expression trouvée précédemment pour le flux élémentaire montre que l'induction y croît du centre à la périphérie.

CHAPITRE X.

Appareils de mesure.

Appareils électromagnétiques : galvanomètres.

Galvanomètre des tangentes. — Nous avons vu comment Schweigger a amplifié l'action exercée sur l'aiguille aimantée (expériences d'Oersted) en enroulant dans son multiplicateur le conducteur entourant l'aiguille aimantée suivant un plus ou moins grand nombre de spires. Un galvanomètre est ainsi constitué, lequel permet de mesurer l'intensité d'un courant par l'action exercée sur l'aiguille aimantée.

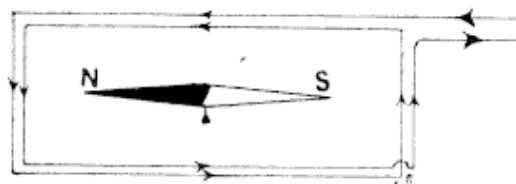


FIG. 154.

Il se compose (fig. 154) d'un cadre vertical portant la bobine de fil, au centre duquel une aiguille aimantée est suspendue horizontalement.

Le plan du cadre étant mis en coïncidence avec le méridien magnétique, contient l'axe magnétique de l'aiguille. Dès lors le champ magnétique terrestre et celui dû au courant agissent à angle droit. Sous leur influence combinée l'aiguille dévie et se place dans une position faisant un angle α (fig. 155) avec sa position primitive. Cherchons la condition d'équilibre. Admettons que le champ dû au courant soit uniforme dans la région où se trouve l'aiguille et soit \mathcal{H}' son intensité par unité de courant. \mathcal{M} étant le moment magnétique de l'aiguille, le couple dû au courant aura pour valeur $\mathcal{M} \mathcal{H}' i \cos \alpha$. Le couple dû à la composante horizontale \mathcal{H} du champ terrestre $\mathcal{M} \mathcal{H} \sin \alpha$ agit en sens inverse du premier. L'équilibre existe quand

$$\mathcal{M} \mathcal{H}' i \cos \alpha = \mathcal{M} \mathcal{H} \sin \alpha \text{ ou } i = \frac{\mathcal{H}}{\mathcal{H}'} \operatorname{tg} \alpha$$

et l'on voit que, pourvu que les deux champs soient uniformes et à angles droits, la déviation est indépendante du moment

magnétique de l'aiguille, donc de sa forme et de son aimantation et *la tangente de la déviation est proportionnelle à l'intensité du courant*, d'où le nom donné à l'appareil.

La condition essentielle de l'uniformité du champ s'obtient aisément en employant une petite aiguille et n'admettant que de faibles déviations, ces dernières s'observant avec exactitude par une des méthodes objective ou subjective indiquées précédemment. Comme nous l'avons vu alors, la lecture donne $\operatorname{tg} 2\alpha$ et, si l'on ne dépasse pas 3° , l'erreur commise en confondant l'arc avec sa tangente peut généralement être négligée.

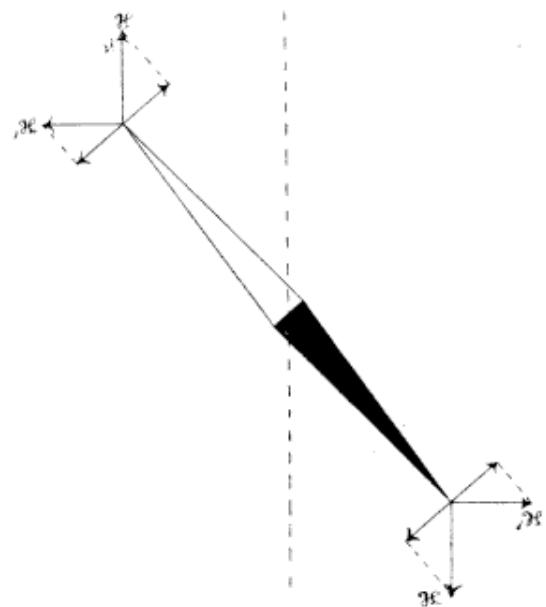


FIG. 155.

BOUSSOLE DES TANGENTES. — L'appareil permet de faire des mesures absolues *si l'on peut calculer le champ \mathcal{M}' développé au centre du cadre par l'unité du courant*. Or, nous avons établi précédemment que l'intensité magnétique au centre d'un cadre circulaire de rayon R comportant n spires a pour valeur

$$\frac{2\pi n i}{R},$$

ce qui donne

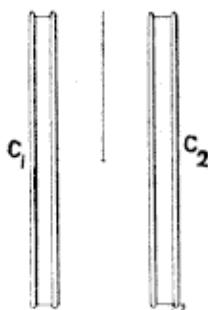
$$\mathcal{M}' = \frac{2\pi n}{R}.$$

Dans la boussole des tangentes, l'enroulement possédant un nombre n connu de spires est posé sur un cadre circulaire de rayon R .

APPLICATION. — Posons $R = 20$, $n = 20$ d'où $\mathcal{M}' = 6,28$. Admettons $\mathcal{M} = 0,2$ et supposons une déviation de 5 cm à un mètre de distance.

$$\operatorname{Tang} 2\alpha = \frac{5}{100} = \frac{1}{20}, \text{ d'où } \alpha = \frac{1}{40} \text{ et}$$

$$i = \frac{0,2}{6,28} \times \frac{1}{40} = 0,000798 \text{ unités C. G. S.} = 0,00798 \text{ ampère.}$$



On assure davantage l'uniformité du champ en utilisant comme Helmholtz deux cadres C_1 , C_2 , (fig. 156) égaux, placés parallèlement à une distance égale à leur rayon commun, une petite aiguille dont le plan est parallèle à celui des cadres étant suspendue à leur centre de figure.

Galvanomètres usuels. — Pour que la formule

FIG. 156. du galvanomètre des tangentes soit applicable, il faut que son cadre ait des dimensions telles que sa sensibilité devienne très faible. Or, en pratique, comme il importe surtout de disposer d'appareils sensibles, on est amené à enrouler le fil le plus près possible de l'aiguille et la bobine revêt la forme d'un cadre rectangulaire. Quelle est alors la loi reliant l'intensité et la déviation ? Posons $i = f(\alpha)$ et développons par la formule de Mac-Laurin

$$i = f(0) + \frac{\alpha}{1} f'(0) + \frac{\alpha^2}{1 \cdot 2} f''(0) + \dots$$

La fonction s'annulant avec α doit être indépendante des termes qui ne contiennent pas ce facteur, donc $f(0) = 0$. D'autre part, si la déviation est très faible, on peut négliger les termes à partir du 3^e, de manière qu'il reste

$$i = \alpha f'(0) = A \alpha$$

et la déviation est proportionnelle à l'intensité.

On détermine le facteur de proportionnalité $A = \frac{i}{\alpha}$, qui correspond au *courant par unité d'angle* et s'appelle *facteur de réduction* du galvanomètre, en le faisant traverser par un courant d'intensité connue et notant la déviation.

Le plus souvent les lectures se font par réflexion et l'on est amené, pour définir la sensibilité des galvanomètres, à exprimer le nombre de degrés correspondant à l'unité de courant, c'est-à-dire

$$k = \frac{\alpha}{i} = \frac{1}{A},$$

facteur qui s'appelle la *constante permanente* du galvanomètre. Dans ces conditions l'intensité i s'exprime par la formule

$$i = \frac{\alpha}{k}.$$

Enfin, on appelle *formule de mérite* d'un galvanomètre, la valeur du courant qui produit une déviation d'un millimètre sur une échelle située à un mètre.

Shunts. — Si l'intensité du courant est forte, on peut la ramener dans des limites convenables en établissant en dérivation sur le galvanomètre une résistance telle que celui-ci ne soit traversé que par une fraction connue du courant total. Appelons g sa résistance, s celle du shunt, I le courant total et i l'intensité passant dans le galvanomètre. D'après la loi des courants dérivés nous savons que

$$i = I \frac{s}{g+s} \quad \text{ou} \quad I = i \frac{g+s}{s} = m i.$$

Le facteur $\frac{g+s}{s} = m$, par lequel il faut multiplier l'intensité du courant traversant le galvanomètre pour obtenir le courant total, s'appelle *pouvoir multiplicateur du shunt*.

Ce facteur est généralement pris = 10, 100, 1000.

Pour qu'il en soit ainsi, il suffit que les résistances g et s satisfassent aux équations :

$$\frac{g+s}{s} = 10, 100, 1000, \dots$$

d'où

$$9s, 99s, 999s \dots = g$$

et

$$s = \frac{g}{9}, \frac{g}{99}, \frac{g}{999} \dots$$

Les shunts sont généralement disposés comme l'indique la fig. 157. Le galvanomètre se raccorde aux bornes G_1 , G_2 ; le circuit principal aux bornes B_1 , B_2 . Entre les deux barres G_1 , B_1 , G_2 , B_2 se trouvent les résistances à mettre en dérivation. Elles entrent en jeu quand on réunit par une cheville ou fiche conique métallique (le tout est généralement en cuivre), les mâchoires M_1 , M_2 ou M_3 . La même fiche, introduite en C , met le galvanomètre en court-circuit.

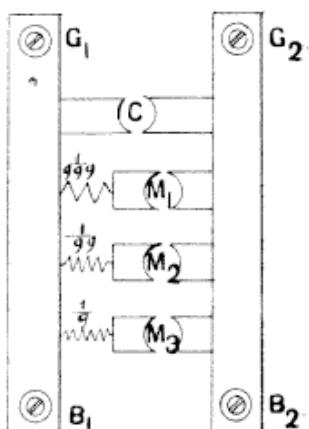


FIG. 157.

REMARQUE. — La résistance combinée du galvanomètre et de son shunt = $\frac{g}{10}, \frac{g}{100}, \frac{g}{1000}, \dots$

Soit un circuit de résistance totale R , alimenté par une source de force électromotrice E . L'intensité du courant qui le traverse est

$$i = \frac{E}{R}.$$

En y introduisant un galvanomètre de résistance g , l'intensité change et nous mesurons $i' = \frac{E}{R+g}$ au lieu de i . Pour mesurer i , nous devons donc diminuer R d'une quantité égale à g .

D'autre part en changeant de shunt, la résistance combinée varie et l'intensité se modifie. S'il s'agit d'un circuit dans lequel le courant doit rester invariable, il faudra maintenir la résistance constante, quel que soit le shunt avec lequel on opère et, par conséquent, placer en série avec l'appareil shunté des résistances compensatrices. Celles-ci seront :

pour les shunts au $\frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000}, \dots, \frac{1}{m}$
donnant les résistances combinées : $\frac{g}{10}, \frac{g}{100}, \frac{g}{1000}, \dots, \frac{g}{m}$
$$g - \frac{g}{10} = \frac{9}{10} g, g - \frac{g}{100} = \frac{99}{100} g, \dots, \frac{m-1}{m} g.$$

Moyens employés pour augmenter la sensibilité des galvanomètres à aimant mobile. — 1^o FORME DE LA BOBINE. — Cherchons avec quelle forme d'enroulement nous obtiendrons le maximum d'effet.

Nous avons établi que l'action d'une spire, en un point P situé à une distance l sur son axe, est

$$\mathcal{M} = \frac{\pm 2 \pi i R^2}{(l^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}}$$

le signe étant + ou — suivant le côté de la spire se trouvant en face de P .

Les spires pour lesquelles l'action est égale à \mathcal{M} auront leurs coordonnées l et R satisfaisant à l'équation :

$$\frac{\pm 2 \pi i R^2}{(l^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} = \mathcal{M} = c^{10}.$$

Si l'on trace la courbe représentée par cette équation on trouve qu'elle présente deux parties symétriques par rapport

aux deux axes (fig. 158). Toutes les spires situées à l'intérieur de l'aire délimitée par cette double courbe ont une action plus grande que celles passant par la courbe P A B C D elle-même et celles situées en dehors, ont une action plus faible. La forme rationnelle pour la section de la bobine, sera donc celle donnée par P A B C D, P A' B' C' D'. On est toutefois obligé de ménager un creux cylindrique suivant son axe, pour permettre le passage et le déplacement d'ailleurs très faible de l'aiguille. De même on rectifie les côtés A B, C D, A' B', C' D' où viennent les joues de la carcasse maintenant l'enroulement. C'est à ce gabarit que s'est arrêté Lord Kelvin.

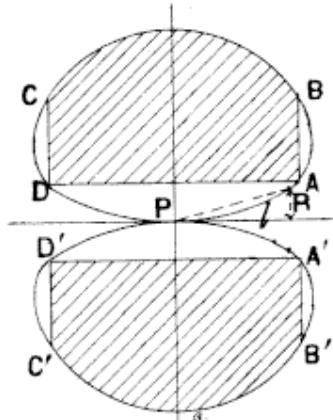


FIG. 158.

2^o AIMANT COMPENSATEUR. — On peut réduire autant qu'on veut l'action de la composante horizontale terrestre et par suite augmenter la sensibilité, en plaçant au-dessus de l'aiguille

un aimant compensateur N S (fig. 159) produisant un champ de direction opposée au champ terrestre. On modifie l'intensité de son action en le fixant plus ou moins haut à l'aide d'une vis de serrage V₁. Une vis tangente V₂ permet d'autre part de le faire tourner. On donne ordinairement à cet aimant la forme d'un arc de cercle, afin de pouvoir amener au besoin les pôles dans le prolongement de l'aiguille.

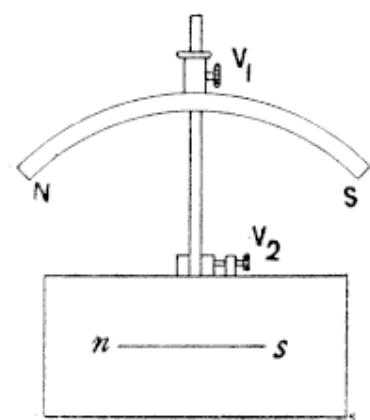


FIG. 159.

3^o AIGUILLES ASTATIQUES. — En fixant en dehors du cadre, à l'équipage portant l'aiguille une seconde aiguille semblable inversément orientée s' n' (fig. 160) l'action du cadre, d'ailleurs concordante sur celle-ci, s'exercera sur un système beaucoup plus aisément déviable, le couple résultant terrestre pouvant être à peu près annulé.

On obtient un appareil plus symétrique et une action encore plus énergique, en employant deux cadres super-

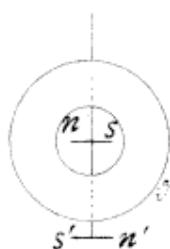


FIG. 160.

posés enroulés en sens inverse, agissant chacun sur une des aiguilles astatiques.

Dans les appareils de grande sensibilité, on remplace généralement chaque aiguille par une série de petits barreaux aimantés parallèles.

Afin d'éviter la force démagnétisante considérable qui s'exerce sur ces petites aiguilles très courtes et très rapprochées, M. Weiss constitue son système astatique de deux aiguilles verticales aimantées en sens inverse dont les pôles opposés, placés au centre de chacune des bobines, forment un petit aimant dont la longueur peut être réduite de 2 à 3 millimètres, ce qui permet de donner une grande compacité à l'appareil.

Amortissement. — Quand on lance dans le galvanomètre un courant capable de donner une déviation permanente α , on constate que l'aiguille passe au-delà de la position d'équilibre, revient en deçà, repasse au-delà et oscille jusqu'à ce que la puissance vive acquise se soit dépensée en travail des résistances passives.

Afin d'augmenter la rapidité des lectures, on *amortit* les oscillations, soit mécaniquement, soit magnéto-électriquement.

En fixant à l'équipage mobile des palettes très légères qui oscillent avec lui, on augmente considérablement la résistance de l'air et par suite on produit un couple résistant élevé.

Si, d'autre part, on place dans le voisinage de l'aimant des conducteurs massifs, le déplacement de l'aiguille y induit des courants lesquels, en vertu de la loi de Lenz, tendent à s'opposer à son mouvement. Quand la résistance du circuit galvanométrique est faible, les courants engendrés dans la bobine suffisent pour amortir complètement le mouvement. Dans le cas contraire, il convient de façonner en cuivre rouge le cadre sur lequel s'effectue l'enroulement.

L'expérience montre que les amplitudes des oscillations successives $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots$ décroissent suivant les termes d'une progression géométrique, c'est-à-dire que l'on a

$$\frac{\alpha_0}{\alpha_1} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_3} \dots = e^{\lambda}.$$

Posons la constante égale à e^{λ} , e étant la base des logarithmes népériens. λ sera le logarithme népérien du rapport de deux amplitudes consécutives ou de la raison de la progression

géométrique. On l'appelle *décrément logarithmique* des oscillations et on le prend comme mesure de l'amortissement. La durée de l'oscillation amortie est naturellement plus grande que celle du système non amorti.

Dès que l'amortissement devient suffisant, les oscillations disparaissent. Ecartée de sa position d'équilibre, l'aiguille y revient directement, en prenant une vitesse croissante, qui passe par un maximum et se réduit à zéro quand l'aiguille atteint sa position d'équilibre. Ses déplacements sont alors dits *apériodiques*.

Galvanomètre différentiel. — En enroulant simultanément sur le cadre du galvanomètre deux fils identiques, lorsque ces enroulements sont traversés par un même courant, leurs actions s'ajoutent; elles se retranchent si les courants qui les traversent sont de sens contraires. En particulier si ces courants sont égaux dans le second cas, l'action est nulle.

Le galvanomètre différentiel doit satisfaire à deux conditions:

1^o *L'action des deux bobines doit être la même sur l'aiguille.* On s'en assure en montant les deux bobines en série, de manière que le courant les parcourt en sens inverse. L'aiguille doit rester au zéro.

2^o *La résistance des deux enroulements doit être la même.* Il en est bien ainsi si les deux bobines étant mises en dérivation l'une par rapport à l'autre, mais de manière que les courants les traversent en sens inverse, l'aiguille reste encore immobile.

Galvanomètre Kelvin. —

Dans le galvanomètre Kelvin (fig. 161) nous trouvons réunis les divers moyens passés en revue pour augmenter la sensibilité: gabarit donnant le maximum d'effet, aimant compensateur, système astatique constitué par plusieurs aiguilles collées sur le dos même du miroir dans le cadre supérieur. Dans le cadre inférieur une lame en mica placée perpendiculairement aux aiguilles assure l'amortissement.

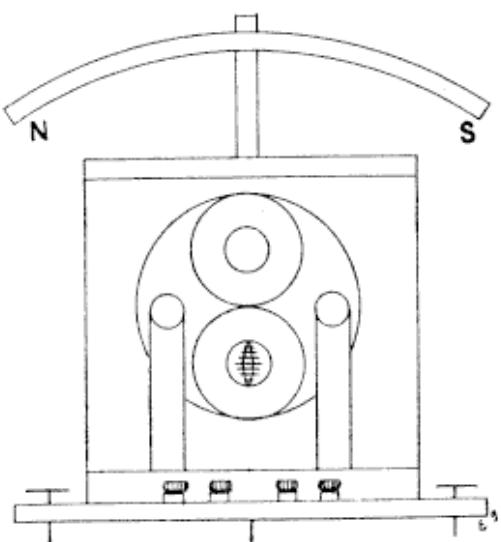


FIG. 161.

La sensibilité obtenue est très grande : un courant d'un millième de microampère produit une déviation de 50 millimètres sur une échelle placée à un mètre.

En faisant passer des courants dans le même sens dans les deux cadres, on le transforme en galvanomètre différentiel.

Galvanomètre Deprez-d'Arsonval. — Plusieurs aimants en fer à cheval accolés N S (fig. 162) portent deux pièces polaires P_1 , P_2 en fer doux creusées cylindriquement, entre lesquelles

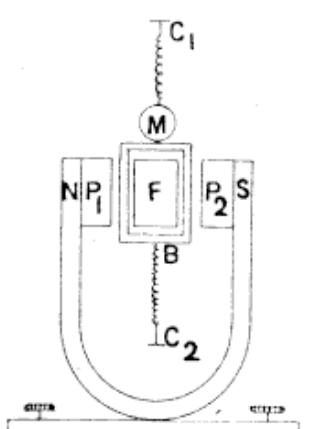


FIG. 162.

un cylindre de fer doux F concentre le champ magnétique. Dans les deux entre-fers existant entre le cylindre et les pièces polaires, peut osciller un cadre rectangulaire B supporté par un fil de cocon, tandis que deux conducteurs en bronze C_1 , C_2 , enroulés en boudin et formant ressort lui amènent le courant. Un miroir M est attaché à sa partie supérieure. Quand le courant passe, le plan du cadre tend à se placer perpendiculairement au champ magnétique. L'équilibre s'établit quand le couple moteur est équilibré par le couple résistant de torsion du fil.

D'après la loi de Laplace, il s'exerce sur chaque conducteur vertical une force proportionnelle à l'intensité \mathcal{H} du champ, à la longueur du fil (ou hauteur de la bobine), et à l'intensité du courant, soit $\mathcal{H}li$. Cette force étant normale au plan du champ et de l'élément de courant, donne une composante perpendiculaire au plan de la bobine $Hli \cos \alpha$, laquelle tend à faire tourner la spire correspondante par application d'un couple $\frac{a}{2} \mathcal{H}li \cos \alpha$ (fig. 163), a étant la largeur de

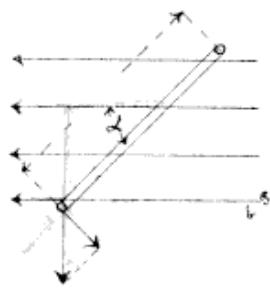


FIG. 163.

la spire. Un effet égal et de sens inverse se produit sur le côté vertical conjugué de la spire, d'où le couple total $a \mathcal{H}li \cos \alpha$ et puisqu'il y a n spires, $n a \mathcal{H}li \cos \alpha = n \mathcal{H}si \cos \alpha$, s étant la surface moyenne d'une spire. Les côtés horizontaux ne traversant pas le champ, ou le traversant dans le sens des lignes de force ne sont pas influencés.

La bobine tourne sous l'effet du couple moteur qui lui est appliqué, jusqu'à ce que le couple de torsion du fil, $C \alpha$, l'équilibre d'où

$$n \mathcal{M} s i \cos \alpha = C \alpha. \quad (1)$$

L'angle α étant très petit, on peut admettre sans erreur sensible que $\cos \alpha = 1$ et

$$i = \frac{C \alpha}{n H s} = \frac{\alpha}{k} \quad (2)$$

la constante permanente k se détermine en faisant traverser l'appareil par un courant i' d'intensité connue provoquant une déviation α' , ce qui donne

$$k = \frac{\alpha'}{i'}.$$

Ce galvanomètre est parfaitement apériodique, tant que la résistance du circuit n'atteint pas une valeur trop grande.

La formule (1) montre, que l'effet dû à la bobine seule, est

$$n s i = S i,$$

que l'on peut appeler *son moment magnétique*.

La maison Carpentier de Paris fournit des galvanomètres de ce type donnant une déviation de 1 mm à 1 m de distance pour un courant de 8,47 microampères avec une bobine mesurant 1 ohm et la même déviation pour 0,435 de microampère seulement, avec une bobine de 200 ohms.

Electrodynamomètres.

Dans l'appareil précédent, le couple moteur de torsion agissant sur la bobine est égal à son moment magnétique multiplié par l'intensité du champ magnétique dans lequel elle se trouve. Ce dernier peut être développé par une bobine fixe qui traverse un courant i' . Ce champ, supposé uniforme, aura pour valeur $B i'$, B étant une constante et le couple moteur de la bobine pourra dès lors s'exprimer par

$$B i' S i \cos \alpha.$$

Ecrivons l'égalité avec le couple de torsion du ressort directeur quand on atteint l'équilibre

$$B i' S i \cos \alpha = C \alpha$$

Avant que la déviation n'ait lieu, les axes des deux bobines doivent être placés à angles droits. Si, la déviation produite on les ramène dans leur position initiale, en agissant sur le ressort au moyen d'un micromètre de torsion, le $\cos \alpha$ du premier membre devient l'unité, et il reste

$$B i' S i = C \alpha.$$

Si en outre $i' = i$, la déviation, ou plutôt l'angle de torsion du micromètre est proportionnel au carré de l'intensité du courant et l'on a affaire à un *électrodynamomètre*. Dans ce cas on a : $i^2 B S = C \alpha$ ou $i^2 = \frac{\alpha}{k^2}$. L'appareil est donc, somme toute, basé sur l'action mutuelle des courants.

Electrodynamomètre Siemens.— La bobine B_1 (fig. 164) fixe, se trouve à l'intérieur de la bobine mobile B_2 réduite à une seule spire suspendue par un ressort à boudin en maillechort ou en bronze et par un fil de cocon axial. Le courant passe dans la spire mobile, par l'intermédiaire de deux godets à mercure superposés. Un index I fixé à la bobine mobile se déplace au-dessus d'un cadran gradué, tandis qu'un micromètre de torsion permet de ramener l'équipage dans sa position initiale.

Les axes des deux bobines se trouvent à angle droit. Dès que le courant passe, le couple moteur appliqué à B_2 tend à amener la coïncidence des axes. On ramène l'aiguille au zéro en exerçant un couple de torsion sur le ressort à boudin au moyen du micromètre.

On a donc :

$$i = \frac{I}{k} \sqrt{\alpha}.$$

L'action du magnétisme terrestre sur la bobine mobile est négligeable, par le fait qu'elle ne possède qu'une spire.

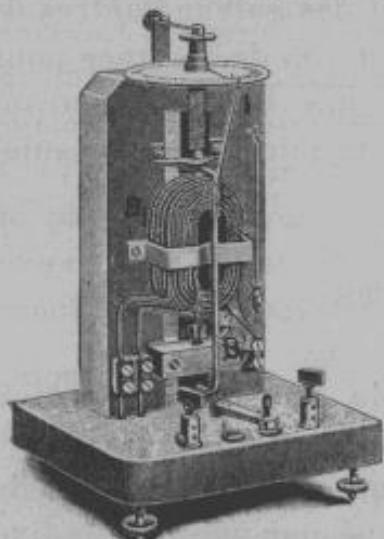


FIG. 164.

Electrodynamomètre-balance de Kelvin. — Des bobines plates B_1 , B_2 , (fig. 165) auxquelles le courant est amené par des faisceaux plats de fils de cuivre minces F_1 , F_2 , servant aussi à les suspendre, sont placées en regard d'autres bobines traversées par le courant de manière que leurs actions concordent (fig. 166).

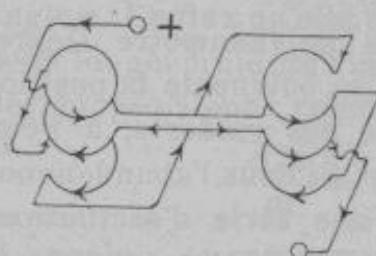


FIG. 165.

Le fléau est ramené suivant l'horizontale au moyen de poids mobiles permettant de mesurer l'intensité du courant puisque l'on a encore

$$i = \frac{1}{k} \sqrt{\alpha} = \frac{1}{k'} \sqrt{p}$$

Les électrodynamomètres ne permettent pas d'atteindre le degré de sensibilité auquel on arrive aisément au moyen des galvanomètres, mais ils présentent l'avantage de donner des indications indépendantes de la direction du courant.

Appareils thermiques. Calorimètres.

D'après la loi de Joule, la quantité de chaleur développée dans un conducteur par le passage d'un courant i pendant le temps t est $w = i^2 r t$. Donc, en enfermant un conducteur de résistance connue dans un calorimètre on peut, en mesurant la quantité de chaleur dégagée en un temps donné, déduire l'intensité moyenne du courant. Mais les calorimètres ordinaires sont d'une manipulation lente, compliquée, difficile. Aussi a-t-on construit des appareils dans lesquels la quantité de chaleur développée est directement estimée par la dilatation linéaire du conducteur traversé par le courant.

Appareil Hartmann et Braun.
— Un fil a (fig. 167) en alliage



FIG. 167.

platine-argent est tiré transversalement par un fil de laiton *b*, tiré lui-même par un ressort *r* au moyen d'un fil passant sur une petite poulie portant l'aiguille de l'appareil.

Quand le fil *a* s'allonge par échauffement, il fléchit, le fil *b* également et la poulie tourne, provoquant le déplacement de l'aiguille.

Mesure d'une décharge instantanée.

Résistance critique. — Prenons un galvanomètre Deprez d'Arsonval de résistance *g* et écartons sa bobine de la position d'équilibre. Nous emmagasinons dans ses ressorts, à l'état potentiel, un certain travail mécanique. Si nous l'abandonnons alors à elle-même, elle va effectuer une série d'oscillations d'amplitude lentement décroissante, les frottements de la bobine contre l'air étant très minimes et l'amortissement étant conséquemment fort faible.

Fermons le circuit du galvanomètre sur une grande résistance. La bobine traversant le champ magnétique de l'instrument est le siège d'une force électromotrice d'induction qui, le circuit étant maintenant fermé, peut donner lieu à un courant d'ailleurs faible puisque la résistance est grande, avec dépense d'énergie électrique. L'amortissement est devenu plus fort qu'à circuit ouvert; la bobine exécute un moins grand nombre d'oscillations avant d'arriver au repos.

Diminuons progressivement la résistance intercalée. Les courants devenant de plus en plus intenses, nous constatons que l'amortissement croît de plus en plus jusqu'au moment où, pour une résistance extérieure *r*, le cadre écarté de sa position d'équilibre, y revient en une seule oscillation. Le mouvement est devenu apériodique et la résistance totale du circuit $R = r + g$ est dite *résistance critique*.

Au lieu d'écarter la bobine d'un angle α , on obtient le même résultat en lui communiquant une impulsion brusque qui l'amène au même déplacement angulaire.

Galvanomètre balistique. — Cette impulsion peut être provoquée par le passage d'un courant. Supposons que le galvanomètre soit traversé par une quantité d'électricité $q = \int_0^T i dt$

pendant un temps τ suffisamment court pour que l'équipage, grâce à son inertie, n'ait pu se déplacer que d'une quantité négligeable vis-à-vis des déplacements subséquents.

Nous avons vu qu'un courant i traversant les n spires de surface moyenne s de la bobine d'un galvanomètre Deprez d'Arsonval, donne un couple moteur $n \mathcal{K} s i$.

Supposons qu'au moment où le couple moteur possède la valeur instantanée ci-dessus, la bobine se soit déplacée d'un angle α . Le flux qu'elle embrasse est $n \mathcal{K} s \sin \alpha = \mathcal{N}$. En vertu de la loi générale de l'induction, la force contre électromotrice développée a pour valeur

$$e_s = - \frac{d \mathcal{N}}{dt} = - n \mathcal{K} s \cos \alpha \frac{d \alpha}{dt} = - n \mathcal{K} s \frac{d \alpha}{dt}$$

si l'angle α est suffisamment faible.

Agissant sur un circuit de résistance totale R , cette force électromotrice donne un courant

$$i_s = \frac{e_s}{R} = - \frac{n \mathcal{K} s}{R} \frac{d \alpha}{dt}$$

fournissant le couple antagoniste

$$n \mathcal{K} s i_s = - \frac{(n \mathcal{K} s)^2}{R} \frac{d \alpha}{dt}.$$

Le couple antagoniste dû aux ressorts est $c \alpha$; celui dû aux frottements, qui s'annule avec la vitesse et lui est proportionnel, peut s'exprimer par $f \frac{d \alpha}{dt}$; enfin, I représentant le moment d'inertie de l'équipage mobile, en unités C. G. S. la réaction d'inertie donne également un couple antagoniste

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2}.$$

L'équilibre dynamique du système est exprimé par l'équation (couples résistants équilibrant le couple moteur)

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \left(f + \frac{n^2 \mathcal{K}^2 s^2}{R} \right) \frac{d \alpha}{dt} + c \alpha = n \mathcal{K} s i \quad (1)$$

Multiplions les termes de l'équation précédente par dt et intégrons de 0 à τ durée de la décharge. Pour $t = 0$, de même que pour $t = \tau$, $\alpha = 0$.

$$I \frac{d \alpha}{dt} = n \mathcal{K} s \int_0^\tau i dt = n \mathcal{K} s q. \quad (2)$$

Au bout du temps τ le second membre de (1) s'annule et le mouvement du cadre est désormais régi par l'équation

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \left(f + \frac{n^2 \mathcal{K}^2 s^2}{R} \right) \frac{d \alpha}{dt} + c \alpha = 0$$

ou
$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{1}{I} \left(f + \frac{n^2 \mathcal{K}^2 s^2}{R} \right) \frac{d \alpha}{dt} + \frac{c \alpha}{I} = 0$$

ou
$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + 2a \frac{d \alpha}{dt} + b^2 \alpha = 0$$

moyennant les relations

$$a = \frac{f}{2I} + \frac{n^2 \mathcal{K}^2 s^2}{2R I} \text{ et } b = \sqrt{\frac{c}{I}}$$

Posons $\alpha = e^{mt}$ d'où $\frac{d\alpha}{dt} = m e^{mt}$ et $\frac{d^2 \alpha}{dt^2} = m^2 e^{mt}$

la dernière équation devient

$$e^{mt} (m^2 + 2a m + b^2) = 0$$

dont l'intégrale générale est de la forme

$$\alpha = A e^{m_1 t} + B e^{m_2 t} \quad (3)$$

A et B étant des constantes d'intégration à déterminer d'après les conditions aux limites; m_1 et m_2 les racines de l'équation du second degré obtenue en égalant à zéro le trinôme entre parenthèses soient

$$m_1 = -a + \sqrt{a^2 - b^2}, \quad m_2 = -a - \sqrt{a^2 - b^2}.$$

En remplaçant on obtient

$$\alpha = e^{-at} \left(A e^{\sqrt{a^2 - b^2} t} + B e^{-\sqrt{a^2 - b^2} t} \right) \quad (4)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = -e^{-at} \left[\left(a - \sqrt{a^2 - b^2} \right) A e^{\sqrt{a^2 - b^2} t} + \left(a + \sqrt{a^2 - b^2} \right) B e^{-\sqrt{a^2 - b^2} t} \right] \quad (5)$$

Si les racines du trinôme sont imaginaires le radical exposant peut s'écrire $\sqrt{b^2 - a^2} \sqrt{-1}$ et (4) devient en posant pour simplifier $\sqrt{b^2 - a^2} = \rho$

$$\alpha = e^{-at} (C \cos \rho t + D \sin \rho t) \quad (6)$$

d'où

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-at} [(\rho D - a C) \cos \rho t - (a D + \rho C) \sin \rho t] \quad (7)$$

Nous avons dans les deux cas deux constantes d'intégration. Pour les déterminer, nous devrons disposer de deux équations que nous obtiendrons en passant aux limites dans (4) et (5), dans (6) et (7). Ces limites sont pour

$$t = 0, \alpha = 0, \frac{d\alpha}{dt} = \frac{n \mathcal{H} s q}{I} = V_0$$

1^{er} Cas. — La détermination des constantes nous donne

$$A = \frac{V_0}{2\sqrt{a^2 - b^2}}, B = \frac{-V_0}{2\sqrt{a^2 - b^2}}$$

d'où

$$\alpha = \frac{V_0 e^{-at}}{2\sqrt{a^2 - b^2}} \left(e^{\sqrt{a^2 - b^2}t} + e^{-\sqrt{a^2 - b^2}t} \right).$$

Cette équation représente une courbe possédant une seule ondulation (fig. 168) dont on calcule aisément l'ordonnée maximum (élongation totale que l'on saisit au vol pendant l'instant plus ou moins court où l'image lumineuse du miroir s'arrête).

En tout cas cette élongation est proportionnelle à V_0 , c'est-à-dire à la quantité d'électricité q ayant traversé le cadre.

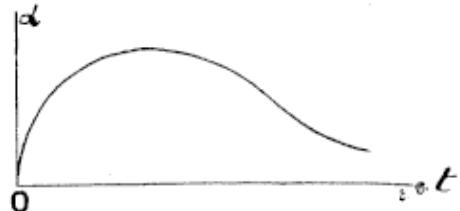


FIG. 168.

2^e Cas. — La détermination des constantes nous donne

$$A = 0, B = \frac{V_0}{\rho}$$

d'où

$$\alpha = e^{-at} \frac{V_0}{\rho} \sin \rho t \quad (8)$$

et

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-at} \left(V_0 \cos \rho t - \frac{a V_0}{\rho} \sin \rho t \right) \quad (9)$$

La vitesse angulaire de l'équipage s'annule au temps t_1 pour lequel

$$V_0 \cos \rho t_1 = \frac{a V_0}{\rho} \sin \rho t_1$$

d'où

$$\operatorname{tg} \rho t_1 = \frac{\rho}{a} \text{ et } t_1 = \frac{I}{\rho} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\rho}{a}.$$

La première elongation a par conséquent pour valeur

$$x_1 = \frac{V_0}{\sqrt{a^2 + \rho^2}} e^{-\frac{a}{\rho} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\rho}{a}} \quad (10)$$

La tangente reprenant la même valeur chaque fois que l'on ajoute π à la variable, la vitesse angulaire repasse par zéro au bout des temps t_1, t_2, \dots tirés des expressions

$$\operatorname{tg} \rho t_1 = \operatorname{tg} \rho (t_1 + \pi) \quad \text{d'où} \quad t_2 = t_1 + \frac{\pi}{\rho}$$

$$\operatorname{tg} \rho t_2 = \operatorname{tg} \rho (t_2 + \pi) \quad \Rightarrow \quad t_3 = t_2 + \frac{\pi}{\rho}$$

.

$$\operatorname{tg} \rho t_n = \operatorname{tg} \rho (t_{n-1} + \pi) \quad \Rightarrow \quad t_n = t_{n-1} + \frac{\pi}{\rho}.$$

En additionnant la valeur de t à partir de la seconde on trouve

$$t_n = t_1 + (n-1) \frac{\pi}{\rho} \quad (11)$$

Au bout de ce temps l'amplitude est devenue

$$\begin{aligned} x &= e^{-at_n} \frac{V_0}{\rho} \sin \left\{ \rho t_1 + (n-1) \pi \right\} = \pm e^{-at_n} \frac{V_0}{\rho} \sin \rho t_1 \\ &= \pm x_1 e^{-a(n-1) \frac{\pi}{\rho}} \end{aligned}$$

puisque l'expression générale (8) donne

$$x_1 = e^{-at_1} \frac{V_0}{\rho} \sin \rho t_1.$$

En résumé *le mouvement du cadre est isochrone*, la durée d'une demi-oscillation étant $\frac{\pi}{\rho} = T$. En outre, l'*amplitude des oscillations décroît suivant les termes d'une progression géométrique* dont la raison = e^{-aT} .

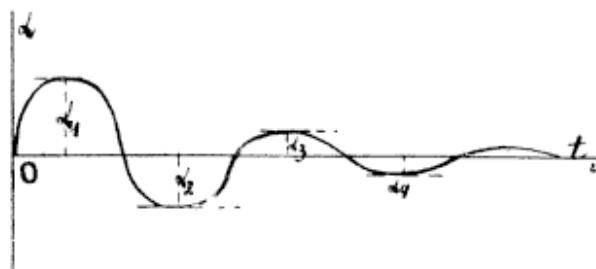


FIG. 169.

décroît suivant les termes d'une progression géométrique dont la raison = e^{-aT} .
La figure 169 rend compte de ces particularités.

On reconnaîtra dans l'exposant $\lambda = aT = a \frac{\pi}{\rho}$, pris positivement, ce que nous avons appelé précédemment le décrément logarithmique des oscillations. En effet,

$$\lambda = \log_e \frac{x_{n-1}}{x_n}.$$

Exprimons maintenant les coefficients a et b en fonction des valeurs λ et T qui résultent directement de l'observation

$$a = \frac{\lambda}{T} = \frac{n^2 \mathcal{K}^2 s^2}{2 R I}$$

$$b = \sqrt{\rho^2 + a^2} = \frac{1}{T} \sqrt{\lambda^2 + \pi^2} = \sqrt{\frac{c}{I}}$$

et remplaçons dans la formule (10)

$$x_t = \frac{n \mathcal{K} s q}{I} \frac{T}{\sqrt{\lambda^2 + \pi^2}} e^{-\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\pi}{\lambda}} \quad (13)$$

Si tous les couples amortisseurs sont sensiblement nuls (circuit ouvert) $a = 0$ ainsi que λ . La durée d'une demi-oscillation devient alors :

$$T_o = \frac{\pi}{b} \text{ d'où } T = \frac{1}{b} \sqrt{\lambda^2 + \pi^2} = T_o \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 + 1}.$$

Remplaçant dans (13) T par cette valeur il vient

$$x_t = \frac{n \mathcal{K} s q}{I} \frac{T_o}{\pi} e^{-\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\pi}{\lambda}}$$

d'où l'on tire enfin :

$$q = x_t \frac{I}{n \mathcal{K} s} \frac{\pi}{T_o} e^{-\frac{\lambda}{\pi} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\pi}{\lambda}} \quad (14)$$

Si l'amortissement peut être considéré comme nul, $\lambda = \log_s 1 = 0$, l'exponentielle devient égale à l'unité et

$$q = x_t \frac{I}{n \mathcal{K} s} \frac{\pi}{T_o} \quad (15)$$

En pratique, il existe toujours un certain amortissement dont la première élongation se trouve réduite. Pour déterminer cette réduction, on admet que les oscillations décroissent suivant les termes d'une progression arithmétique. On lit deux déviations consécutives du même côté du zéro x_1 et x_3 qui

comprennent une oscillation complète et dès lors la première elongation corrigée devient :

$$\alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}.$$

CONSTANTE BALISTIQUE. — Dans le cas de l'amortissement sensiblement nul (circuit ouvert) l'équation (15) peut se mettre sous la forme :

$$q = \frac{I}{k'} \alpha_1$$

k' correspond à la déviation en radians par unité électromagnétique de quantité. C'est la *constante balistique*. On la rapporte généralement au microcoulomb.

EXEMPLE. — Soit un balistique ayant donné pour une décharge d'1,3 microcoulomb les elongations $\alpha_1 = 8$ mm, $\alpha_3 = 7$ mm,

d'où $\alpha = 8 + \frac{8 - 7}{4} = 8,25$.

On aura $1,3 = \frac{8,25}{k'}$ et $k' = 6,33$.

Relation entre les constantes permanente et balistique. — Nous avons vu précédemment que la constante permanente

$$k = \frac{n \mathcal{H} s}{c}.$$

D'autre part $k' = \frac{n \mathcal{H} s}{I} \frac{T_0}{\pi}$.

Divisant membre à membre :

$$\frac{k'}{k} = \frac{T_0}{\pi} \frac{c}{I} = \frac{\sqrt{\lambda^2 + \pi^2}}{T}$$

Valeur de la résistance critique. — Les deux cas que nous avons successivement examinés correspondent aux conditions $a > b$, mouvement apériodique et $a < b$, mouvement périodique. L'apériodicité est exactement atteinte quand $a = b$ ou

$$\frac{f}{2I} + \frac{n^2 \mathcal{H}^2 s^2}{2RI} = \sqrt{\frac{c}{I}}.$$

L'amortissement dû aux frottements peut alors être négligé, de sorte qu'il reste :

$$\frac{n^2 \mathcal{H}^2 s^2}{2RI} = \sqrt{\frac{c}{I}}$$

d'où l'on tire :

$$R = \frac{n^2 \mathcal{H}^2 s^2}{2 I} \sqrt{\frac{I}{c}} = \frac{n^2 \mathcal{H}^2 s^2}{2 I} \frac{T_0}{\pi}.$$

Telle est la valeur de la résistance critique.

Moyens de rendre les galvanomètres balistiques. — La théorie s'établirait d'une manière semblable et l'on trouverait des résultats analogues pour des galvanomètres à aiguilles. On rend ceux-ci balistiques en alourdisant l'aiguille.

Pour les appareils Deprez d'Arsonval, on peut de même charger le cadre, augmenter le nombre de tours de fil, renforcer l'intensité d'aimantation des aimants fixes. Le balistique Ducrétet a une résistance de 240 ohms; sa durée d'oscillation est de 3 secondes.

On peut aussi employer un cadre de grand moment d'inertie, présentant une grande surface (rectangle de base plus grande que la hauteur). Le balistique Carpentier (fig. 170) possède une résistance de 500 ohms, durée d'oscillation 8 secondes. Un microcoulomb y produit, à circuit ouvert, une élongation de 40 à 50 mm à 1 mètre.

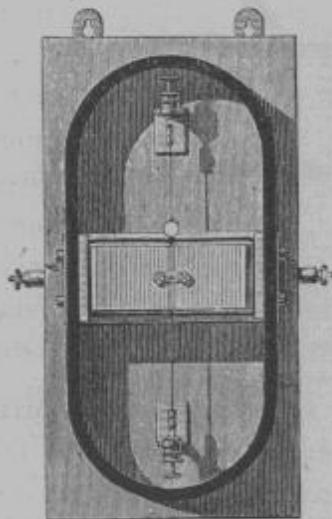


FIG. 170.

Voltmètres.

Ces instruments permettent de mesurer la différence de potentiel.

Voltmètre électrostatique. — L'appareil a été décrit précédemment, nous n'y reviendrons pas.

Electromètre capillaire Lippmann. — Un tube vertical A (fig. 171) contenant du mercure, plonge par son extrémité inférieure capillaire dans un vase B rempli d'eau acidulée au $\frac{1}{6}$ d'acide sulfurique. Le fond du vase est recouvert d'une couche de mercure. Celle-ci étant mise en rapport avec le pôle + d'une source d'électricité de force électromotrice ne dépassant pas un volt, tandis que le mercure du tube est relié

au pôle négatif, on constate un relèvement du niveau du mercure dans le tube. La dénivellation cesse quand les deux masses mercurielles sont remises au même potentiel en les réunissant entre elles.

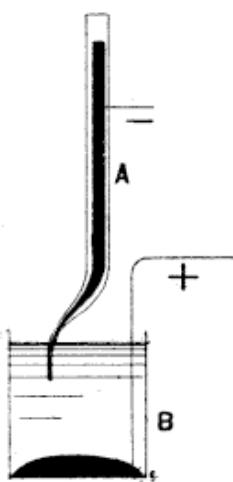


FIG. 171.

Ce phénomène, dû à la polarisation précédant la décomposition électrolytique, permet la mesure de très faibles différences de potentiel de l'ordre du 0,000 01 de volt, par l'observation des déplacements du ménisque capillaire au moyen d'un microscope. On ramène le ménisque dans sa position primitive en exerçant sur la colonne mercurielle, par l'intermédiaire d'une poire en caoutchouc, une pression estimée à l'aide d'un manomètre à mercure.

Les connexions doivent être établies ainsi qu'il a été indiqué, sinon l'oxygène venant s'appliquer à la base du ménisque altérerait la surface du mercure.

Galvanomètre-voltmètre.— Soient deux points entre lesquels règne la différence de potentiel E à mesurer. Réunissons-les par un conducteur de résistance R . A condition que la résistance R soit suffisamment élevée pour ne pas provoquer un débit modifiant sensiblement la répartition des potentiels et que la source soit capable d'assurer la constance de E malgré le nouveau débit qui lui est demandé, on aura

$$i = \frac{E}{R} \text{ d'où } E = i R.$$

Si dans le circuit de la résistance R se trouve inséré un galvanomètre, sa déviation étant proportionnelle à i on aura :

$$E = i R = \frac{\alpha}{k'}$$

et la déviation du galvanomètre sera proportionnelle à E : l'appareil est devenu un voltmètre.

La grande résistance nécessaire R peut exister dans l'enroulement même du galvanomètre. Généralement cependant il n'en est pas ainsi, la résistance du galvanomètre devant être réduite par des shunts pour ramener la déviation dans des limites

convenables et la grande résistance nécessaire est obtenue au moyen de résistances additionnelles.

Lorsque l'on veut doubler, tripler, etc., l'échelle des indications d'un voltmètre, il suffit de placer en série avec lui une résistance égale, double, etc., de sa résistance totale. En effet, si nous reprenons l'équation $E = iR$, nous voyons qu'en doublant, triplant, les valeurs de R , à la même intensité de courant, c'est-à-dire à la même déviation α du galvanomètre, correspondront des différences de potentiel $i \times 2R$, $i \times 3R$, ... respectivement doubles, triples, ...

Il est essentiel que la valeur de la résistance R ne varie pas sous l'effet Joule développé par le passage du courant. On utilisera à cette fin un métal dont le coefficient de température est négligeable, la manganine par exemple.

Remarquons que le voltmètre se place *en dérivation sur* les conducteurs dont il s'agit de mesurer la différence de potentiel V (fig. 172), tandis que l'ampèremètre s'insère *en série* avec le conducteur dont il faut apprécier le débit A .

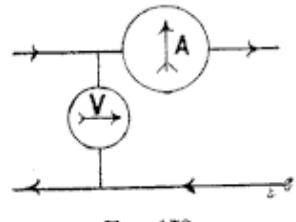


FIG. 172.

Mesure de la puissance.

mploi simultané de l'ampèremètre et du voltmètre. — La puissance électrique ayant pour mesure le produit Ei de la différence de potentiel par l'intensité du courant, peut se déterminer en effectuant simultanément les lectures de E et de i au moyen des appareils précédents.

Wattmètre. — Il est toutefois plus simple de condenser les deux appareils en un seul, en un *wattmètre* constitué comme un électrodynamomètre, sauf que les enroulements des bobines sont séparés et parcourus par des courants différents : l'enroulement fixe A (fig. 173) qui comprend quelques tours de gros fil, placés en série avec le conducteur du circuit dont on mesure la puissance, est traversé par la totalité ou une portion connue du courant absorbé, tandis que l'en-

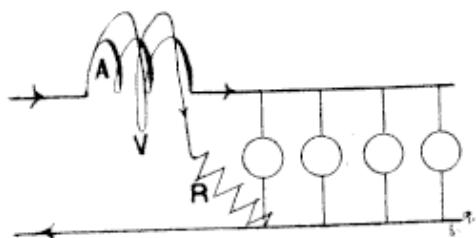


FIG. 173.

roulement mobile V, placé en série avec une forte résistance R est mis en dérivation sur le circuit. L'enroulement mobile a ses spires perpendiculaires à celles de l'enroulement fixe.

L'action mutuelle des deux bobines est proportionnelle à l'intensité des courants qui les traversent, c'est-à-dire au produit Ei , de sorte que pour une déviation θ on a

$$\theta = \frac{Ei}{K}.$$

K se détermine en reliant l'appareil à un conducteur de résistance connue r' traversé par un courant d'intensité connue i' .

La déviation étant θ' on a $K = \frac{i'^2 r'}{\theta'}$.

En appelant r la résistance de la bobine fixe, on remarque que par le montage représenté sur la figure, l'enroulement mobile est soumis à un voltage plus élevé que celui qu'il s'agit de mesurer, de la chute ri . Si l'on raccorde la bobine mobile en B c'est alors la bobine fixe qui est traversée par un courant trop grand de $\frac{E}{R}$ en appelant R la résistance du circuit dérivé. Dans les deux cas l'appareil marque un peu trop. On peut estimer aisément cet excédent. L'erreur commise est en effet égale à $i^2 r$ (dans le cas de la figure) puisqu'on mesure $(E + ri) i$ au lieu de Ei .

Appareils enregistreurs et industriels.

Enregistreurs. — Il est souvent utile de pouvoir noter d'une manière continue soit l'intensité, soit la force électromotrice, soit la puissance d'un courant. Le système le plus simple consiste à munir l'équipage dont il s'agit d'enregistrer les

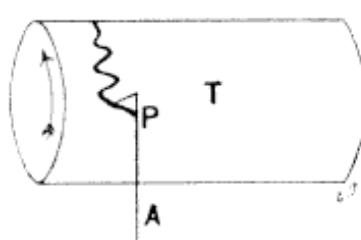


FIG. 174.

déviations, d'une aiguille légère en aluminium A (fig. 174) terminée par une plume remplie d'encre à base de glycérine, laquelle appuie légèrement contre un tambour T animé d'un mouvement de rotation et de déplacement longitudinal à l'aide d'un mouvement d'horlogerie. Le tambour

est garni d'une feuille graduée sur laquelle la plume trace la courbe du phénomène à étudier.

Industriels. — Les appareils industriels sont caractérisés par une grande robustesse; ils permettent des lectures directes et se transportent aisément. Ils doivent être apériodiques, sensibles et constants. De même que dans le laboratoire, le type Deprez d'Arsonval domine.

APPAREILS WESTON. —

Deux aimants permanents N, S, (fig. 175) sont munis de joues creusées en fer doux J. Au centre se trouve un cylindre de fer doux C. Dans l'entrefer peut se mouvoir la bobine B enroulée sur un cadre en aluminium pour assurer son apériodicité. Elle est supportée par des pivots et dirigée par deux ressorts de montre en bronze phosphoreux qui permettent son raccord aux shunts. Une longue aiguille en aluminium tournant au-dessus d'une graduation s'y rattache. L'erreur de parallaxe

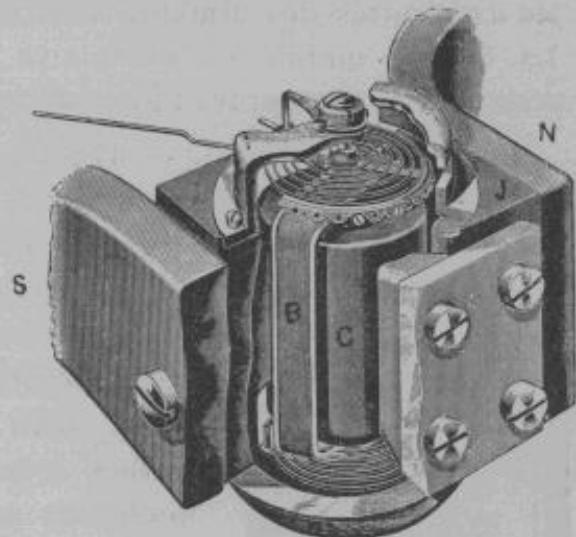


FIG. 175.

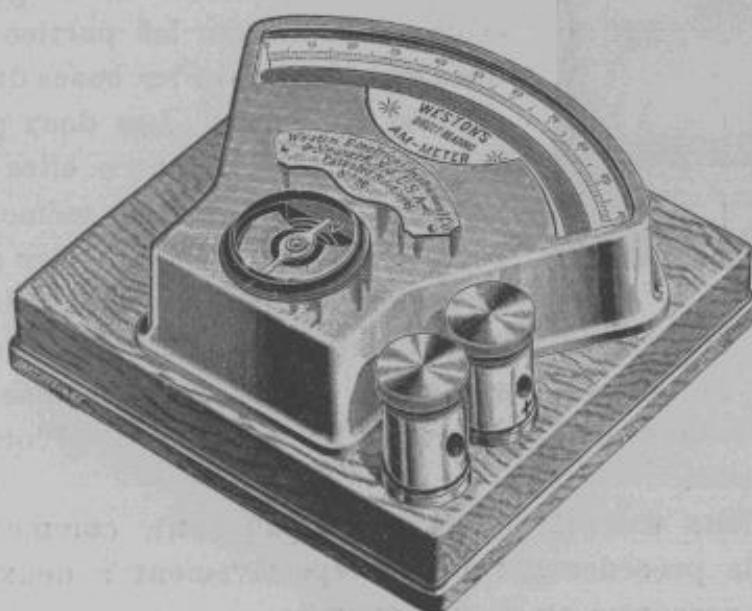


FIG. 176.

est évitée par l'emploi d'un miroir. La figure 176 donne la vue de l'appareil complet.

APPAREILS CHAUVIN ET ARNOUX. — C'est une simplification de l'appareil précédent. A cet effet il n'y a pas de pièces polaires, les extrémités des aimants sont alésées sous forme sphérique. La bobine mobile est circulaire et tourne autour d'une bille d'acier concentrant les lignes de force.

APPAREILS RICHARD. — Il n'y existe pas non plus de pièces polaires. Les deux aimants A et A' (fig. 177) de mêmes sections et mêmes développements, donc de mêmes poids, possèdent des épanouissements polaires cylindriques, convexes pour l'un d'eux et concaves pour l'autre. Ces deux surfaces cylindriques, ont même centre et leurs intervalles constituent deux champs magnétiques uniformes très intenses dans lesquels se déplacent les deux côtés actifs de la bobine galvonométrique portée par un cadre amortisseur.

L'équipage mobile est constitué par un cadre comportant deux parties cylindriques réunies par des pièces en forme de V et portant la bobine galvonométrique enroulée sur les parties cylindriques en passant sur les bases du cylindre suivant des cordes. Les deux parties du bobinage laissent entre elles l'axe de rotation lequel sert en même temps à entretoiser les bases du cadre et à diminuer sa résistance électrique, de manière à augmenter son action amortissante.

L'axe est terminé par deux pivots roulant dans des crapaudines à ressorts pour éviter les ruptures de pivots pendant le transport.

Les deux extrémités de la bobine sont, comme dans les appareils précédents, reliées respectivement à deux ressorts spiraux servant à amener le courant.

La figure 177 donne la vue d'un ampèremètre enregistreur. Dans l'ampèremètre marquant de 0 à 0,050 A, une division



FIG. 177.

vaut 0,000 5 A ; dans celui allant de 0 à 5 000 A, chaque division correspond à 50 A. Pour le voltmètre de 0 à 5 volts dont la résistance est de 100 ohms, la valeur d'une division est de 0,05 V tandis que pour l'appareil marquant de 0 à 600 V, les chiffres correspondants sont 12 000 ohms et 5 volts.

CHAPITRE XI.

Les unités.

Au cours de notre étude nous avons rencontré un certain nombre de grandeurs tant électriques que magnétiques. Nous les avons définies et avons donné, chemin faisant, les principales unités adoptées. Voyons maintenant le pourquoi de l'adoption de ces unités et comment elles se relient l'une à l'autre de manière à former un système complet, cohérent et coordonné.

Les relations existant entre les unités ne pouvant évidemment être que celles régissant les grandeurs elles-mêmes, c'est de ces dernières que nous devrons partir. Rassemblons donc les matériaux dont nous disposons.

La loi de Faraday nous donne une relation entre l'intensité, la quantité, le temps

$$i = \frac{q}{t} \quad (1)$$

la loi de Joule entre l'énergie, l'intensité, la résistance, le temps

$$W = i^2 r t \quad (2)$$

la loi d'Ohm un rapport entre l'intensité, la force électromotrice et la résistance

$$i = \frac{e}{r} \quad (3)$$

La capacité se relie à la quantité Q et à la différence de potentiel V par la formule

$$Q = C V \quad (4)$$

enfin, la loi de Laplace établit la liaison entre les grandeurs électriques et magnétiques

$$f = \frac{m i ds \sin z}{r^2} \quad (5)$$

Entre les 6 grandeurs fondamentales : quantité, intensité, résistance, force électromotrice, capacité et masse magnétique, nous ne disposons donc que de 5 équations. Chaque grandeur

nouvelle que nous introduirons ne nous apportant qu'une équation supplémentaire en fonction des autres grandeurs, nous serons toujours en déficit d'une équation. Il en résulte qu'une quantité restera arbitraire. Mais il suffira de la préciser pour que toutes les autres soient déterminées par le fait même.

Deux systèmes d'unités. — Pour arriver à obtenir un système absolu d'unités, il faudra que la grandeur prise comme point de départ puisse être exprimée en unités mécaniques, ce qui le rattachera au système C. G. S. On pourra choisir, soit la quantité d'électricité définie par la loi de Coulomb

$$f = \frac{q q'}{r^2} \quad (6)$$

et nous aurons le système *électrostatique*, dont nous nous sommes déjà longuement occupé; soit la quantité de magnétisme en partant également de la loi de Coulomb

$$f = \frac{m m'}{r^2} \quad (6')$$

ce qui nous fournira le système *électromagnétique*.

Aucun de ces deux systèmes, d'ailleurs incompatibles et exclusifs, puisque nous ne disposons que d'une arbitraire pour chacun d'eux, n'est supérieur à l'autre. Ils trouvent naturellement leur utilisation et sont d'application plus aisée, suivant qu'il s'agit des quantités électrostatiques proprement dites, ou des quantités magnétiques et électromagnétiques. Nous allons reproduire les unités déjà définies, ainsi que leurs équations de dimensions, tout en complétant leur tableau.

Système électrostatique. — QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ. *C'est la quantité qui, agissant sur une quantité égale placée à un centimètre de distance, la repousse ou l'attire avec la force d'une dyne.* Dimensions

$$[q_s] = [r f^{\frac{1}{2}}] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}].$$

DENSITÉ SUPERFICIELLE. — *L'unité de densité est obtenue quand l'unité de quantité recouvre l'unité de surface.*

$$[\sigma_s] = \left[\frac{q}{L^2} \right] = [M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{3}{2}} T^{-1}]$$

CHAMP ÉLECTRIQUE. — L'intensité du champ électrique se mesure par l'action exercée sur l'unité d'électricité. C'est donc le quotient d'une force par une quantité d'électricité. L'unité de champ est réalisée quand le champ agit avec la force d'une dyne sur l'unité de quantité.

$$[H_s] = \left[\frac{f}{q} \right] = [M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}].$$

FLUX DE FORCE ÉLECTRIQUE. — Produit de l'intensité du champ par une surface. L'unité de flux de force est le flux produit normalement à travers un cm^2 dans un champ unité.

$$[N_s] = [H L^2] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}]$$

INTENSITÉ.—Elle est définie par la loi de Faraday (1). L'unité d'intensité de courant est l'intensité du courant transportant l'unité de quantité par seconde

$$[i_s] = \left[\frac{q}{t} \right] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}].$$

RÉSISTANCE. — Loi de Joule (2). L'unité de résistance est la résistance du conducteur qui, traversé par l'unité d'intensité, développe un travail d'un erg par seconde.

$$[r_s] = \left[\frac{W}{i^2 t} \right] = [L^{-1} T].$$

Ses dimensions sont celles de l'inverse d'une vitesse.

La résistivité est la résistance d'un conducteur d'un centimètre de longueur ayant une section normale d'un cm^2 . C'est donc la résistance entre faces opposées d'un cube d'un centimètre de côté.

$$[\rho_s] = \left[\frac{r_s L^2}{L} \right] = [T].$$

DIFFÉRENCE DE POTENTIEL OU FORCE ÉLECTROMOTRICE. — Loi d'Ohm (3)

$$[e_s] = [i_s r_s] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}].$$

On peut également partir des définitions vues en électrostatique : le potentiel est le quotient d'un travail par une quantité d'électricité, ou c'est le rapport d'une masse à une longueur.

L'unité est obtenue quand il faut dépenser un erg pour amener l'unité d'électricité de l'infini au point considéré.

$$[V_s] \text{ ou } [e_s] = \left[\frac{W}{q_s} \right] = \left[\frac{q_s}{L} \right] = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

CAPACITÉ. — $[C_s] = \left[\frac{q_s}{e_s} \right] = [L]$. La capacité électrostatique est une longueur ; l'unité est le centimètre.

QUANTITÉ DE MAGNÉTISME. — La formule de Laplace (5) $[m_s] = \left[\frac{f L^2}{i L} \right] = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}$. L'unité de magnétisme est celle qui, placée au centre d'un arc de cercle d'un centimètre de rayon et d'un centimètre de longueur, traversé par un courant de l'unité d'intensité, se trouve sollicitée par celui-ci avec la force d'une dyne.

Système électromagnétique. — **QUANTITÉ DE MAGNÉTISME.** Nous partons également de la loi de Coulomb

$$[m_m] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}]$$

ce qui nous donne les mêmes dimensions que pour la quantité d'électricité. Nous ne définirons plus les unités ; elles se déduisent avec facilité des relations considérées. Nous aurons, de même que précédemment :

DENSITÉ, INTENSITÉ MAGNÉTIQUE.

$$[\sigma_m] = [\mathcal{I}_m] = [M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}].$$

CHAMP MAGNÉTIQUE. — $[\mathcal{H}_m] = \left[\frac{f}{m} \right] = [M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}]$.

Unité le gauss.

FLUX MAGNÉTIQUE. — $[\mathcal{W}_m] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}]$. Unité le maxwell.

MOMENT MAGNÉTIQUE. — $[\lambda_m] = [m l] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}]$.

POTENTIEL MAGNÉTIQUE. — $[\mathcal{Q}_m] = \left[\frac{m}{L} \right] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}]$.

PUISSSANCE MAGNÉTIQUE. — $[\mathcal{S}] = [\sigma L] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-1}]$.

COEFFICIENT D'AIMANTATION OU DE SUSCEPTIBILITÉ. — $\chi = \frac{\mathcal{S}}{\mathcal{H}}$.

Dimensions l'unité.

INDUCTION MAGNÉTIQUE.— $[\mathfrak{B}] = [\mu \mathcal{H}] = [M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}]$.

INTENSITÉ DE COURANT.— Loi de Laplace $[i_m] = \left[\frac{f L^2}{m L} \right] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} T^{-4}]$.

QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ.— Loi de Faraday $[q_m] = [i_m t] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}}]$.

RÉSISTANCE.— Loi de Joule $[r_m] = \left[\frac{W}{i^2_m t} \right] = [L T^{-1}]$. Les dimensions sont celles d'une vitesse. Celles de la résistivité sont $L^2 T^{-1}$.

FORCE ÉLECTROMOTRICE.— Loi d'Ohm $[e_m] = [i_m r_m] = [M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-2}]$.

CAPACITÉ.— $[c_m] = \left[\frac{q_m}{e_m} \right] = L^{-1} T^2$.

COEFFICIENT DE SELFINDUCTION.— Le coefficient de selfinduction d'un circuit est, comme nous l'avons vu, le rapport du flux développé dans ce circuit, à l'intensité du courant qui lui donne naissance. $[\mathfrak{L}_m] = \left[\frac{\mathfrak{N}}{i_m} \right] = [L]$. C'est une longueur.

L'unité électromagnétique de selfinduction est égale au coefficient de selfinduction d'un circuit qui produit un flux d'une unité C. G. S. ou d'un maxwell quand il est traversé par un courant ayant une unité C. G. S. d'intensité. Cette unité a la valeur d'un centimètre.

On peut aussi définir l'unité de coefficient de selfinduction en fonction de l'unité de force électromotrice de selfinduction en partant de la formule $e = -\mathfrak{L} \frac{di}{dt}$ d'où en valeur absolue $\mathfrak{L} = \frac{e_s dt}{di}$ et dire: *Un circuit possède un coefficient de selfinduction égal à l'unité quand une force électromotrice d'une unité C. G. S. y est induite par une variation de courant d'une unité C. G. S. en une seconde.*

Rapport des deux systèmes.— Puisque le nombre mesurant une quantité est en raison inverse de la grandeur de l'unité

employée, il nous suffira d'égaler les valeurs numériques d'une même quantité mesurée dans les deux systèmes pour obtenir par leur rapport le rapport inverse de la grandeur des unités correspondantes.

Par exemple une même quantité de travail W pourra s'exprimer dans les deux systèmes par

$$i_s^2 r_s t = i_m^2 r_m t$$

en appelant i_s le nombre d'unités électrostatiques d'intensité, i_m le nombre d'unités électromagnétiques d'intensité, r_s et r_m les nombres d'unités de résistance respectivement électrostatiques et électromagnétiques. Nous tirerons pour le rapport de ces valeurs numériques

$$\frac{i_s}{i_m} = \sqrt{\frac{r_m}{r_s}}$$

La même quantité de travail pourra aussi s'exprimer par

$$e_s i_s t = e_m i_m t$$

d'où l'on tirera encore $\frac{i_s}{i_m} = \frac{e_m}{e_s}$.

De même $W = e_s q_s = e_m q_m = e_s^2 c_s = e_m^2 c_m$

d'où, pour les diverses valeurs numériques :

$$\frac{i_s}{i_m} = \sqrt{\frac{r_m}{r_s}} = \frac{e_m}{e_s} = \frac{q_s}{q_m} = \sqrt{\frac{c_s}{c_m}} = v, \text{ une vitesse,}$$

puisqu'en remplaçant i_s , i_m , r_m , r_s ,... par leurs dimensions on obtient les dimensions d'une vitesse $L T^{-1}$.

Ce rapport constant existant entre les valeurs numériques, les unités seront dans un rapport inverse. On pourra donc écrire :

$$\frac{[i_m]}{[i_s]} = \frac{[e_s]}{[e_m]} = \frac{[q_m]}{[q_s]} = v$$

et $\frac{[r_s]}{[r_m]} = \frac{[c_m]}{[c_s]} = v^2$.

Il résulte de ces équations que l'intensité et la quantité d'électricité correspondant aux unités électromagnétiques sont v fois plus grandes que celles correspondant aux unités électrostatiques; que l'unité de force électromotrice électrostatique est v fois plus grande que l'unité de force électromotrice élec-

tromagnétique ; que l'unité de résistance électrostatique est v^2 fois plus grande que l'unité correspondante électromagnétique, tandis que l'unité de capacité électrostatique est, au contraire, v^2 fois plus petite que l'unité de capacité électromagnétique.

L'expérience a fourni pour v la valeur de la vitesse de la lumière soit 3×10^{10} centimètres par seconde.

Le système électrostatique n'est guère employé que pour faciliter les calculs basés sur la loi Coulomb et la solution des problèmes sur les capacités des conducteurs. Dans les applications industrielles, c'est toujours aux unités électromagnétiques que l'on recourt ; aussi est-ce celles que l'on a en vue lorsqu'on parle d'unités électriques sans autre spécification.

Unités pratiques. — Les unités ainsi définies ne sont pas dans un rapport simple avec les grandeurs que l'on a généralement à mesurer. Par exemple l'unité C. G. S. de résistance électromagnétique ne correspond qu'à la résistance d'environ un vingt-millième de millimètre d'un fil de cuivre d'un millimètre de diamètre. Le cuivre étant très conducteur, cette résistance est excessivement faible. Par contre, l'unité de capacité est extrêmement grande ; elle équivaut à la capacité d'une sphère de 637 000 000 centimètres de rayon.

Avec de telles unités, les calculs devraient s'effectuer sur des nombres formidables échappant à toute appréciation ; aussi a-t-il fallu recourir, tout au moins pour les grandeurs les plus usuelles : résistance, intensité, force électromotrice, quantité et capacité, à des unités dites *pratiques*, mieux adaptées aux nécessités usuelles. Nous représenterons ces unités par les majuscules R, I, E, ... placées entre crochets.

OHM. — L'unité pratique de résistance, appelée *ohm international* (actuellement légal en Belgique) vaut 10^9 unités C. G. S. électromagnétiques ; $[R] = 10 = 10^9 [r_m]$.

AMPÈRE. — L'unité pratique d'intensité, appelée *ampère international* vaut le dixième de l'unité C. G. S. $[I] = 1 A = 10^{-1} [i_m]$. Rappelons qu'un courant d'un ampère dépose par seconde 1,118 mg d'argent et 0,327 mg de cuivre en décomposant un sel de ces métaux. Ces deux unités étant définies, les autres le sont par l'application des relations connues entre les grandeurs qu'elles servent à mesurer.

COULOMB. — L'unité pratique de quantité correspondant à l'unité d'intensité est le *coulomb international*, valant le dixième de l'unité C. G. S. $[Q] = \frac{q_m}{10}$.

VOLT. — L'unité pratique dérivée de force électromotrice, le *volt international*, est la force électromotrice qui, appliquée à un conducteur dont la résistance est d'un ohm international, y soutient un courant d'un ampère international.

En vertu de la relation $[V]$ ou $[E] = [IR]$ on voit que le volt $= \frac{[i_m]}{10} \times 10^9 [r_m] = 10^8 [i_m r_m] = 10^8$ unités C. G. S.

FARAD. — L'unité pratique de capacité, le *farad international* est la capacité d'un conducteur chargé d'un coulomb international au potentiel d'un volt international.

$[C] = \frac{[Q]}{[V]} = \frac{10^{-4} [q_m]}{10^8 [v_m]} = 10^{-9}$ unités C. G. S. de capacité.

JOULE. — L'unité pratique de travail, le *joule international*, correspond à l'énergie calorifique dégagée par le passage du courant d'un ampère dans un conducteur d'un ohm pendant une seconde ou encore, c'est le travail correspondant à un coulomb passant sous la différence de potentiel d'un volt.

1 joule = 1 volt \times 1 coulomb = $10^8 [e_m] \times 10^{-1} [q_m] = 10^7 [e_m q_m]$
 $= 10^7$ ergs $= \frac{1}{9,81} = 0,102$ kilogrammètre.

WATT. — Le *watt international* est l'unité pratique de puissance. C'est la puissance correspondant à un joule par seconde ou à un volt-ampère.

Le watt $= 10^7$ ergs-seconde $= 0,102$ kgm"

Le cheval = 736 watts.

HENRY. — Le *henry international*, unité de coefficient d'induction, est le coefficient de selfinduction d'un circuit dans lequel la variation d'un ampère par seconde induit une force électromotrice d'un volt.

$$E = \mathfrak{L} \frac{dI}{dt}, \text{ d'où } \mathfrak{L} = \frac{E d t}{d I}.$$

$[\mathfrak{L}] = \frac{10^8 [e_m T]}{10^{-1} [i_m]} = 10^9$ unités C. G. S. de coefficient de selfinduction.

$$\text{Dimensions } [\mathcal{L}] = \frac{10^8}{10^{-1}} \left[\frac{e_m \text{ T}}{i_m} \right] = 10^9 \left[\frac{\text{M}^{\frac{1}{2}} \text{ L}^{\frac{5}{2}} \text{ T}^{-2} \text{ T}}{\text{M}^{\frac{1}{2}} \text{ L}^{\frac{1}{2}} \text{ T}^{-1}} \right] = 10^9 \text{ L.}$$

Le henry vaut 10^9 centimètres.

REMARQUE. — L'équation de dimensions du coefficient de selfinduction nous a montré que ce coefficient correspond à l'unité de longueur. En unités C. G. S. il vaut un centimètre. En unités pratiques il vaudra l'unité *pratique* de longueur et nous voyons que celle-ci correspond à 10^9 centimètres. En d'autres termes, dans le système des unités pratiques, l'unité de longueur vaut 10^9 centimètres ou le $\frac{1}{4}$ du méridien terrestre.

Correspondance des unités pratiques et C. G. S.

	Unités électromagnétiques	C. G. S. électrostatiques
Résistance Ohm.	10^9	$\frac{10^9}{v^2} = \frac{I}{9 \cdot 10^{11}}$
Intensité Ampère.	10^{-1}	$10^{-1} v = 3 \cdot 10^9$
Quantité Coulomb.	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Force électromotrice. Volt.	10^8	$\frac{10^8}{v} = \frac{I}{3 \cdot 10^2}$
Capacité Farad.	10^{-9}	$10^{-9} v^2 = 9 \cdot 10^{11}$

Étalons des unités pratiques.

Les unités pratiques définies, il s'agissait d'abord de les déterminer, ce que nous étudierons dans le chapitre des mesures, puis de les matérialiser par des étalons suffisamment stables, facilement reproductibles, aisément transportables.

Les seules aptes à cette dernière opération sont la résistance, la force électromotrice et la capacité. L'intensité d'un courant, une quantité d'électricité, ne sont en effet pas matérielles. De même le watt, le joule, etc., ne sont pas matérialisables. Il suffit d'ailleurs de posséder les étalons des premiers pour en dériver facilement les autres.

Étalon de résistance. — L'ohm est représenté par la résistance à 0° d'une colonne de mercure de section constante, d'une longueur de 106,3 cm et d'une masse de 14,4521 grammes.

Les prototypes de l'ohm sont constitués par un tube en verre soigneusement calibré (fig. 178) terminé par des godets élargis, dans lesquels plongent des électrodes en platine permettant de relier le mercure remplissant le tube et les godets à un circuit extérieur.

La variation de résistance du mercure avec la température est donnée par la formule

$$R_t = R_0 (1 + 0,0008649t + 0,00000112t^2).$$

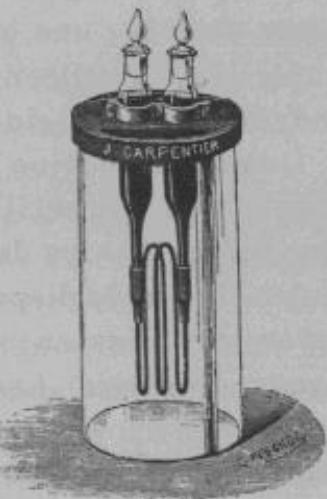


FIG. 178.

Les étalons servent à réaliser des copies plus transportables à l'usage des laboratoires et des fabriques. Ces étalons secondaires sont constitués de bobines en fil métallique isolé, enroulé en double pour éviter les effets, tant de selfinduction que d'induction, dus à des causes extérieures. On a soin d'utiliser des alliages ayant un très faible coefficient de température. La nickeline par exemple (61 Cu, 19 Zn, 18 Ni) possède un coefficient de variation de 0,0003 et une résistance spécifique de 33 microhms - cm; la manganine (84 Cu, 13 Mn, 4 Ni) une résistance spécifique de 47 microhms - cm et un coefficient de température de - 0,00004. Ce dernier est assez faible pour rendre toute correction négligeable.

La figure 179 montre un étalon secondaire constitué d'un fil enroulé sur une bobine en ébonite enfermée dans une boîte C enduite intérieurement d'une épaisse couche de paraffine. Un thermomètre T permet de prendre la température existante à l'intérieur de la boîte dont sortent des électrodes en cuivre E, E.

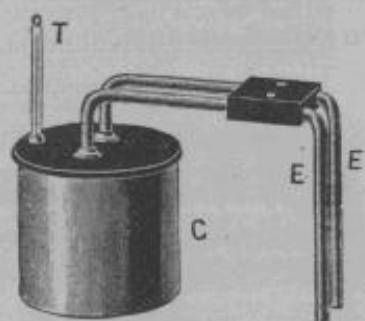


FIG. 179.

Pour éviter le travail moléculaire se produisant après l'enroulement du fil, ce qui modifie la résistance avec le temps et fausse l'étalon, on recuit le fil enroulé dans l'étuve à air, à la

température de 115 à 120°, pendant quelques heures, avant de le fixer dans la boîte.

On constitue les très faibles résistances par deux conducteurs dérivés : une bande métallique de résistance légèrement supérieure à celle nécessaire et un fil mince dont on règle la longueur pour atteindre la résistance exacte nécessaire.

Quand la bobine de résistance comprend un très grand nombre de spires, il est avantageux, pour réduire la capacité que présentent les deux fils enroulés côté à côté, de n'utiliser qu'un fil simple disposé en un nombre pair de couches successives enroulées en sens inverse et présentant des nombres égaux de spires. Les diverses couches sont d'ailleurs isolées par des enveloppes de papier paraffiné, ce qui augmente leur isolement et diminue la capacité.

Pour les besoins de la pratique, on constitue des résistances que l'on peut aisément insérer dans les circuits par fractions plus ou moins faibles.

Résistances pour courants faibles. — BOÎTE DE RÉSISTANCE

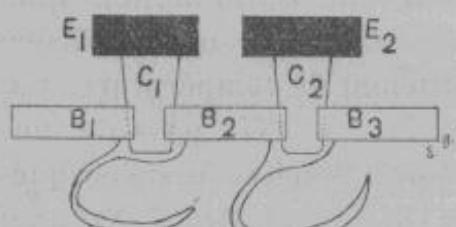


FIG. 180.

ORDINAIRE. — On la compose de bobines de fil mince, attachées intérieurement au couvercle en ébonite de boîtes en bois. Leurs extrémités se soudent à des blocs extérieurs en cuivre B_1 , B_2 , B_3 , ... (fig. 180) que des chevilles en cuivre C_1 , C_2 , ... manipulées

au moyen de têtes en ébonite E_1 , E_2 , ... permettent de mettre en court-circuit.

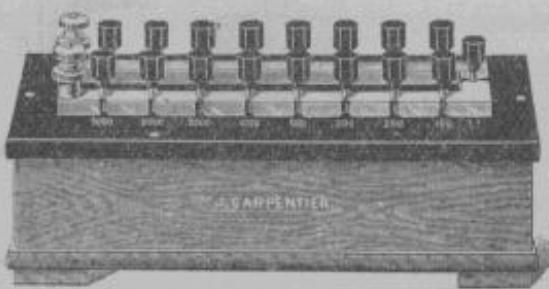


FIG. 181.

Les boîtes (fig. 181) comprennent souvent 16 bobines ayant les résistances suivantes : 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100, 200, 200, 500, 1000, 2000, 2000, 5000 ohms, permettant de déboucher une résistance quelconque de 1 à 1110. 16 fiches sont nécessaires.

BOITE EN DÉCADES. — Par la disposition en décades, on peut déboucher une résistance quelconque de 1 à 9999 ohms en manipulant 4 fiches seulement.

A (fig. 182) est une des bornes de l'appareil, rattachée à une bande A' portant des encoches au droit de blocs B, 1, 2, 3, ... comprenant chacun entre eux une résistance d'un ohm. Le bloc B se continue par une bande B' portant des encoches au droit de blocs comprenant

entre eux une résistance de 10 ohms et ainsi de suite jusqu'aux 9 bobines de 1000 ohms, vue extérieure (fig. 183). Nous avons donc cette fois 36 bobines comprenant 9 bobines de 1,

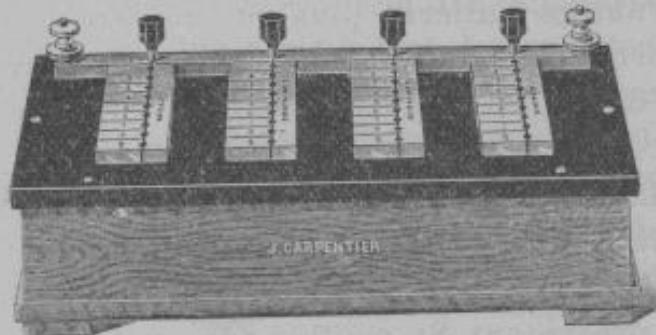


FIG. 183.

de 10, de 100 et de 1000 ohms. Si les 4 fiches sont insérées dans les trous O, la résistance est nulle.

BOITE CIRCULAIRE. — On rencontre aussi des boîtes dans lesquelles les bobines, d'égale résistance, sont raccordées à des plots métalliques dont le premier est en communication avec une des bornes A' de l'appareil, tandis qu'une lame glissante, manipulée à l'aide d'une manette M raccordée à l'autre borne B, pivotant au centre de la circonference des plots et touchant continuellement ceux-ci dans ses déplacements, permet l'insertion entre A et B d'un nombre de bobines plus ou moins grand, suivant la position qu'elle occupe. La figure 184 montre la vue d'une boîte de 4 décades, quatre lames glissantes et 3 bornes A₁, A₂ et A₃ permettant l'insertion de résistances variables entre celles-ci.

RÉSISTANCES POUR COURANTS INTENSES. — On emploie beaucoup des fils plus ou moins gros, en métal résistant comme le

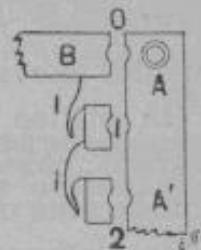


FIG. 182.

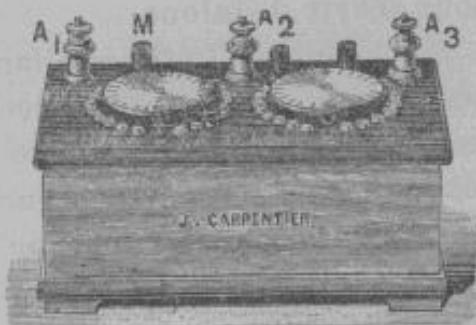


FIG. 184.

maillechort, roulés en hélices et rattachés à des blocs en cuivre, que des chevilles permettent de mettre en court-circuit.

On utilise aussi des rhéostats à liquide, dans lesquels le courant passe par l'intermédiaire d'électrodes à travers un liquide plus ou moins conducteur comme le carbonate de soude.

Des lampes à incandescence, groupées en série ou en dérivation ou en groupement mixte, permettent également de modifier le débit dans de larges limites.

On emploie souvent, actuellement, des matières pulvérulentes à base de graphite ou d'autres matières plus ou moins réfractaires, agencées sous forme de trainées plus ou moins épaisses et longues, auxquelles on amène le courant au moyen d'électrodes métalliques.

Enfin, les toiles métalliques constituent d'excellents rhéostats provisoires, à cause de leur grande surface de refroidissement. Par exemple une bande de toile métallique en fil de fer de 0,33 mm de diamètre, présentant 81 mailles par cm^2 , d'une longueur de 54 mètres et d'une largeur de 250 mm, repliée en accordéon sur des chevalets en bois, permet le passage de 400 ampères sous 260 volts, soit la dissipation d'une énergie de 141 chx.

Étalon de force électromotrice. — Un certain nombre d'éléments de piles voltaïques fournissent, sous des conditions déterminées, une force électromotrice suffisamment constante pour servir d'étalons.

Tel l'élément Latimer Clark que nous décrirons au chapitre des piles et dont la force électromotrice est de 1,434 volt à 15° centigrades. On ne peut faire débiter un tel élément que sur une résistance de 100 000 Ω au moins et pendant le plus faible temps possible afin d'éviter qu'il ne se polarise.



FIG. 185.

Étalon de capacité. — Les étalons de capacité sont des condensateurs composés de feuilles d'étain séparées par des feuilles de mica, contenues dans des boîtes dont le couvercle en ébonite porte les bornes d'attache et des blocs en laiton reliés aux armatures.

Les condensateurs usuels sont gradués

en microfarads. Des fiches en cuivre insérées entre les blocs raccordés aux armatures, permettent d'obtenir la fraction voulue de la capacité.

En formant les éléments au moyen de petites plaques minces de mica argentées sur leurs deux faces, M. Bouthy obtient des condensateurs de très petit volume (fig. 185).

Étalon de selfinduction. — Un étalon de selfinduction a été construit par MM. Ayrton et Perry en utilisant deux bobines circulaires coaxiales dont l'intérieure, placée en série avec l'autre, pivote autour d'un axe diamétral ce qui permet de faire varier leur angle de 0 à 180°. Lorsque les bobines sont parallèles et parcourues en sens inverse par le courant, leur selfinduction est minimum. Elle augmente avec l'angle que font les plans des deux bobines, pour atteindre son maximum quand la bobine intérieure a fait un demi-tour. Une graduation indique la valeur du coefficient de selfinduction dans les diverses positions.

CHAPITRE XII

Courant alternatif

§ I. — Généralités.

Avec le courant continu, le flux d'électricité est constamment dirigé dans le même sens. Si le courant est alternatif, nous trouvons des renversements périodiques de ce flux : le courant

se dirige, tantôt dans un sens, tantôt dans le sens opposé. Entre deux passages par zéro, la courbe d'intensité peut être quelconque, c'est-à-dire irrégulière. Pour la facilité des calculs, on admet généralement que les variations sont régulières, c'est-à-dire que le courant affecte la forme sinusoïdale, ce qui est pratiquement exact avec les machines modernes.

Le générateur le plus simple, produisant un tel courant, est constitué par une spire tournant dans un champ magnétique uniforme, par exemple le champ terrestre.

Soit une spire ABCD (fig. 186) animée d'une vitesse de rotation

uniforme, autour d'un axe vertical BD, en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, dans un champ magnétique d'intensité constante, dont la direction est normale au plan de la spire dans sa position MN (fig. 187).

En MN, le flux embrassé est maximum et, pendant le temps

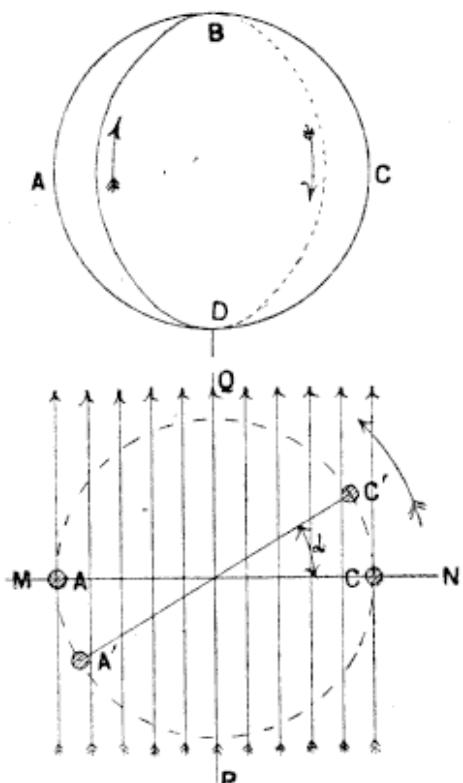


FIG. 186 et 187.

infiniment petit dt , sa valeur ne change pas. En vertu de la loi fondamentale de l'induction

$$e = - \frac{d\pi}{dt},$$

la force électromotrice d'induction sera nulle. A partir de ce moment, et jusque dans la position à angle droit PQ, le flux va en diminuant, la force électromotrice est positive. En regardant dans la direction du champ, elle est orientée dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre, donc suivant les flèches. A partir de PQ, le flux embrassé par la spire va en augmentant, la force électromotrice est négative. Mais, si l'on remarque que, par rapport à l'observateur placé en P et regardant dans le sens des lignes de force du champ, le brin BCD est maintenant passé à sa gauche et vice versa, on voit que le courant est resté de même sens dans les deux brins constitutifs de la spire.

Quand celle-ci atteint MN, le flux embrassé est de nouveau maximum et la force électromotrice de nouveau nulle. La spire continuant à tourner, le flux diminue et la force électromotrice devient positive, sans qu'il y ait eu cette fois, par rapport à la direction PQ, permutation de position entre les deux brins, c'est-à-dire que la force électromotrice *change de sens* dans le circuit, ce qui perdure jusqu'au moment où les conducteurs sont revenus prendre leur position initiale dans le plan MN, où la force électromotrice s'annule encore.

Nous serions arrivé plus directement au résultat en considérant que, pendant le trajet NQM le brin BCD coupe les lignes de force dans un sens, puis qu'elles coupe en sens inverse pendant le trajet consécutif MPN. L'autre brin BAD coupe simultanément le champ en sens contraire ; mais, comme il est monté en tension avec le premier, les forces électromotrices s'ajoutent dans la spire. Le changement de sens a lieu suivant MN ; en outre, la force électromotrice développée est maximum suivant PQ, puisqu'à ce moment le nombre de lignes de force coupées par unité de temps est le plus considérable.

Période. — En résumé, nous constatons pendant la première demi-révolution de la spire la production d'une onde de force électromotrice orientée dans un certain sens, immédiatement suivie pendant la seconde demi-révolution d'une onde orientée

en sens inverse. La durée des deux ondes ou alternances consécutives, s'appelle *période* du courant alternatif.

Appelons \mathcal{H} l'intensité du champ, s la surface de la spire dont la vitesse angulaire supposée constante $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$. L'angle décrit pendant un temps t sera $\alpha = \omega t$. Dans la position A' C', faisant un angle α avec l'axe MN, le flux traversant la boucle est

$$\mathcal{H} s \cos \alpha = \mathcal{H}.$$

La force électromotrice d'induction aura par conséquent pour expression

$$e = -\frac{d\mathcal{H}}{dt} = \mathcal{H} s \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt} = \mathcal{H} s \omega \sin \omega t.$$

Vitesse angulaire ou pulsation de la force électromotrice.— Si T est la période, c'est-à-dire dans le cas particulier que nous étudions, la durée d'une révolution complète de la spire, correspondant à un angle 2π radians, l'angle parcouru pendant l'unité de temps, *vitesse angulaire ou pulsation* de la force électromotrice sera $\omega = \frac{2\pi}{T}$ radians. En remplaçant ω par sa valeur dans le sinus, nous obtenons

$$e = \mathcal{H} s \omega \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

Pour

$$t = 0, \frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3}{4}T, T, \frac{5}{4}T, \text{ etc.},$$

puisque

$$\sin \frac{2\pi t}{T} = 0, 1, 0, -1, 0, +1, \dots,$$

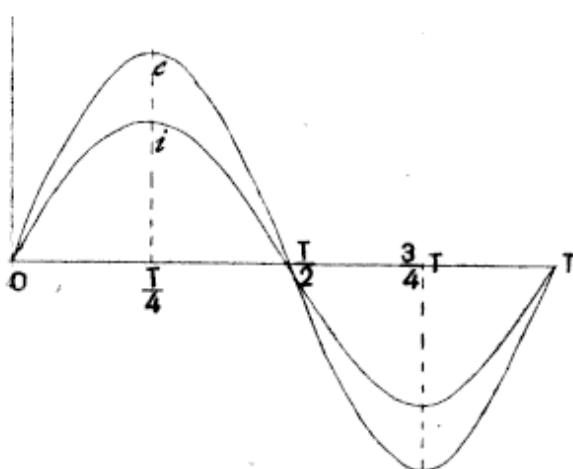


FIG. 188.

la force électromotrice passe successivement par zéro, un maximum

$E = \mathcal{H} s \omega$, zéro, un minimum $-\mathcal{H} s \omega$, zéro, etc., et son expression en fonction du temps peut se mettre sous la forme

$$e = E \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

C'est une sinusoïde fa-

cielle à construire, en portant les temps sur un axe horizontal et les forces électromotrices correspondantes en ordonnées, courbe des e (fig. 188). E est l'amplitude de la force électromotrice.

Fréquence. — Remarquons que T étant la durée d'une période, le nombre f de périodes par seconde ou la *fréquence* sera $\frac{1}{T} = f$ et la valeur de la force électromotrice pourra encore s'écrire :

$$e = E \sin 2\pi ft.$$

Cette formule est générale et vraie quel que soit le nombre des champs traversés pendant une révolution par la spire.

APPLICATION. — Si celle-ci possède une surface de 3 centimètres carrés, tourne dans un champ de 15 gauss auquel elle est normale, et fait 1000 tours par seconde, la force électromotrice maximum engendrée aura pour valeur

$$15 \cdot 3 \cdot 2\pi \cdot 1000 = 283 \cdot 10^3 \text{ unités C. G. S.} = \frac{283 \cdot 10^3}{10^8} = 0,00283 \text{ volt.}$$

Intensité. — Nous avons supposé la spire, de résistance r , dépourvue de selfinduction, comme d'ailleurs de capacité. L'intensité du courant, donnée par la loi d'Ohm, sera à un instant quelconque t

$$i = \frac{E \sin \omega t}{r} = I \sin \omega t = I \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

I est l'amplitude de l'intensité. Le courant ainsi produit s'appelle *courant alternatif, périodique, oscillatoire ou harmonique*.

La courbe d'intensité affecte, dans ce cas particulier, non seulement la même forme que celle de la force électromotrice, mais encore la même *phase*, c'est-à-dire qu'elle s'annule et passe par ses valeurs maxima en même temps qu'elle. En effet, pour

$$t = 0, \frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3}{4}T, T, \text{ etc.},$$

i est nul, maximum, nul, minimum, nul, etc. (fig. 188, courbe des i) tout comme la force électromotrice.

COURANT REDRESSÉ. — Les extrémités de la spire étant reliées à deux demi-cylindres métalliques tournant avec elle, isolés l'un

de l'autre, sur lesquels frottent des balais calés de manière qu'ils passent d'un demi-cylindre sur l'autre au moment où le courant est annulé dans la spire, un circuit relié aux balais sera parcouru par un *courant redressé*, c'est-à-dire par une série d'ondes successives de mêmes amplitude et sens.

COURANT ONDULÉ. — Si le courant alternatif est superposé à un courant continu d'intensité plus grande que son amplitude, on a comme résultante un courant *ondulé*, présentant simplement des maxima et minima successifs sans passages par zéro.

COURANT PULSATIF. — Quand l'intensité du courant continu auquel se superpose le courant alternatif est précisément égale à son amplitude, le courant devient *pulsatif*, c'est-à-dire croît de zéro à un maximum, décroît jusqu'à zéro, et ainsi de suite.

On obtient un tel courant, mais à ondes irrégulières, en interrompant périodiquement un courant continu.

Renversement d'un courant alternatif. — Le courant alternatif se propageant tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, il semble que le renversement d'un tel courant n'ait pas de sens physique. Il en est ainsi si l'on ne considère que la direction variable du courant; la question change de face, si l'on fait entrer en ligne de compte cet autre facteur essentiel du courant alternatif : *le temps*.

Soit un courant alternatif traversant un appareil, représenté par la sinusoïde OB (fig. 189). Si l'on permute les connexions

avec le circuit d'alimentation, le courant, qui avait au moment considéré la valeur positive AB, par exemple, prend instantanément la même valeur négative AB' courbe inférieure en gros trait, ce qui revient à l'avancer d'une demi-période.

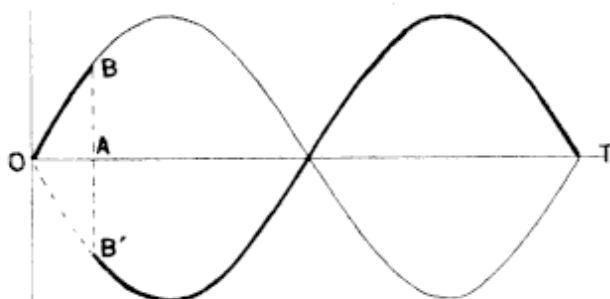


FIG. 189.

Donc, quand on renverse un courant alternatif, on le déphase en avant de π radians ou d'une demi-période.

Force électromotrice effective. — De la dernière équation écrite plus haut nous tirons : $E \sin \omega t = ri = rI \sin \omega t$. Donc, comme en courant continu, pour faire traverser la résistance r par le courant $I \sin \omega t$, nous devons appliquer à ses bornes la force électromotrice *effective* $e_e = rI \sin \omega t$, égale à chaque instant au produit de la résistance par la valeur instantanée de l'intensité du courant.

Intensité et force électromotrice efficaces. — Quelle que soit la forme de la courbe d'intensité qu'affecte le courant alternatif, la puissance qu'il est susceptible de produire se traduira uniquement sous forme de chaleur, en l'absence de récepteur dans le circuit. L'intensité repassant successivement par les mêmes valeurs pendant les diverses périodes, nous pouvons borner notre examen à une seule période, pendant laquelle l'énergie calorifique développée est

$$\int_0^T ri^2 dt = rI^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \frac{rI^2}{2} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt =$$
$$\frac{rI^2}{2} \left[t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right]_0^T = \frac{rI^2}{2} T.$$

Cette quantité de chaleur, que l'on pourra utiliser plus ou moins complètement, représente donc, en somme, l'*efficacité* du courant alternatif. Pour l'apprécier, le moyen le plus commode est de la comparer avec l'effet calorifique produit par un courant continu, de sorte que, par définition, l'*intensité efficace d'un courant alternatif est l'intensité du courant continu qui, traversant la même résistance, y développe la même quantité de chaleur pendant le même temps*. Soit X l'intensité du courant continu équivalent. Pendant le temps T , il développe l'effet Joule rX^2T .

Nous aurons

$$rX^2T = \frac{rI^2}{2} T, \text{ d'où } X = \sqrt{\frac{I^2}{2}}.$$

L'intensité efficace d'un courant alternatif est donc égale à son intensité maximum, divisée par $\sqrt{2}$.

Par analogie, on désigne sous le nom de *force électromotrice efficace* l'expression $\frac{E}{\sqrt{2}}$.

UTILITÉ DE LA NOTION DE L'INTENSITÉ EFFICACE. — L'utilité de la notion de l'intensité efficace est de permettre de traiter le courant alternatif comme un courant continu *au point de vue de l'effet Joule*. On a, en effet, d'une manière générale : *chaleur développée par seconde dans un conducteur de résistance r, par un courant alternatif d'intensité efficace $i_{\text{eff}} = ri^2_{\text{eff}}$* .

LES APPAREILS DE MESURE DONNENT LES VALEURS EFFICACES. — Il est d'ailleurs à remarquer que ce sont les valeurs efficaces qu'indiquent les appareils de mesure. Un galvanomètre ordinaire inséré dans un circuit alternatif ne marque rien, son équipage ayant trop d'inertie pour suivre des variations aussi rapides que celles du courant alternatif, dont la fréquence industrielle est d'environ 50. Il faut donc se servir de l'électrodynamomètre, dont les indications sont proportionnelles à chaque instant à i^2 , soit au total à la moyenne des carrés des intensités. Or, cette moyenne

$$\frac{I}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{I^2}{2},$$

dont la racine carrée, soit $\sqrt{\frac{I^2}{2}}$, est précisément l'intensité efficace.

INTENSITÉ ET FORCE ÉLECTROMOTRICE MOYENNES. — L'intensité moyenne du courant est évidemment nulle. Mais on a l'habitude de considérer comme intensité moyenne, la moyenne des valeurs successives que prend le courant pendant une demi-période

$$i_m = \frac{I}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I \sin \omega t dt = \frac{2I}{\pi}.$$

Son rapport à l'intensité efficace

$$\frac{i_m}{i_{\text{eff}}} = \frac{2I\sqrt{2}}{\pi I} = 0,9,$$

c'est-à-dire que les indications de l'électrodynamomètre doivent être réduites d'un dixième, pour donner le courant moyen.

Les mêmes considérations s'appliqueraient aux forces électromotrices moyenne et efficace.

Effet de la selfinduction et de la capacité. — Supposons maintenant le circuit constitué par une résistance r (fig. 190), douée d'un coefficient de selfinduction \mathcal{L} henrys, montée en série avec un condensateur de capacité c farads. Cherchons quelle force électromotrice nous devrons appliquer à ses extrémités, pour que le courant $i = I \sin \omega t$ le traverse.

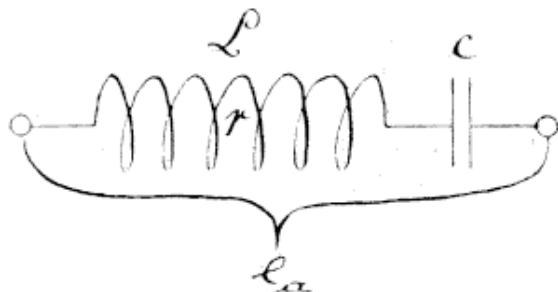


FIG. 190.

Nous savons que le coefficient de selfinduction de la bobine donnera lieu à une force contre-électromotrice de selfinduction $-\mathcal{L} \frac{di}{dt}$ et que les charges que possédera le condensateur par suite du passage du courant donneront également lieu à une force contre-électromotrice s'opposant au passage du courant.

Appelons e_a la force électromotrice appliquée, — e_c la force contre-électromotrice existant entre les armatures du condensateur au moment t . Nous avons vu (p. 90) que la force électromotrice à appliquer aux bornes d'un circuit dans lequel existent des forces électromotrices $= I \Sigma R - \Sigma E$, les forces électromotrices étant prises en signes contraires.

Nous aurons en conséquence

$$e_a = r i + \mathcal{L} \frac{di}{dt} + e_c$$

ce qui veut dire que la force électromotrice appliquée doit à chaque instant être la somme de trois forces électromotrices : l'une $r i$, en phase avec le courant, laquelle est la *force électromotrice effective*; la seconde $\mathcal{L} \frac{di}{dt}$, force électromotrice dite de *selfinduction*, égale et opposée à la force contre-électromotrice de selfinduction et qui doit donc à chaque instant l'équilibrer; enfin une troisième force électromotrice dite de *capacité*, égale et opposée à celle développée dans le condensateur.

Nous allons les évaluer en fonction des facteurs du circuit. La force électromotrice effective $e_e = r i = r I \sin \omega t$. C'est

elle qui forcera le courant $I \sin \omega t$ à traverser la résistance r considérée isolément.

La force électromotrice de selfinduction

$$e_s = \mathfrak{L} \frac{di}{dt} = \mathfrak{L} \frac{d(I \sin \omega t)}{dt} = \mathfrak{L} I \omega \cos \omega t.$$

C'est elle qui équilibrera à chaque instant la force contre-électromotrice naissant du chef de la selfinduction

$$-\mathfrak{L} \frac{di}{dt} = -\mathfrak{L} I \omega \cos \omega t.$$

Pour déterminer la force électromotrice de capacité, ou la différence de potentiel qui, appliquée aux bornes du condensateur, annule à chaque instant la différence de potentiel due à la charge que ses armatures prennent par le passage du courant, nous la calculerons au moyen de la formule générale

$$Q = C V \text{ d'où } V = \frac{Q}{C}$$

en déterminant la charge qu'a absorbé le condensateur après un temps t .

Au bout du temps t , ses armatures retiennent la quantité d'électricité

$$\int_0^t I \sin \omega t dt = \frac{I}{\omega} - \frac{I}{\omega} \cos \omega t \text{ coulombs.}$$

Pour embrasser le problème dans toute sa généralité, nous devons lui supposer une certaine charge initiale q_0 . A l'époque t , la charge du condensateur sera donc

$$q_0 + \frac{I}{\omega} - \frac{I}{\omega} \cos \omega t$$

et la différence de potentiel de ses armatures

$$\frac{q_0}{C} + \frac{I}{\omega C} - \frac{I}{\omega C} \cos \omega t \text{ volts.}$$

Voyons quel est son signe. Cette différence de potentiel est orientée en sens inverse du courant qui lui donne naissance. Elle a donc pour valeur, en tenant compte des signes adoptés

$$-\left(\frac{q_0}{C} + \frac{I}{\omega C} - \frac{I}{\omega C} \cos \omega t\right)$$

et la force électromotrice de capacité qui lui est égale et opposée aura pour expression

$$e_c = - \left[- \left(\frac{q_o}{c} + \frac{I}{\omega c} - \frac{I}{\omega c} \cos \omega t \right) \right] = \frac{q_o}{c} + \frac{I}{\omega c} - \frac{I}{\omega c} \cos \omega t \text{ volts.}$$

En résumé, pour faire traverser par un courant $I \sin \omega t$ ampères un circuit comprenant une résistance r ohms, un coefficient de selfinduction \mathfrak{L} henrys et une capacité c farads, il faudra appliquer à ses bornes :

1° Une force électromotrice effective e_e égale à chaque instant à l'intensité du courant multipliée par la résistance ohmique du circuit

$$e_e = rI \sin \omega t;$$

2° Une force électromotrice de selfinduction équilibrant à chaque instant la force contre-électromotrice due à la self-induction

$$e_s = \mathfrak{L} I \omega \cos \omega t;$$

3° Une force électromotrice de capacité contre-balançant à chaque instant la force contre-électromotrice due à la charge du condensateur

$$e_c = \frac{q_o}{c} + \frac{I}{\omega c} - \frac{I}{\omega c} \cos \omega t.$$

La force électromotrice *totale* ou *agissante* ou *appliquée* e_a , à entretenir aux bornes du circuit pour le faire traverser par le courant $I \sin \omega t$ aura donc pour valeur

$$e_a = e_e + e_s + e_c = rI \sin \omega t + \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{I}{\omega c} \right) I \cos \omega t + \frac{q_o}{c} + \frac{I}{\omega c}$$

La forme du second membre indique que e_a est le sinus d'une somme d'arcs. Comme ce sinus doit contenir le terme périodique ωt , nous poserons

$$e_a = E_a \sin (\omega t + \varphi) = E_a \cos \varphi \sin \omega t + E_a \sin \varphi \cos \omega t.$$

En identifiant avec le second membre de l'équation précédente, nous obtiendrons les équations de condition

$$E_a \cos \varphi = rI; E_a \sin \varphi = \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{I}{\omega c} \right) I; \frac{q_o}{c} + \frac{I}{\omega c} = 0;$$

d'où

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\left(\omega \mathfrak{L} - \frac{I}{\omega c} \right) I}{rI} = \frac{\omega \mathfrak{L}}{r} - \frac{I}{\omega c r} \text{ et } q_o = - \frac{I}{\omega}.$$

REMARQUE. — La force électromotrice de selfinduction $e_s = \mathfrak{L} I \cos \omega t$ peut aussi s'écrire ($I \cos \omega t$ correspondant au courant) $e_s = r' I \cos \omega t$. En identifiant les deux expressions, nous trouvons $r' = \mathfrak{L} \omega$ c'est-à-dire que le terme $\mathfrak{L} \omega$ correspond à une résistance et s'exprimera en ohms, \mathfrak{L} représentant des henrys.

Il en est de même du facteur $\frac{I}{\omega c}$, c étant exprimé en farads.

Ceci pouvait être prévu à priori, le dénominateur de i_{eff} étant nécessairement homogène.

Résistance apparente ou impédance, réactance. — Le radical dénominateur de l'expression de i_{eff} , qui joue le rôle d'une résistance et s'exprime en ohms, porte le nom de *résistance apparente du circuit ou impédance*. Ce n'est, en effet, que la résistance *apparente*, puisque la *vraie* résistance reste r , ainsi que le montre l'équation générale. La résistance apparente s'obtient en divisant, comme en courant continu, la force électromotrice appliquée par l'intensité du courant. On a

$$r_{app} = \frac{e_{a\ eff}}{i_{eff}} = \frac{r}{\cos \varphi}.$$

Reprendons l'expression du radical. Nous voyons que la résistance apparente est fonction de la fréquence, puisque $\omega = 2\pi f$, et ne tombe jamais au-dessous de la résistance r mesurée en courant continu; c'est, en somme, le *facteur par lequel il faut multiplier l'intensité efficace pour obtenir la force électromotrice efficace appliquée*.

Graphiquement, on le déterminera en construisant un triangle rectangle (fig. 191) dont les deux côtés de l'angle droit sont la résistance r et

$\omega \mathfrak{L} = \frac{I}{\omega c}$, qui porte le nom de *réactance du circuit*. On remarquera que l'angle opposé à la réactance est précisément l'angle φ . Car nous avons trouvé précédemment

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \mathfrak{L}}{r} = \frac{I}{\omega c r} = \frac{\text{réactance}}{\text{résistance}}.$$

En reprenant l'exemple numérique traité ci-dessus, nous

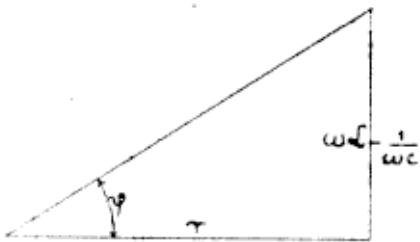


FIG. 191.

voyons qu'il faudra porter sur un des côtés de l'angle droit la longueur 500 ; sur l'autre $94,25 \cdot 10 - \frac{106}{94,25 \cdot 25} = 517,5$. L'hypothénuse a bien la longueur 720 déduite moins aisément par le calcul.

La force électromotrice appliquée est en avance de ω radians sur le courant, ou inversement, celui-ci est en arrière de la même quantité sur la force électromotrice appliquée. Dès lors, quand celle-ci est $E_a \sin \omega t$, le courant a pour valeur

$$i = I \sin (\omega t - \varphi) = \frac{E_a \cos \varphi}{r} \sin (\omega t - \varphi).$$

Le courant est donc déphasé en arrière, sur la force électromotrice agissante, de l'angle φ radians ou $\frac{\varphi \cdot 360}{2\pi}$ degrés (fig. 192). Ses maxima, minima, passages par zéro, ses diverses phases en un mot, se trouvent retardées sur les phases correspondantes de la force électromotrice appliquée d'un temps $\frac{\varphi}{\omega}$ secondes.

En outre, l'intensité se trouve réduite dans la proportion de $\cos \varphi$, car s'il n'existant dans le circuit qu'une résistance, on aurait simplement, comme nous l'avons vu précédemment,

$$i = \frac{E_a}{r} \sin \omega t.$$

Voyons ce que deviennent les valeurs efficaces, les plus intéressantes en pratique. La première équation de condition

$$I = \frac{E_a \cos \varphi}{r}$$

nous donne en divisant de part et d'autre par t^{-2}

$$i_{eff} = e_{a\ eff} \frac{\cos \varphi}{r} = \frac{e_{a\ eff}}{\sqrt{r^2 + (\omega \mathcal{L} - \frac{I}{\omega C})^2}}.$$

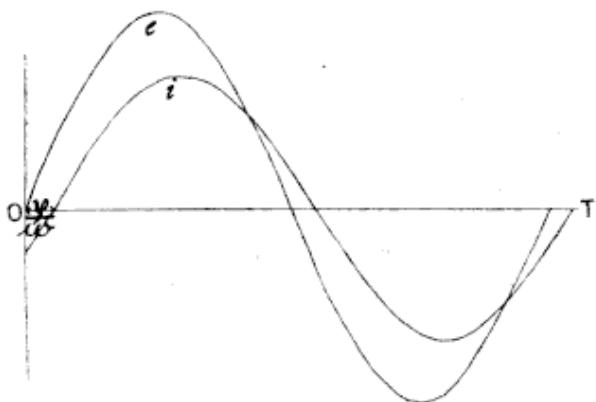


FIG. 192.

Telle est l'équation fondamentale des courants alternatifs, et nous trouvons ici une différence essentielle avec le courant continu : dans l'application de la loi d'Ohm, il y a éventuellement lieu de tenir compte, outre de la résistance r , des trois nouveaux facteurs ω , \mathfrak{L} et c , ou, en bloc, du déphasage φ du courant si on le connaît.

APPLICATION. — Supposons

$e_{a\ eff} = 1000$ V, $r = 500$ O, $\mathfrak{L} = 10$ H, $c = 25$ microfarads, et une fréquence de 15 donnant $\omega = 2\pi f = 94,25$ radians. On trouve $i_{eff} = \frac{1000}{720} = 1,39$ A. Si le circuit avait été dépourvu de selfinduction et de capacité, l'intensité du courant eût été $i_{eff} = \frac{1000}{500} = 2$ A, soit 1,44 fois la valeur précédente.

REMARQUE I. — L'effet Joule est toujours donné par l'expression $i^2 r$, dans laquelle r représente la résistance et non l'impédance, par définition même.

REMARQUE II. — La valeur de $\operatorname{tg} \varphi$ supérieure à 0 ne peut atteindre ∞ puisque ω , \mathfrak{L} , r et c ne sont ni nuls ni infinis. Le déphasage restera donc compris entre

$$0 \text{ et } \pm \frac{\pi}{2}.$$

REMARQUE III. — A moins de rendre la selfinduction de leurs bobines négligeable, les appareils de mesure des courants alternatifs devront être étalonnés pour une fréquence donnée, en dehors de laquelle leurs indications ne sont plus exactes.

REMARQUE IV. — On ne peut obtenir l'impédance totale d'un circuit en ajoutant ses impédances partielles, car en prenant le cas le plus simple où il n'y a pas de capacité

$$\sqrt{(r + r' + \dots)^2 + \omega^2 (\mathfrak{L} + \mathfrak{L}' + \dots)^2}$$

n'est pas égal à

$$\sqrt{r^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2} + \sqrt{r'^2 + \omega^2 \mathfrak{L}'^2} + \dots$$

Chute de voltage. — Il résulte encore de l'équation fondamentale que, lorsque le courant i_{eff} est déphasé de φ sur la force électromotrice appliquée aux extrémités d'un conducteur, la

chute de voltage y est, non pas $i_{eff} r$, mais bien $i_{eff} \frac{r}{\cos \varphi} = i_{eff} \times$ l'impédance. *La chute de voltage est d'autant plus grande que le déphasage est lui-même plus considérable.*

Détermination graphique de la force électromotrice appliquée. — L'équation fondamentale peut encore s'écrire

$$i_{eff} \sqrt{r^2 + \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{I}{\omega C} \right)^2} = e_{a\ eff}$$

ou, en élévant au carré

$$i_{eff}^2 r^2 + i_{eff}^2 \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{I}{\omega C} \right)^2 = e_{a\ eff}^2.$$

Cette équation montre que *la force électromotrice appliquée peut être obtenue graphiquement de la même manière que l'impédance, mais en prenant les côtés de l'angle droit i_{eff} fois plus grands.*

Cas particuliers. — **RÉSONNANCE.** — Le signe négatif dont est affecté le terme dû à la capacité montre que celle-ci joue un rôle inverse à celui du coefficient de selfinduction. Elle annulera complètement l'effet de celui-ci quand

$$\omega \mathfrak{L} - \frac{I}{\omega C} = 0 \quad \text{ou} \quad \omega^2 \mathfrak{L} C = 1 \quad \text{ou} \quad T = 2\pi \sqrt{\mathfrak{L} C}.$$

On dit alors qu'il y a *résonnance*; l'impédance du circuit se confond avec sa résistance, et le courant, d'intensité maximum, est en concordance de phase avec la force électromotrice.

RÉACTANCE DE SELFINDUCTION. — S'il n'existe pas de condensateur dans le circuit, le terme en C disparaît, la résistance apparente se réduit à la valeur

$$\sqrt{r^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \mathfrak{L}}{r}.$$

Par conséquent, la selfinduction seule déphase le courant en arrière de la force électromotrice puisque φ est affecté du signe négatif et diminue son intensité. Le terme $\omega \mathfrak{L}$ ou $\frac{2\pi}{T} \mathfrak{L}$ a reçu le nom de *réactance de selfinduction ou inductance*.

Quand r est négligeable devant $\omega \mathfrak{L}$, il vient

$$i_{eff} = \frac{e_{eff}}{\omega \mathfrak{L}}$$

$\operatorname{tg} \varphi$ est très grande et le déphasage en arrière approche de $\frac{\pi}{2}$.

APPLICATION. — Soient $e_{eff} = 1000$ V, $r = 1$ O, $\mathfrak{L} = 10$ H, $f = 15$, d'où $\omega = 94,25$; on trouve $i_{eff} = 1,06$ A et $\varphi = 89^\circ 56'$.

L'expression $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \mathfrak{L}}{r}$ montre que si l'on fait croître progressivement la résistance du circuit, le déphasage du courant diminue de plus en plus. Lorsqu'un circuit dérivé présente une faible inductance et une grande résistance, il est donc parcouru par un courant sensiblement en phase avec la différence de potentiel agissante.

CAPACITANCE. — Si $\mathfrak{L} = 0$, la résistance apparente devient

$$\sqrt{r^2 + \frac{I}{\omega^2 c^2}} \text{ avec } \operatorname{tg} \varphi = - \frac{I}{\omega c r}.$$

On voit que l'effet de la capacité seule est de donner à φ une valeur négative, c'est-à-dire de déphaser le courant *en avant*, en même temps que l'intensité est réduite.

Le terme $\frac{I}{\omega c}$ s'appelle *réactance de capacité* ou *capacitance*.

Quand la capacité intercalée dans le circuit est très faible, r devient négligeable devant $\frac{I}{\omega c}$ et il reste

$$i_{eff} = \omega c e_{eff},$$

$\operatorname{tg} \varphi$ est négative, très grande et le déphasage en avant approche de $\frac{\pi}{2}$.

APPLICATION. — Pour $e_{eff} = 1000$ V; $\omega = 94,25$, $r = 1$ O et $c = 1$ microfarad : $i_{eff} = 94,25 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 = 0,09425$ A, courant exclusivement dû à la charge du condensateur coupant le circuit et $\varphi =$ sensiblement 90° .

Si $r = 0$, $i_{eff} =$ encore $\omega c e_{eff}$ et $\varphi = - \frac{\pi}{2}$.

$$e = E \sin \omega t \text{ et } i = I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = I \cos \omega t.$$

Done, quand on applique une force électromotrice alternative aux bornes d'un condensateur, la force électromotrice et le courant sont en quadrature, les minima de l'un correspondant aux maxima de l'autre et vice-versa; le courant est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ en avant sur la force électromotrice.

REMARQUE. — La réactance $= \omega \mathfrak{L} - \frac{I}{\omega C}$ c'est-à-dire qu'elle est la différence entre l'inductance et la capacitance.

Déphasage des diverses forces électromotrices. — Le courant étant $i = I \sin \omega t$, nous avons vu que

$$e_s = \mathfrak{L} I \omega \cos \omega t = \mathfrak{L} I \omega \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

ce qui indique que la force électromotrice de selfinduction est déphasée d'un angle $\frac{\pi}{2}$ en avant sur le courant. Celui-ci étant en arrière de φ sur la force électromotrice appliquée, la force électromotrice de selfinduction sera $\frac{\pi}{2} - \varphi$ en avant de cette dernière.

Quant à la force électromotrice de capacité, puisque

$$\frac{q_0}{c} + \frac{I}{\omega C} = 0,$$

$$e_c = - \frac{I}{\omega C} \cos \omega t = \frac{I}{\omega C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

elle est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ en arrière sur le courant et de $\frac{\pi}{2} + \varphi$ en arrière sur la force électromotrice appliquée.

En résumé nous pouvons dresser le tableau suivant.

FACTEUR considéré	VALEURS maxima	DÉPHASAGE	
		par rapport au courant	par rapport à la force électro- motrice appliquée
i	$I = \frac{E_a \cos \varphi}{R}$	0	φ en arrière
e_a	$E_a = \frac{Ir}{\cos \varphi}$	φ en avant	0
e_r	$rI = E_a \cos \varphi$	0	φ en arrière
e_s	$\mathfrak{L} I \omega = \frac{\mathfrak{L} E_a \cos \varphi \omega}{R}$	$\frac{\pi}{2}$ en avant	$\frac{\pi}{2} - \varphi$ en avant
e_c	$\frac{I}{\omega C} = \frac{E_a \cos \varphi}{\omega C R}$	$\frac{\pi}{2}$ en arrière	$\frac{\pi}{2} + \varphi$ en arrière

REMARQUES. — I. Les intensités et forces électromotrices efficaces ne différant des valeurs maxima des fonctions périodiques auxquelles elles se rapportent que par le facteur constant $\frac{1}{\sqrt{2}}$, dès que l'on connaît les unes on connaît les autres et réciproquement.

II. Les valeurs efficaces possèdent, l'une par rapport à l'autre, les mêmes déphasages que les valeurs périodiques dont elles dérivent.

III. Pour additionner entre elles des valeurs efficaces, tant d'intensités que de forces électromotrices, il faudra donc tenir compte de leurs déphasages. Considérons, par exemple, deux courants sinusoïdaux de mêmes période et intensité efficace, mais déphasés de π radians l'un par rapport à l'autre. Traversant des circuits différents, ils y produiront des effets calorifiques mesurés par les quantités $i^2_{eff} r + i^2_{eff} r'$, r et r' étant les résistances des circuits; mais si on les envoie dans *le même circuit*, à chaque intensité positive de l'un correspondra la même intensité négative de l'autre et vice versa, de sorte que leur résultante sera *nulle*, il n'y aura plus de courant. Au contraire, si les courants sont concordants, l'intensité efficace sera doublée et l'effet Joule quadruplé. La seule connaissance des valeurs efficaces des courants alternatifs ne suffit donc pas; il faut aussi connaître les déphasages qu'elles peuvent présenter l'une par rapport à l'autre, pour pouvoir déterminer leurs effets résultants.

Élévations de potentiel dues à la résonnance. — Les forces électromotrices de selfinduction et de capacité que nous avons considérées jusqu'ici sont les portions de la force électromotrice appliquée, destinées à vaincre continuellement les forces contre-électromotrices de selfinduction et de capacité se développant dans le circuit. Celles-ci sont donc égales et opposées à celles-là et par conséquent déphasées respectivement de $\frac{\pi}{2}$ en arrière et en avant sur le courant.

Elles ont respectivement pour valeur

$$-\mathfrak{L} \frac{di}{dt} \text{ et } -\frac{1}{c} \int i dt$$

ou, d'après l'équation générale précédemment trouvée

$$-\omega \mathfrak{L} \frac{E_a}{\sqrt{r^2 + \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{I}{\omega c}\right)^2}} \cos(\omega t - \varphi)$$

$$\text{et } + \frac{I}{\omega c} \frac{E_a}{\sqrt{r^2 + \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{I}{\omega c}\right)^2}} \cos(\omega t - \varphi).$$

Ces valeurs étant l'une proportionnelle à la vitesse angulaire, l'autre inversement proportionnelle à la capacité dont l'unité, le farad, est excessivement grand, peuvent être très supérieures à la force électromotrice appliquée particulièrement quand il y a résonnance et que r est faible.

EXEMPLE. — Supposons que $E_{a\ eff} = 6\ 000$ V, $r = 1$, $T = \frac{1}{50}$, d'où $\omega = 2\pi \cdot 50 = 314$ et $\mathfrak{L} = 1$ H. S'il y a résonnance

$$T = 2\pi\sqrt{c\mathfrak{L}} \text{ et } c = 0,000\ 010\ 1 \text{ farad.}$$

Nous trouverons aux bornes de la selfinduction et de la capacité des forces électromotrices efficaces égales et opposées valant $314 \times 6\ 000 = 1\ 884\ 000$ volts.

Si donc on essaie la rigidité électrostatique d'un câble au moyen d'une machine à courants alternatifs ayant les données ci-dessus, au lieu de le soumettre à la tension de 6 000 volts, on lui appliquera 1 884 000 volts !

Puissance des courants alternatifs. — En courant continu, la puissance développée par un courant d'intensité I sous la différence de potentiel E est EI . Cette formule est également vraie pour le courant alternatif, à condition de l'appliquer pendant une durée telle que l'intensité et la force électromotrice puissent être considérées comme constantes, c'est-à-dire pendant un temps infiniment petit.

COURANT EN CONCORDANCE DE PHASE. — S'il n'existe aucun déphasage entre le courant et la force électromotrice, on a à chaque instant

$$ei = E \sin \omega t \cdot I \sin \omega t = EI \sin^2 \omega t.$$

La puissance est toujours positive. L'énergie développée pendant une période sera

$$EI \int_0^T \sin^2 \omega t \cdot dt = \frac{EI}{2} T,$$

d'où résulte une puissance moyenne

$$\frac{EI}{2} = e_{eff} i_{eff}.$$

Done, en l'absence de différence de phase, la puissance est simplement égale au produit de la différence de potentiel efficace par l'intensité efficace.

Par exemple, la force électromotrice effective, qui est en concordance avec le courant, fournira au circuit une puissance moyenne $\frac{E_e I}{2}$. Le maximum de $e_e = rI \sin \omega t$ a lieu quand le sinus est égal à l'unité, donc $E_e = rI = E_a \cos \varphi$. Par conséquent, la puissance moyenne de la force électromotrice effective

$$\frac{E_e I}{2} = \frac{E_a \cos \varphi I}{2} = e_{eff} i_{eff} \cos \varphi.$$

COURANT DÉPHASÉ DE $\frac{\pi}{2}$. — Si le courant est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ en avant ou en arrière de la force électromotrice, on aura à chaque instant

$$ei = E \sin \omega t \cdot I \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) = \pm EI \sin \omega t \cos \omega t = \pm \frac{EI}{2} \sin 2\omega t.$$

La puissance varie proportionnellement à un sinus. Elle est donc tantôt positive, tantôt négative, et l'énergie dépensée pendant une demi-période a pour valeur

$$\pm \frac{EI}{2} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin 2\omega t dt = \pm \frac{EI}{4\omega} \left[-\cos 2\omega t \right]_0^{\frac{T}{2}} = 0.$$

Quand le déphasage du courant est $\frac{\pi}{2}$ en avant ou en arrière sur la force électromotrice, l'énergie dépensée pendant un nombre entier quelconque de demi-périodes est nulle. En d'autres termes, le courant absorbe, pendant une partie de la demi-période, l'énergie qu'il avait développée pendant l'autre partie. On peut facilement s'en convaincre par la construction graphique. Traçons les sinusoïdes de la force électromotrice et de l'intensité du courant (fig. 193). Élevons une perpendiculaire au point de passage par zéro de la force électromotrice o_1 , portons des longueurs égales à droite et à gauche de o et o_1 , puis menons en ces points les ordonnées des deux courbes.

Nous aurons d'un côté deux ordonnées de signes contraires dont le produit est négatif; de l'autre, deux ordonnées de mêmes signes respectivement égales aux premières, dont le produit est positif; la somme = 0. A chaque valeur de la puissance correspond dans la même demi-période une valeur égale et contraire, de sorte que la puissance totale est nulle.

En conséquence, les forces électromotrices de selfinduction et de capacité, déphasées par rapport au courant respectivement de $\frac{\pi}{2}$ en avant et en arrière, ne fournissent pas d'énergie au circuit et la puissance moyenne totale développée

$$(e_a i)_{moy} = (e_e i)_{moy} + (e_s i)_{moy} + (e_a i)_{moy} = e_{a\ eff} i_{eff} \cos \varphi.$$

On serait arrivé directement à cette formule, en calculant quelle est la chaleur développée dans le circuit pendant une période, aucun récepteur n'y existant. La chaleur ou puissance moyenne produite est

$$\frac{I}{T} \int_0^T i^2 r dt = \frac{r I^2}{2} = \frac{E_a \cos \varphi}{2} I = e_{a\ eff} i_{eff} \cos \varphi.$$

En résumé, une force électromotrice alternative $E_a \sin \omega t$, engendrant le courant

$$i = I \sin (\omega t - \varphi) = \frac{E_a \cos \varphi}{r} \sin (\omega t - \varphi),$$

développe une puissance moyenne

$$\frac{E_a I}{2} \cos \varphi = e_{eff} i_{eff} \cos \varphi.$$

Done, quand un courant alternatif est déphasé sur sa force électromotrice, la puissance qu'il développe s'obtient en faisant le produit de la force électromotrice efficace par l'intensité et le cosinus de l'angle de déphasage.

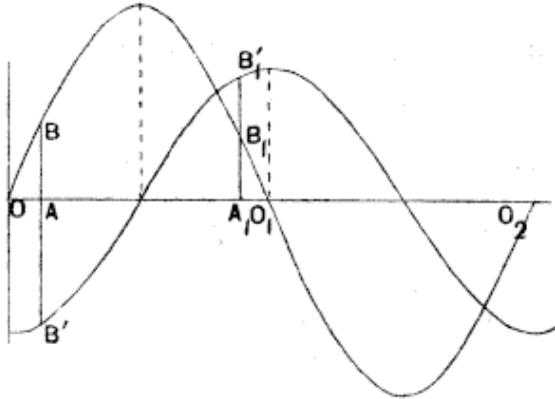


FIG. 193.

VARIATION DE LA PUISSANCE PENDANT LA PÉRIODE. — Il est à remarquer que la puissance est loin d'être constante pendant une période. Si l'on se reporte au diagramme de la figure 191, on verra qu'en partant de l'origine, pendant toute la durée $\frac{\pi}{\omega}$ secondes, les ordonnées des courbes de la force électromotrice et de l'intensité sont de signes contraires ; la puissance est négative, le circuit absorbe de l'énergie, c'est-à-dire, si nous considérons que le circuit est l'induit d'un appareil développant du courant alternatif, le générateur de courant alternatif fonctionne alors comme moteur. Il en est de même après une demi-période (fig. 194). Il y a là un effet analogue à celui que produit le volant d'une machine irrégulière, lequel entraîne son moteur à

certains moments, par suite de l'énergie qu'il a emmagasinée. Au contraire, pendant les autres parties de la demi-période, les deux ordonnées sont de mêmes signes et la puissance développée est positive ; la machine fonctionne comme génératrice. Les deux ordonnées dont le produit fournit la puissance varient d'ailleurs

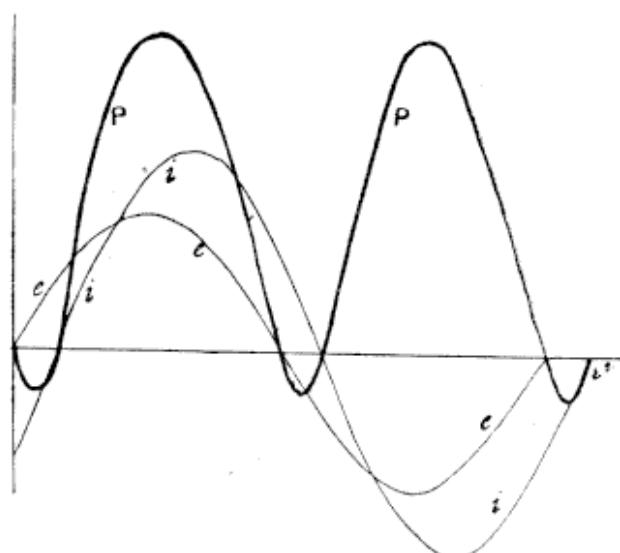


FIG. 194.

continuellement, de sorte que la puissance électrique produite est essentiellement variable.

Elle est représentée par

$$P = e i = E \sin \omega t I \sin (\omega t - \varphi) = \frac{EI}{2} [\cos \varphi - \cos (2 \omega t - \varphi)]$$

montrant qu'à la puissance constante $\frac{EI}{2} \cos \varphi$ s'ajoute une fonction périodique de périodicité double de celle du courant et de la force électromotrice, tantôt positive tantôt négative (fig. 194).

Facteur de puissance. — Le facteur supplémentaire introduit par le déphasage du courant sur la force électromotrice porte

le nom de *facteur de puissance*. C'est la quantité par laquelle il faut multiplier les *watts apparents*, produit de la force électromotrice et de l'intensité efficaces mesurées au moyen d'un voltmètre et d'un électrodynamomètre, pour obtenir la *puissance réelle* dépensée dans le circuit.

Nous avons vu plus haut que l'impédance $= \frac{r}{\cos \varphi}$, d'où $\cos \varphi = \frac{\text{résistance}}{\text{impédance}}$.

Le facteur de puissance est donc égal au rapport de la résistance à l'impédance

Le cosinus étant toujours plus petit que l'unité, pour faire développer par un récepteur quelconque une puissance déterminée

$$P = e_{\text{eff}} i_{\text{eff}} \cos \varphi,$$

on sera amené à majorer soit e_{eff} , soit i_{eff} , soit tous les deux. L'élévation du voltage rend plus difficile l'isolation des circuits et le prix d'établissement des canalisations augmente; la majoration de l'intensité donne une plus grande perte par effet Joule, de sorte qu'il existe un grand intérêt économique à réduire le plus possible le déphasage.

D'après la formule

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \mathfrak{L}}{r} - \frac{I}{\omega c r} = \frac{2\pi f \mathfrak{L}}{r} - \frac{I}{2\pi f c r},$$

on voit que φ dépend de la fréquence qu'on n'est en général pas maître de modifier une fois les machines établies, de \mathfrak{L} et de c . L'insertion de condensateurs de capacité appropriée dans le circuit, permettrait de réduire φ à zéro, mais les condensateurs industriels coûtent cher et leur emploi est précaire.

Si les machines ne fournissent pas des courants exactement sinusoïdaux, on détermine le facteur de puissance en faisant le rapport de la puissance réelle produite, mesurée au moyen d'un wattmètre, à la puissance apparente déterminée à l'aide d'un voltmètre et d'un électrodynamomètre branchés sur le circuit. On exprime souvent cette dernière en *kilovolts-ampères*.

Courants wattés et déwattés. — Développons l'expression donnant l'intensité d'un courant déphasé sur sa force électromotrice $e = E \sin \omega t$ de la quantité φ radians.

$$\begin{aligned}i &= I \sin(\omega t \pm \varphi) = I \cos \varphi \sin \omega t + I \sin \varphi \cos \omega t \\&= I \cos \varphi \sin \omega t + I \sin \varphi \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right).\end{aligned}$$

Le courant déphasé par suite de la réactance du circuit peut donc être considéré comme étant à chaque instant la somme de deux courants alternatifs de même période, mais d'amplitudes différentes $I \cos \varphi$ et $I \sin \varphi$, dont le premier est en concordance de phase avec la force électromotrice et le second en avance ou en retard sur celle-ci de $\frac{\pi}{2}$. D'après ce que nous avons vu précédemment, le second courant ne développera aucune énergie ; c'est une *composante* ou *courant déwatté*. Le premier seul, appelé *composante* ou *courant watté*, fournira de l'énergie au circuit, ce qui nous permet d'écrire directement pour la valeur moyenne de la puissance développée

$$\frac{EI \cos \varphi}{2} = e_{eff} i_{eff} \cos \varphi.$$

PROBLÈME. — *Calculer l'énergie perdue dans une ligne de 10 ohms de résistance par laquelle on transporte 100 chevaux sous 5000 volts efficaces : 1° Quand le déphasage du courant est nul ; 2° quand il atteint 30°.*

1° 100 chx correspondent à 73 600 watts soit un courant de

$$\frac{73\,600}{5\,000} = 14,72 \text{ ampères efficaces.}$$

L'effet Joule est

$$10 \times 14,72^2 = 2\,170 \text{ watts.}$$

2° $\cos 30^\circ = 0,866$. Le courant a pour intensité

$$i_{eff} = \frac{73\,600}{5\,000 \times 0,866} = 17 \text{ ampères.}$$

Effet Joule

$$10 \times 17^2 = 2\,890 \text{ watts}$$

soit 33,2 % en plus que dans le premier cas.

§ 2. — Electro-aimant à courant alternatif.
Distribution du courant dans la section du conducteur.
Bobine d'induction.

Courants de Foucault dans les noyaux des électro-aimants.
Nécessité de subdiviser ceux-ci. — Le flux traversant le noyau d'un électro-aimant parcouru par des courants périodiques étant essentiellement variable, y donne lieu non seulement à des phénomènes d'hystérésis inévitables, mais aussi à la production de courants de Foucault échauffant le noyau et correspondant à de l'énergie perdue.

On atténue ce dernier effet en constituant le noyau d'éléments minces en fils ou lames isolés les uns des autres, soit au moyen de vernis, soit de papier vernis ou paraffiné et juxtaposés de manière que leurs surfaces de séparation soient parallèles aux lignes magnétiques, donc perpendiculaires aux forces électromotrices induites. Les boulons de consolidation du noyau doivent eux-mêmes être isolés par l'intermédiaire de tubes et de rondelles en fibre vulcanisée. Enfin, il est bon d'entourer le noyau tout entier d'une toile vernie, pour que les arêtes de ses éléments constitutifs ne percent pas l'isolant du fil des bobines.

La place perdue étant plus grande avec les fils qu'avec les lames, on réserve les premiers pour les petits électro-aimants et on les isole simplement au vernis les uns des autres.

Expression de la puissance perdue par les courants de Foucault. — Soit un noyau cylindrique de longueur L et de rayon R (fig. 195) traversé longitudinalement par le flux magnétique qui tend à y développer des courants parasites particulièrement vers sa partie externe. Considérons à l'intérieur du cylindre un tube concentrique de rayon r et d'épaisseur dr . Le cylindre intérieur compris dans le tube est traversé par le flux $\mathcal{W} = \pi r^2 \mathfrak{B}$ et la force électromotrice d'induction développée dans

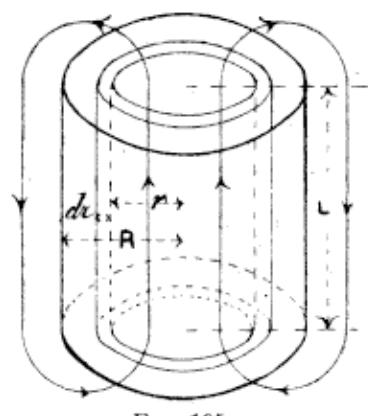


FIG. 195.

le tube pour une variation élémentaire $d\mathcal{N}$ du flux embrassé est

$$e = - \frac{d\mathcal{N}}{dt} = - \pi r^2 \frac{d\mathcal{B}}{dt}.$$

La résistance que présente le tube normalement à la direction de la force électromotrice induite a pour valeur, ρ étant la résistivité du fer

$$\frac{\rho 2 \pi r}{L dr}$$

et la puissance calorifique $\frac{e^2}{r}$ dépensée à un moment donné

$$dp = \frac{\left(-\pi r^2 \frac{d\mathcal{B}}{dt}\right)^2}{\rho 2 \pi r} = \pi r^3 \frac{L}{2 \rho} \left(\frac{d\mathcal{B}}{dt}\right)^2 dr.$$

Enfin la perte totale de puissance dans le noyau

$$P = \int_o^R \frac{\pi r^3 L}{2 \rho} \left(\frac{d\mathcal{B}}{dt}\right)^2 dr = \frac{\pi R^4}{8 \rho} L \left(\frac{d\mathcal{B}}{dt}\right)^2.$$

Par cm^3 on aura

$$\frac{P}{\pi R^2 L} = \frac{R^2}{8 \rho} \left(\frac{d\mathcal{B}}{dt}\right)^2.$$

Supposons que le flux soit sinusoïdal

$$\mathcal{B} = \mathcal{B}_0 \sin \omega t; \frac{d\mathcal{B}}{dt} = \omega \mathcal{B}_0 \cos \omega t.$$

La perte moyenne par seconde et par cm^3 sera

$$\frac{1}{T} \int_o^T \frac{R^2}{8 \rho} (\omega^2 \mathcal{B}_0^2 \cos^2 \omega t) dt = \frac{R^2 \omega^2 \mathcal{B}_0^2}{16 \rho}.$$

Si au lieu d'un cylindre nous sommes en présence d'un parallélépipède, nous obtiendrons une expression analogue.

Ces formules montrent que la perte diminue rapidement avec l'épaisseur du noyau, avec la fréquence et avec l'induction maximum.

D'après ce que nous avons dit au sujet de la répulsion des courants inducteurs et induits, il est facile de se rendre compte de ce que, les courants induits étant pendant la majeure partie de la période, de direction opposée à celle du courant inducteur, ils exercent un effet démagnétisant sur le noyau, effet acquérant

son intensité maximum au centre du noyau. L'induction sera conséquemment plus forte vers les bords qu'au centre et, pour obtenir un effet magnétique déterminé, il faudra accroître l'induction dans les couches extérieures ce qui augmentera les pertes par hystérésis, celles-ci croissant plus vite que l'induction maximum.

Lorsque le noyau est convenablement subdivisé, cet effet démagnétisant est négligeable, du moins avec les fréquences industrielles usuelles qui se limitent actuellement entre 25 et 50.

Distribution du courant alternatif dans la section du conducteur. Effet Kelvin. — Nous avons supposé jusqu'ici que la densité du courant restait constante dans toute la section du conducteur. Avec le courant alternatif il n'en est pas ainsi. Lorsque le diamètre du conducteur et la fréquence croissent, le courant tend à se concentrer dans la partie périphérique du conducteur. Il en résulte une véritable diminution de la section, c'est-à-dire une augmentation de la résistance et par suite une majoration de l'effet Joule.

Soit un circuit fermé A B (fig. 196) allant de A vers B derrière le plan de la feuille et dont les deux brins sont parallèles. Le passage du courant dans ces conducteurs développe comme nous l'avons vu un champ magnétique dont les lignes de force entourent individuellement les deux brins et sont partiellement absorbées par eux. Le courant total peut être décomposé en filets parallèles à l'axe de chaque brin. Si nous considérons le filet central, nous voyons qu'il embrasse tout le flux magnétique développé. Son coefficient de selfinduction est donc maximum, ainsi que l'impédance qui diminue son intensité. Au contraire, au fur et à mesure que l'on s'écarte de l'axe, le flux embrassé diminue de toute la portion de ce flux existant à l'intérieur de la circonference ayant pour rayon la distance à l'axe du filet considéré. Cette action est la plus marquée pour les filets de la périphérie qui n'embrassent, comme flux actif, que le flux total moins celui absorbé par le conducteur. Ce sont donc ces filets qui rencontrent le

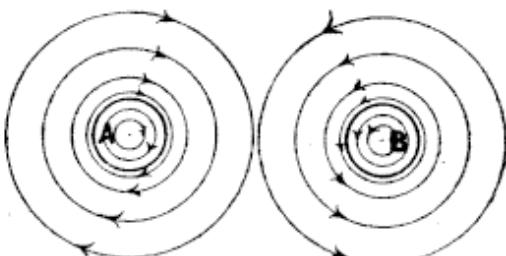


FIG. 196.

moins de résistance à leur propagation et, par suite, le courant se concentre dans l'épiderme du conducteur, effet d'autant plus marqué que le conducteur est plus gros, puisqu'il absorbe alors plus de flux ; que la pulsation de la force électromotrice est plus grande, puisqu'alors le facteur ω de la réactance $\omega\mathfrak{L}$ devient plus considérable ; et que la matière du conducteur est plus perméable, puisqu'alors c'est le facteur \mathfrak{L} qui augmente notablement pour les filets centraux, en se réduisant à une faible valeur pour les filets périphériques.

Lord Kelvin a établi la formule suivante donnant la résistance R_A d'un conducteur cylindrique traversé par un courant alternatif de pulsation ω , en fonction de sa résistance R en courant continu, de sa longueur l et de la perméabilité magnétique μ de la substance qui le constitue

$$R_A = R \left(1 + \frac{1}{12} \frac{\omega^2 l^2 \mu^2}{R^2} - \frac{1}{180} \frac{\omega^4 l^4 \mu^4}{R^4} + \dots \right) \quad (1)$$

Pour le cuivre $\mu = 1$. En admettant une résistivité $\rho = 1,6$ microhm-centimètre = 1600 unités C. G. S., on a, en négligeant les termes de la série après le deuxième, d étant le diamètre en centimètres.

$$R_A = R \left(1 + \frac{0,8 d^4 f^2}{10^6} \right) = k R \quad (2)$$

La formule (1) montre que le fer est impropre à la transmission des courants alternatifs de grande fréquence, à cause de la valeur élevée de sa perméabilité. Il faut également rejeter les cylindres trop gros, pour adopter alors des tubes et en particulier des câbles concentriques.

Calculons l'accroissement de résistance au courant alternatif de fréquence 50 d'un conducteur en cuivre de 1 centimètre de diamètre

$$k = 1 + \frac{0,8 \times 50^2}{10^6} = 1,002.$$

L'accroissement de résistance est, comme on le voit, insignifiant pour le cuivre ; aussi peut-on généralement le négliger dans les applications industrielles.

Transformation des courants alternatifs. Bobine d'induction. — On peut aisément transformer les deux facteurs, force électromotrice et intensité efficaces d'un courant alternatif, en mettant à contribution les phénomènes d'induction.

Superposons à la bobine d'un électro-aimant droit, par exemple, une seconde bobine que nous appellerons le *secondaire*, la première étant le circuit *primaire*. Nous aurons constitué ainsi une *bobine d'induction ou transformateur*.

En faisant passer dans l'enroulement primaire un courant alternatif, le flux magnétique alternatif développé dans le noyau traversant toutes les spires de l'enroulement secondaire, engendrera dans celui-ci une force électromotrice alternative qui, si le circuit est fermé, y développera un courant alternatif.

Appelons e'_{eff} , i'_{eff} , e''_{eff} , i''_{eff} les forces électromotrices et les intensités des courants dans les circuits primaire et secondaire. En supposant nulles les pertes et nuls les déphasages des courants sur les forces électromotrices nous aurons

$$e'_{eff} i'_{eff} = e''_{eff} i''_{eff}$$

d'où

$$\frac{i'_{eff}}{i''_{eff}} = \frac{e''_{eff}}{e'_{eff}}$$

A un courant intense dans le primaire correspondra une grande force électromotrice dans le secondaire et vice-versa.

En interposant dans le primaire l'interrupteur automatique indiqué figure 120 on pourra, ainsi que l'a fait Ruhmkorff, transformer un courant continu à basse tension, en un courant alternatif à haute tension.

CHAPITRE XIII.

Effets divers dus aux courants alternatifs.

Rotation sous l'action de courants induits. — Certains mouvements rotatifs peuvent être réalisés par la réaction des courants induits.

Lorsqu'un disque en cuivre tourne au-dessus ou au-dessous d'une aiguille aimantée, celle-ci est entraînée dans le même sens de rotation.

Inversement, en faisant tourner un fort aimant au-dessus d'un disque métallique mobile, celui-ci tend à suivre l'aimant dans son mouvement. En nous reportant à l'explication donnée à propos des courants de Foucault, nous verrons que les courants induits en avant de l'aimant développent un pôle de même nom et qui est par conséquent repoussé, tandis que celui engendré en arrière étant de nom contraire se trouve attiré.

En somme, *un flux magnétique se déplaçant dans un conducteur, tend à l'entraîner dans le sens du mouvement.*

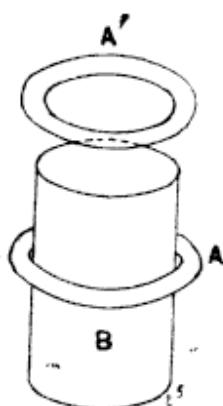


FIG. 197.

Répulsion entre un courant inducteur et un courant induit. — Soit un électro-aimant B (fig. 197) parcouru par un courant alternatif $i = I_0 \sin \omega t$. Un anneau métallique A entourant l'électro est repoussé en A' tant que le courant alternatif passe. Cherchons à nous rendre compte du phénomène.

Le flux traversant le noyau de l'électro a pour équation

$$\mathcal{B} = \frac{4\pi n I_0 \sin \omega t}{R} = \mathcal{B}_0 \sin \omega t,$$

d'où résulte une force électromotrice induite dans l'anneau

$$e = - \frac{d \mathcal{B}}{dt} = - \mathcal{B}_0 \omega \cos \omega t = \mathcal{B}_0 \omega \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Cette force électromotrice est en retard de $\frac{\pi}{2}$ sur le courant inducteur.

Sous son influence, un courant prend naissance dans l'anneau

$$i' = \frac{\pi_0 \omega \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi \right)}{\sqrt{r^2 + \omega^2 \mathcal{L}^2}}$$

avec la condition $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \mathcal{L}}{r}$.

r étant très faible, φ approche de $\frac{\pi}{2}$ et ainsi les courants i et i'

sont presque constamment en opposition, (fig. 198) et notamment, quand leurs intensités momentanées sont le plus grandes.

Or, pendant qu'ils sont en opposition, les flux qu'ils émettent ont un sens inverse et se repoussent, ce qui explique le mouvement de répulsion constaté.

En interposant une plaque métallique entre l'électro et l'anneau, le phénomène disparaît, l'écran étant lui-même le siège du courant induit dont l'effet neutralise, par rapport à l'anneau, celui du courant inducteur.

En somme, l'anneau tend à se déplacer de manière que le flux magnétique périodique qui le traverse soit minimum.

M. Fleming a établi sur cette remarque un appareil propre à déceler les courants périodiques et constitué par une bobine B (fig. 199) au centre de laquelle est suspendu obliquement un petit disque en cuivre D, lequel tend à se placer suivant la position D' de minimum de flux. Les angles de déviation sont lus par l'intermédiaire d'un miroir M.

La position oblique est imposée par le fait que, si le disque était placé dans la posi-

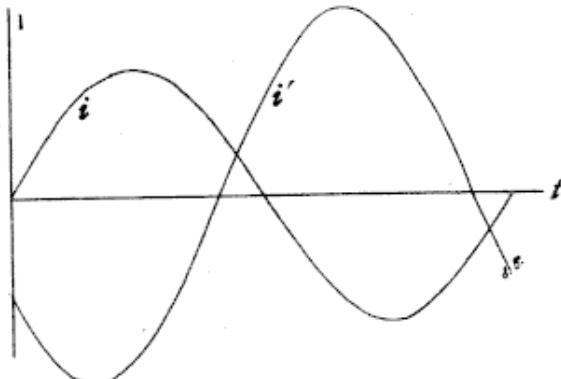


FIG. 198.

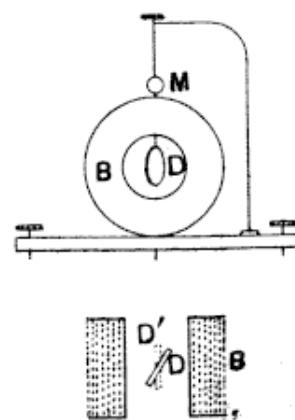


FIG. 199.

tion perpendiculaire à l'axe de la bobine, il prendrait un mouvement oscillatoire sous l'effet des impulsions égales et inverses qu'il recevrait continuellement.

Décharge oscillante. — Lorsqu'un condensateur de capacité C se décharge dans un circuit de résistance r , de coefficient de

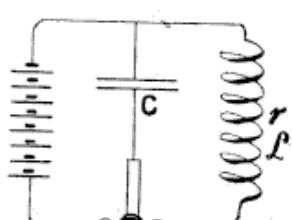


FIG. 200.

selfinduction \mathfrak{L} (fig. 200), la forme du courant traversant le circuit dépend essentiellement de la valeur particulière des facteurs de celui-ci. A un moment donné la différence de potentiel entre les armatures du condensateur est V et le courant de décharge étant égal et de signe contraire au taux de variation de la charge nous aurons

$$i = \frac{-dq}{dt} = \frac{V - \mathfrak{L} \frac{di}{dt}}{r}.$$

Comme $q = C V$, il vient en remplaçant V et $\frac{di}{dt}$ en fonction de q , pour éliminer une des variables et pouvoir intégrer

$$-\frac{dq}{dt} = \frac{\frac{q}{C} + \mathfrak{L} \frac{d^2 q}{dt^2}}{r}$$

$$\text{ou } \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{r}{\mathfrak{L}} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C \mathfrak{L}} = 0$$

équation différentielle linéaire du second degré sans second membre.

$$\text{Posons } q = e^{mt}; \frac{dq}{dt} = m e^{mt}; \frac{d^2 q}{dt^2} = m^2 e^{mt}$$

l'équation précédente devient

$$e^{mt} \left(m^2 + \frac{r}{\mathfrak{L}} m + \frac{1}{C \mathfrak{L}} \right) = 0$$

dont l'intégrale générale est de la forme

$$q = A e^{m_1 t} + B e^{m_2 t} \quad (1)$$

A et B étant des constantes d'intégration qu'il faudra déterminer d'après les conditions du problème; m_1 et m_2 les racines de l'équation du second degré obtenue en égalant à zéro le trinôme entre parenthèses soit

$$m_1 = -\frac{r}{2\Omega} + \sqrt{\frac{r^2}{4\Omega^2} - \frac{1}{c\Omega}}, \quad m_2 = -\frac{r}{2\Omega} - \sqrt{\frac{r^2}{4\Omega^2} - \frac{1}{c\Omega}}.$$

En remplaçant et posant $\frac{\Omega}{r} = \tau$, on obtient

$$q = e^{-\frac{t}{2\tau}} \left(A e^{\sqrt{\frac{1}{4\tau^2} - \frac{1}{cr\tau}} \times t} + B e^{-\sqrt{\frac{1}{4\tau^2} - \frac{1}{cr\tau}} \times t} \right) \quad (2)$$

Si les racines du trinôme sont imaginaires, le radical exponentiel peut s'écrire

$$\sqrt{\frac{1}{cr\tau} - \frac{1}{4\tau^2}} \sqrt{-1 \times t} \text{ et (2) devient}$$

$$q = e^{-\frac{t}{2\tau}} \left(C \cos \sqrt{\frac{1}{cr\tau} - \frac{1}{4\tau^2}} \times t + D \sin \sqrt{\frac{1}{cr\tau} - \frac{1}{4\tau^2}} \times t \right) \quad (3)$$

Nous avons dans chaque cas deux constantes d'intégration. Pour les déterminer, nous devrons disposer de deux équations que nous obtiendrons en passant aux limites, tant dans les équations (2) et (3) que dans celle donnant la valeur de l'intensité du courant $i = -\frac{dq}{dt}$ qui en dérive. Les conditions limites sont : pour $t = 0$, $q = q_0$ et $i = 0$.

Introduites dans les équations ci-dessus elles permettent de tirer les valeurs des constantes, lesquelles transportées dans les équations donnant l'intensité fournissent finalement pour le premier cas

$$i = \frac{q_0}{2cr\tau \sqrt{\frac{1}{4\tau^2} - \frac{1}{cr\tau}}} e^{-\frac{t}{2\tau}} \left(e^{\sqrt{\frac{1}{4\tau^2} - \frac{1}{cr\tau}} \times t} - e^{-\sqrt{\frac{1}{4\tau^2} - \frac{1}{cr\tau}} \times t} \right) \quad (4)$$

et dans le second (racines imaginaires)

$$i = \frac{q_0}{cr\tau \sqrt{\frac{1}{cr\tau} - \frac{1}{4\tau^2}}} e^{-\frac{t}{2\tau}} \sin \sqrt{\frac{1}{cr\tau} - \frac{1}{4\tau^2}} \times t \quad (5)$$

Si la quantité sous le radical est positive ou

$$4\tau < cr \text{ ou } r > 2\sqrt{\frac{\Omega}{c}},$$

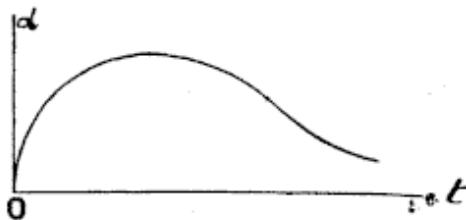


FIG. 201.

c'est l'équation (4) qui est applicable. Elle montre que le courant partant de zéro, croît jusqu'à un maximum (fig. 201) et décroît suivant une courbe plus ou moins étalée.

Si le radical de (4) est imaginaire, c'est-à-dire si

$$4\tau > cr \text{ ou } r < 2\sqrt{\frac{\mathcal{L}}{c}},$$

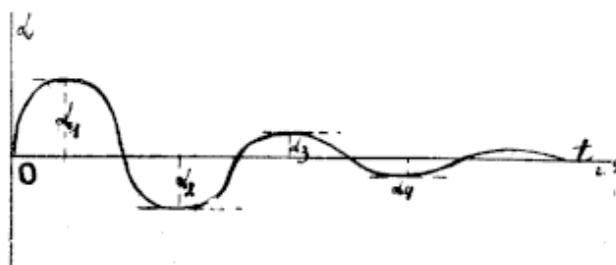


FIG. 202.

le courant est soumis à la loi représentée par l'équation (5) laquelle indique qu'il oscille périodiquement entre des valeurs positives et négatives (fig. 202) dont l'amplitude décroît rapidement.

En outre, le courant oscillant repasse par les mêmes phases (par le zéro par exemple) pour

$$\sqrt{\frac{1}{cr\tau} - \frac{1}{4\tau^2}} \times t = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$$

Par conséquent la durée T de la période est

$$T = \sqrt{\frac{2\pi}{\frac{1}{cr\tau} - \frac{1}{4\tau^2}}} = \sqrt{\frac{2\pi}{\frac{1}{c\mathcal{L}} - \frac{r^2}{4\mathcal{L}^2}}}$$

r pouvant être très petit tandis que \mathcal{L} est très grand on peut, dans le second cas que nous examinons, négliger le second terme du radical et il reste

$$T = 2\pi\sqrt{c\mathcal{L}}$$

ce qui correspond précisément à la condition de résonnance $\omega^2 c \mathcal{L} = 1$ trouvée précédemment dans le cas d'un condensateur et d'une bobine placés en série dans un circuit soumis à une force électromotrice sinusoïdale.

Le phénomène peut être comparé au mouvement d'un liquide dans des vases communicants. Si le liquide est visqueux (résistance grande) la nappe déplacée vient lentement reprendre

son niveau primitif sans le dépasser ; si au contraire la viscosité est très faible (résistance peu élevée) la masse liquide effectue une série d'oscillations avant que l'énergie ait pu être absorbée par les vibrations.

Pour produire une décharge oscillante, on fait croître progressivement la différence de potentiel appliquée aux armatures d'un condensateur réunies d'autre part aux boules écartées d'un excitateur.

L'air compris entre les boules de l'excitateur joue le rôle d'un isolant parfait jusqu'au moment où sa rigidité électrostatique est vaincue. L'étincelle éclate alors et, chauffant fortement l'air sur son trajet le rend conducteur et fraye le passage pour les décharges suivantes.

On constate la nature oscillante de la décharge et l'on peut même mesurer la durée et compter le nombre des oscillations, en examinant l'étincelle au moyen d'un miroir tournant. Avec une bouteille de Leyde, on obtient des oscillations d'une durée comprise entre 10^{-4} et 10^{-5} seconde.

Quant au mécanisme du phénomène, on peut aisément s'en rendre compte. Lorsque le condensateur se décharge sur la bobine, celle-ci emmagasine la majeure partie (si la résistance ohmique du circuit est faible) de l'énergie dépensée, sous forme d'énergie potentielle dans son flux magnétique. Le courant du condensateur disparaissant, le flux magnétique de la bobine s'évanouit à son tour, en donnant un extra-courant de même sens que celui qui vient de passer, lequel recharge le condensateur en sens inverse. Celui-ci se décharge de nouveau et ainsi de suite jusqu'à ce que l'énergie mise en jeu ait été complètement absorbée par effet Joule.

Dans la théorie que nous venons d'exposer, nous n'avons envisagé que l'effet de la résistance ohmique r comme cause d'amortissement des oscillations électriques. Il est évident que n'importe quelle cause, comme les courants de Foucault et l'hystérésis, agissent dans le même sens.

Arc chantant. — L'influence de la périodicité propre d'un circuit peut être mise en évidence en dérivant sur un arc électrique allongé à courant continu produit entre des crayons de charbon homogène, un circuit contenant un condensateur et une bobine

de selfinduction. L'arc rend alors un son musical dont la hauteur correspond à

$$f = \frac{I}{T} = \frac{I}{2\pi\sqrt{c\mathfrak{L}}}$$

En variant les facteurs c et \mathfrak{L} , le son change, de manière qu'il est possible de jouer un air donné à l'aide d'un clavier dont les touches commandent l'insertion de circuits appropriés.

Effet d'une décharge instantanée. Expériences de Lodge.— Les décharges extrêmement rapides donnent lieu à des phénomènes particuliers dus à ce fait que la résistance ohmique du conducteur s'efface alors devant l'énorme impédance que lui confère son coefficient de selfinduction.

Le professeur Lodge a réalisé dans cet ordre d'idées un grand nombre d'expériences extrêmement démonstratives, parmi lesquelles nous citerons les suivantes :

1^o Lorsqu'on décharge une bouteille de Leyde au moyen d'un conducteur, on remarque que l'on peut tirer une étincelle de tout conducteur suffisamment approché de ce dernier. C'est ce que l'on appelle une *décharge latérale*. De là la nécessité depuis longtemps reconnue, de munir l'excitateur servant à provoquer la décharge des bouteilles de Leyde, de longs manches isolants en verre D et E (fig. 25).

2^o En employant pour décharger la bouteille un long fil de cuivre de 7 à 8 millimètres de diamètre faisant le tour de la salle d'expériences et raccordé à des tuyaux de gaz ou d'eau, des décharges latérales se produisent non seulement entre le conducteur en cuivre et des conducteurs isolés ou non que l'on en approche, mais encore entre ceux-ci et les tuyaux de gaz et d'eau raccordés. Les étincelles tirées à l'extrémité d'un bec de gaz permettent d'allumer le gaz qui s'en échappe. En outre, l'induction exercée sur les corps voisins est tellement forte, que l'on peut également en tirer des étincelles, bien qu'ils ne soient pas raccordés au conducteur véhiculant la décharge.

3^o Les armatures intérieures de deux bouteilles de Leyde L₁, L₂, (fig. 203) sont réunies aux deux boules d'un excitateur E en relation avec les pôles d'une machine statique. Les armatures extérieures sont en rapport avec un second excitateur A que l'on met en court-circuit par un fil conducteur F.

On constate que chaque fois qu'une étincelle jaillit en E, une autre éclate également en A dont la longueur, qui peut être beaucoup plus grande que celle en A, dépend des dimensions du fil F.

On s'explique aisément la plus grande longueur de l'étincelle A. Dans le second circuit de décharge L_1 A L_2 , en effet, la fréquence est beaucoup plus grande que dans le premier E. Le circuit L_1 F L_2 étant peu résistant, va être le siège d'une décharge oscillante provoquant la formation d'une série d'étincelles en A. Or ce phénomène se produira pour chacune des ondes de la décharge oscillante en E, de manière que le nombre de décharges se produisant en A se trouve multiplié. Par suite les forces électromotrices d'induction agissant dans le second circuit dérivé sont beaucoup plus élevées que dans le premier.

Application aux parafoudres. — Cette dernière expérience montre que, si la soudaineté de la décharge est suffisante, la résistance d'un intervalle d'air, infinie relativement aux courants continus, devient négligeable vis-à-vis des courants oscillants.

Les décharges atmosphériques étant extrêmement brusques, on constitue en général les parafoudres protégeant les canalisations et les appareils, de deux plaques métalliques séparées par un faible intervalle diélectrique (air, papier, mica) dont l'une est raccordée au conducteur à protéger et l'autre à la terre. La décharge franchit aisément l'intervalle isolant et ainsi l'énorme condensateur formé par les nuages électrisés et le sol peut se décharger directement dans le sol, sans emprunter les canalisations et les appareils où son passage ne se ferait pas sans dégâts.

Expériences de Hertz. — La fréquence obtenue au moyen de la décharge d'une bouteille de Leyde est au plus de 100 000.

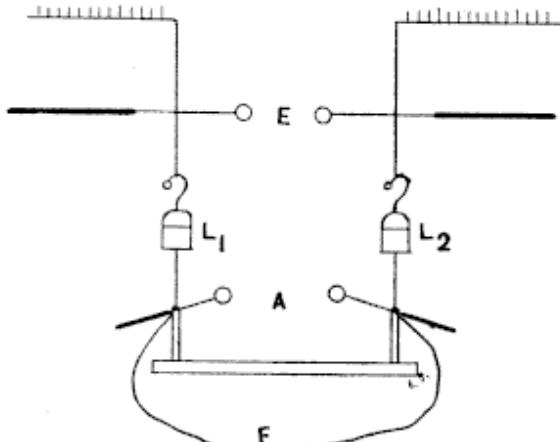


FIG. 203.

Hertz a obtenu des fréquences beaucoup plus considérables, au moyen du dispositif représenté (fig. 204). Deux tiges métalliques placées dans le prolongement l'une de l'autre, terminées à leurs extrémités en regard par de petites boules b_1 , b_2 , et à leurs extrémités opposées par de grosses boules B_1 , B_2 , sont raccor-

— dées aux bornes du circuit secondaire d'une forte bobine de Ruhmkorff R. Les bornes d'une telle bobine sont portées, par suite des phénomènes d'induction auxquels est soumis le circuit qu'elles terminent, à des différences de potentiel extrêmement élevées et à variations excessivement rapides.

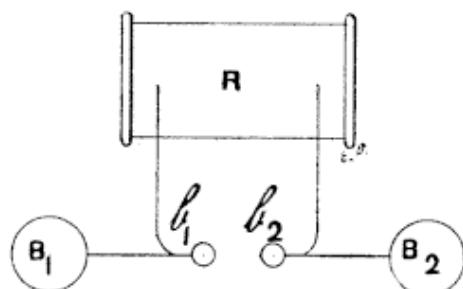


FIG. 204.

L'intervalle entre b_1 et b_2 étant suffisant, lorsque la différence de potentiel atteint la valeur correspondant à la distance explosive, l'étincelle éclate entre les boules b_1 et b_2 , frayant un chemin pour les oscillations et l'excitateur ou *oscillateur* constitué par les boules B_1 , b_1 d'une part, b_2 , B_2 d'autre part, se décharge sur lui-même d'une manière indépendante, comme s'il était isolé de la bobine. La durée des oscillations est, comme nous l'avons vu, réglée par la formule $T = 2\pi\sqrt{c\mathcal{L}}$ et, chaque fois que les boules b_1 et b_2 reviennent à la même différence de potentiel, la même série de phénomènes se reproduit. Le coefficient de selfinduction et la capacité du système utilisé par Hertz étaient tels, que les oscillations possédaient une durée de l'ordre du billionième de seconde.

Pour que la décharge oscillante se produise, certaines conditions physiques doivent en outre être réalisées. Les petites sphères b_1 et b_2 doivent notamment être bien polies; il est nécessaire de les repasser au tour, au moins toutes les demi-heures. On peut s'affranchir de cette sujexion en les plongeant comme l'a fait Righi, dans un vase rempli d'huile lourde de vaseline. On reconnaît que l'appareil fonctionne bien, au claquement particulier qu'il émet.

Lorsque les deux boules b_1 , b_2 , sont portées à des potentiels différents, elles sont réunies, ainsi que nous l'avons vu en électrostatique, par les lignes de force d'un champ électrique dont le nombre va en augmentant avec la différence de potentiel et

dont la direction s'inverse avec cette dernière. La direction moyenne des lignes électriques coïncide avec l'axe même de l'oscillateur. En outre, comme il y a passage d'un courant, des lignes de force magnétiques encerclent celui-ci, constituant un champ magnétique normal en chaque point, au champ électrique.

Comme l'a montré Hertz, les oscillations de ces champs se propagent dans le milieu ambiant. Le savant allemand a utilisé dans ce but un appareil susceptible de vibrer à l'unisson avec le vibrateur électrique et qu'il a appelé pour ce motif *résonnateur électrique*.

Le résonnateur peut affecter une forme quelconque, pourvu que les trois facteurs caractéristiques : résistance, selfinduction et capacité des conducteurs qui le composent satisfassent à la même équation de condition que les facteurs correspondant du vibrateur, ce que l'on vérifie expérimentalement. On s'arrange d'ailleurs pour pouvoir effectuer un certain réglage. Hertz employait comme résonnateur (fig. 205) un fil courbé en cercle, interrompu en un endroit où une vis micrométrique permet de modifier la longueur de l'intervalle d'air.

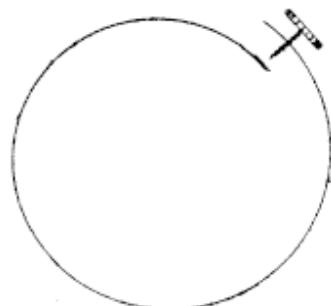


FIG. 205.

En disposant le résonnateur dans le voisinage du vibrateur, on constate qu'un flot d'étincelles jaillit entre ses points d'interruption. La longueur des étincelles diminue quand on s'écarte de l'oscillateur, l'action devenant de plus en plus faible avec la distance.

On remarque que le phénomène *n'est nullement entravé par l'interposition, entre les deux appareils, d'un écran isolant tel qu'une cloison en bois, ou même un mur en maçonnerie*. Mais *l'action cesse lorsque l'écran est en matière conductrice*.

En reportant alors le résonnateur de l'autre côté de l'écran conducteur, entre ce dernier et l'excitateur, on constate que l'étincelle qui d'une façon générale y a également disparu, reparaît en certains points également distants. Ceci prouve que les phénomènes électrostatiques et électromagnétiques concomitants de la décharge, sont susceptibles de se propager sous forme d'ondes aptes à être réfléchies par une paroi conductrice, les ondes réfléchies interférant alors avec les ondes incidentes.

pour donner, absolument comme en acoustique, des ondes stationnaires présentant des nœuds et des ventres de vibration.

Le résonnateur ne décèle rien dans les régions nodales pour, au contraire, émettre des étincelles aux ventres de vibration. La distance entre deux nœuds correspond à une demi-longueur d'ondes.

On peut, avec M. Turpain, ajouter une indication acoustique à l'indication visuelle, en pratiquant une seconde coupure dans le résonnateur et y intercalant un téléphone, celui-ci accusant, par un bruit, les décharges au micromètre.

En utilisant un vibrateur constitué par deux tubes en laiton de 13 cm de longueur et 3 cm de diamètre, terminés à leurs extrémités en regard par des calottes sphériques, Hertz a pu produire des ondes de 30 cm de longueur seulement. De même il a montré, qu'en plaçant l'excitateur au foyer et suivant l'axe d'un miroir parabolique constitué par une feuille de zinc formant une surface cylindrique ayant pour directrice une parabole, les vibrations sont renvoyées dans des directions parallèles et on peut les déceler à plus grande distance qu'auparavant, en les recevant sur un second miroir parabolique semblable, au foyer duquel on place le résonnateur.

Avec son oscillateur à boules plongées dans la vaseline, Righi produisait des ondes de 2, 5 cm de longueur; avec trois petites boules en platine, M. Bose obtint 6 mm; on est arrivé depuis à des longueurs d'onde inférieures à un millimètre.

La longueur d'onde λ est liée à la durée de la vibration T , à la fréquence f et à la vitesse de propagation par la formule

$$\lambda = V T = \frac{V}{f}.$$

En somme les *rayons électriques* jouissent de toutes les propriétés des rayons lumineux : ils se réfléchissent sur les corps métalliques, se réfractent dans les corps isolants, sont polarisables, etc. Ils correspondent donc comme eux, à des vibrations transversales de l'éther. D'ailleurs, leur vitesse de propagation est celle de la lumière, dont ils ne diffèrent que par une fréquence moindre. Alors que les vibrations lumineuses se comptent en effet par centaines de trillions à la seconde, c'est par billions seulement que s'émettent dans le même temps, les radiations électriques.

Relation de Maxwell. — Le résonnateur ne répond donc qu'à des oscillations de même longueur d'onde que celles qu'il exciterait lui-même et cette longueur d'onde est *indépendante du milieu*. La même chose se passe en acoustique pour les tuyaux sonores : un tuyau ouvert aux deux bouts présente des ventres à ses extrémités et un nœud au centre de sa longueur, *quel que soit le milieu* dans lequel il se trouve. Il donnera donc invariablement un son dont la longueur d'onde est double de la sienne, mais la hauteur, c'est-à-dire la fréquence, variera suivant le milieu.

Avec les ondes électriques, si les appareils sont dans l'air

$$\lambda = V T = V 2 \pi \sqrt{c \mathfrak{L}}.$$

Supposons maintenant que le milieu dans lequel se fait la transmission change de nature, la vitesse variera et, la durée des vibrations restant la même, la longueur d'onde devient

$$\lambda' = V' 2 \pi \sqrt{c' \mathfrak{L}}.$$

Or, si le résonnateur se trouve aussi dans le nouveau milieu, l'expérience montre qu'il accuse encore la même longueur d'onde λ que quand tout se passait dans l'air. Comme la capacité du résonnateur a dû nécessairement changer dans ce nouveau milieu et devenir c' on a donc

$$\lambda = V' 2 \pi \sqrt{c' \mathfrak{L}}$$

$$\text{d'où} \quad \frac{V}{V'} = \sqrt{\frac{c'}{c}}.$$

Mais n désignant l'indice de réfraction du milieu par rapport à l'air et K son pouvoir inducteur spécifique

$$\frac{V}{V'} = n \text{ tandis que } \frac{c'}{c} = K.$$

En remplaçant dans la dernière équation on trouve $K = n^2$, c'est-à-dire que *le pouvoir inducteur spécifique d'un diélectrique est égal au carré de son indice de réfraction*. C'est ce que Maxwell avait déduit de la théorie.

Télégraphie sans fil. — M. Branly a découvert que les couches métalliques minces déposées chimiquement sur des plaques isolantes, les grenailles, limailles, poudres de substances conductrices, etc., présentent, sous cette forme, une très médiocre

conductibilité. Souvent leur résistance se chiffre par plusieurs millions d'ohms. Mais, quand des ondes électriques les frappent, leur résistance s'abaisse brusquement et peut tomber à quelques ohms. La conductibilité ainsi acquise se conserve pendant un temps plus ou moins long, suivant la nature et l'état de division de la substance; les trépidations et diverses actions physiques facilitent le retour à la grande résistance primitive; *un choc la rétablit instantanément*.

C'est sur cette propriété qu'est basé le système Marconi primitif de télégraphie sans fil.

CHAPITRE XIV.

Mesures.

Des erreurs et de leur appréciation.

Il importe de pouvoir apprécier l'importance de l'erreur que l'on commet dans une mesure, et de connaître les conditions dans lesquelles elle sera la plus réduite possible.

Comme toutes les mesures se ramènent en général à effectuer la lecture de la position d'un index ou d'une aiguille sur une graduation, il conviendra en tout premier lieu de s'habituer à estimer exactement la plus petite fraction possible des dernières divisions entre lesquelles l'aiguille peut se trouver. Avec un peu d'habitude, on arrive à estimer couramment le dixième de la distance existant entre deux traits séparés par un intervalle d'un millimètre.

Mesures directes. — Les résultats des observations directes peuvent présenter des erreurs dues à la méthode employée, ou aux instruments dont on se sert, ou enfin aux observateurs eux-mêmes. On peut les diviser en deux classes.

ERREURS CONSTANTES OU SYSTEMATIQUES. — Dans une première classe, nous trouvons toutes les erreurs agissant constamment dans le même sens : soit par suite d'un vice de méthode, d'une défectuosité de l'appareil (déplacement du zéro par exemple) ou d'un défaut physique de l'opérateur (trop grande lenteur ou trop grande précipitation dans les manœuvres, etc...). On y remédie en modifiant les méthodes, variant les instruments et changeant d'opérateurs.

ERREURS VARIABLES OU FORTUITES. — Dans la deuxième classe, se rencontrent les erreurs variables ou fortuites qui sont indifféremment positives ou négatives. On les élimine en répétant les mesures et prenant leur moyenne arithmétique. *Pour que le résultat soit exact, il faut évidemment que toutes les observations aient été faites avec le même soin.* Ce résultat sera, éventuellement, corrigé des erreurs systématiques connues.

ERREUR MOYENNE, ERREUR RELATIVE MOYENNE. — On pourra se rendre compte du degré d'exactitude du résultat, en prenant la différence de toutes les lectures avec leur valeur moyenne, ce qui donnera les erreurs partielles des diverses lectures. La moyenne de ces erreurs sera l'*erreur moyenne* et enfin l'*erreur relative moyenne* s'obtiendra par le rapport de l'erreur moyenne à la lecture moyenne elle-même.

Mesures indirectes. — ERREUR ABSOLUE, ERREUR RELATIVE. Lorsqu'on détermine une quantité x , fonction des grandeurs a, b, c, \dots on commet, en mesurant celles-ci, des erreurs fortuites moyennes $\pm \Delta a, \pm \Delta b, \pm \Delta c, \dots$ d'où résulte, sur x , une erreur $\pm \Delta x$.

Au lieu d'obtenir

$$x = f(a, b, c, \dots) \quad (1)$$

On n'a que la valeur approchée

$$x \pm \Delta x = f(a \pm \Delta a, b \pm \Delta b, c \pm \Delta c, \dots) \quad (2)$$

On appelle *erreur absolue* Δx , la quantité positive ou négative dont le résultat calculé diffère du résultat vrai.

Pour une valeur donnée, cette erreur aura d'autant moins d'importance qu'elle sera plus faible vis-à-vis de la grandeur à mesurer. On appelle *erreur relative* le rapport $\frac{\Delta x}{x}$ et l'on voit que c'est à le diminuer le plus possible que devra porter l'effort des opérateurs. Cherchons à l'évaluer. $\Delta a, \Delta b, \Delta c, \dots$ étant supposés assez petits pour qu'on puisse négliger leurs puissances supérieures à la première, le développement de (2) par la formule de Taylor généralisée nous donne

$$x \pm \Delta x = f(a, b, c, \dots) \pm \Delta a f'(a) \pm \Delta b f'(b) \pm \Delta c f'(c) \dots$$

d'où $\Delta x = \pm \Delta a f'(a) \pm \Delta b f'(b) \pm \dots$

L'erreur sera évidemment maximum quand toutes les erreurs partielles s'ajoutent, d'où

$$\Delta x = \Delta a f'(a) + \Delta b f'(b) + \Delta c f'(c) + \dots$$

et enfin pour l'erreur relative maximum

$\frac{\Delta x}{x}$ ou suivant la notation différentielle

$$\frac{dx}{x} = \frac{da f'(a) + db f'(b) + \dots}{f(a, b, c, \dots)} = \varphi(a, b, c, \dots).$$

Cas d'une seule variable. — Puisque la différentielle d'un logarithme népérien est précisément égale au rapport de la différentielle de la variable à la fonction, lorsque le résultat obtenu ne dépend que d'une seule variable, il suffira d'en prendre le logarithme népérien puis de différentier, pour obtenir d'un seul coup l'erreur relative maximum.

EXEMPLE. — Nous avons trouvé que l'intensité fournie par le galvanomètre des tangentes

$$i = k \operatorname{tg} \alpha$$

d'où $\log_e i = \log_e k + \log_e \operatorname{tg} \alpha$

et $\frac{di}{i} = \frac{d \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{d \alpha}{\cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{2 d \alpha}{\sin 2 \alpha} = \varphi(\alpha).$

On obtient le minimum de cette expression, en égalant à zéro la première dérivée et s'assurant que, pour la valeur obtenue, la seconde dérivée est positive. On trouve $\alpha = 45^\circ$.

§ I. — Détermination des unités. Mesures absolues.

Les unités pratiques définies, il s'est agit de les déterminer. L'unité de résistance se prêtant le plus facilement aux mesures, c'est elle qui a d'abord sollicité l'effort des expérimentateurs.

Détermination de l'ohm. — La résistance d'un conducteur dans le système électromagnétique étant une quantité de la même grandeur qu'une vitesse, c'est-à-dire le quotient d'une longueur par un temps, il en résulte que la mesure d'une résistance se réduit, en dernière analyse, à la mesure d'une longueur et d'un temps. Les autres quantités pouvant intervenir ne figureront que sous forme de rapport.

Les formules d'Ohm et de Joule fourniront chacune une méthode de mesure. La dernière n'est toutefois pas recommandable en ce qu'elle fait intervenir l'équivalent mécanique de la chaleur dont la valeur n'est pas connue avec suffisamment de précision.

La loi d'Ohm $r = \frac{e}{i}$ ramène la mesure d'une résistance à

celle d'une force électromotrice et d'une intensité ou d'une quantité d'électricité. Le premier terme ne pourra être évalué directement que s'il s'agit de forces électromotrices d'induction dont le calcul revient à celui d'une surface ou d'un coefficient de selfinduction. On peut d'ailleurs avoir recours, soit à un phénomène instantané, soit à un phénomène continu. Le second terme est fourni directement par un galvanomètre.

Cadre tournant. Méthode de Weber. — Prenons un cadre de n spires présentant une surface $ns = S$, mobile autour d'un axe vertical. Raccordons-le à un galvanomètre balistique des tangentes et soit R la résistance totale du circuit. Nous avons vu précédemment qu'en le faisant tourner brusquement de 180° , il est traversé par une quantité d'électricité

$$q = \frac{2 S \mathcal{H}}{R}.$$

Envoyons cette décharge dans le galvanomètre balistique. Si le mouvement du cadre est suffisamment rapide par rapport à la période d'oscillation de l'aiguille du galvanomètre

$$q = \frac{T_0 \mathcal{H} r}{2 \pi^2 n} \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \text{arc} \operatorname{tg} \frac{\pi}{\lambda}} \quad (1)$$

d'où

$$R = \frac{4 \pi^2 n S}{T_0 r \alpha_1 e^{\frac{\lambda}{\pi} \text{arc} \operatorname{tg} \frac{\pi}{\lambda}}}$$

formule permettant d'évaluer R en unités C. G. S.

Méthode de Lippmann.

— La résistance à mesurer r (fig. 206) est placée en série avec une pile P et une bobine creuse B disposée horizontalement, possédant n_1 spires par centimètre. Un cadre mobile C , de surface S , tourne d'un mouvement uniforme

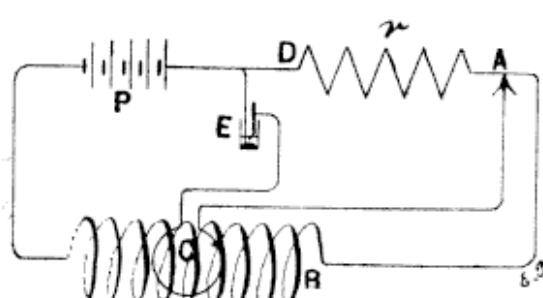


FIG. 206

¹⁾ On trouverait cette formule exactement de la même manière que pour le balistique Dèprez d'Arsonval, r est le rayon moyen d'enroulement des spires.

de période T autour de son diamètre vertical. Son circuit, raccordé aux extrémités de r par l'intermédiaire d'un électromètre capillaire E , n'est fermé qu'au moment où le plan du cadre est parallèle au champ développé, c'est-à-dire au moment où la force électromotrice engendrée est maximum, puisqu'alors le nombre de lignes de force coupé par unité de temps est maximum. On déplace le contact A du circuit dérivé, jusqu'au moment où l'électromètre indique que la force électromotrice d'induction est précisément égale à celle existant aux extrémités A et D , laquelle est $r i$, i étant l'intensité du courant traversant le circuit principal.

La force électromotrice maximum développée dans le cadre est

$$4 \pi n_i i S \frac{2 \pi}{T}.$$

Au moment où l'équilibre est obtenu

$$r = \frac{8 \pi^2 n_i S}{T}.$$

Détermination de l'ampère. — Nous avons vu que le galvanomètre optique, la boussole des tangentes et les électrodynamomètres-balances, permettent d'effectuer des mesures absolues, de sorte qu'il est possible de graduer un galvanomètre ou un électrodynamomètre en dixièmes d'unités C. G. S. électromagnétiques et d'en faire ainsi des ampèremètres. L'ohm et l'ampère étant déterminés, il est aisé de préciser la valeur des autres unités et d'en dériver éventuellement des étalons.

Détermination du nombre v . — Nous avons trouvé précédemment qu'entre les valeurs numériques mesurant une même quantité, soit en unités électrostatiques, soit en unités électromagnétiques, existait la suite des rapports

$$\frac{i_s}{i_m} = \sqrt{\frac{r_m}{r_s}} = \frac{e_m}{e_s} = \frac{q_s}{q_m} = \sqrt{\frac{c_s}{c_m}} = v.$$

Par conséquent on dispose d'autant de méthodes pour déterminer le nombre v , que de quantités peuvent être mesurées à la fois en unités électromagnétiques et électrostatiques.

Les plus simples sont celles dans lesquelles on mesure une quantité ou une force électromotrice.

1^o PAR LA MESURE D'UNE QUANTITÉ. — On charge un condensateur de capacité facilement calculable et l'on mesure, à l'aide de la balance de Coulomb, une fraction connue de cette charge, ce qui permet de déterminer celle-ci en unités électrostatiques. En déchargeant d'autre part la charge totale à travers un galvanomètre balistique, on la mesure en unités électromagnétiques.

2^o PAR LA MESURE D'UNE FORCE ÉLECTROMOTRICE. — Un conducteur étant parcouru par un courant constant on détermine, à l'aide d'un électromètre absolu, c'est-à-dire en unités C. G. S. électrostatiques, la différence de potentiel existant entre deux de ses points. Connaissant d'autre part la résistance r et l'intensité I du courant qui le traverse, le produit rI donne la même quantité en unités C. G. S. électromagnétiques.

§ 2. — Mesures relatives.

Mesure des intensités et des quantités.

Par les effets électromagnétiques ou calorifiques. — L'un quelconque des appareils galvanométriques ou thermiques étudiés précédemment, shunté suivant nécessité et gradué par comparaison avec un appareil absolu, fournira directement la valeur du courant en ampères.

Pour les galvanomètres de grande sensibilité, le tarage peut se faire plus aisément encore. Il suffit d'observer la déviation obtenue en mettant l'appareil en circuit avec une pile étalon et une grande résistance.

Supposons que nous employons un élément Latimer Clark, une résistance de 100 000 ohms, et que le galvanomètre shunté au $\frac{1}{100}$ ^e donne une déviation de 37°. Les résistances de l'élément et du galvanomètre shunté au $\frac{1}{100}$ ^e pouvant généralement être négligées en présence des 100 000 ohms, l'intensité totale traversant le circuit

$$I = \frac{1,434}{100 \ 000} = 1,404 \times 10^{-5}.$$

D'autre part l'intensité passant dans l'enroulement du galvanomètre et provoquant la déviation α a pour valeur

$$i = \frac{I}{100} \text{ I} = \frac{\alpha}{k} \text{ d'où } k = \frac{100 \alpha}{I}.$$

Remplaçant I et α par leur valeur il vient

$$k = \frac{3700}{1,434 \cdot 10^{-5}} = \frac{37}{1,437} \cdot 10^7 = 25,8 \cdot 10^7$$

c'est-à-dire que pour un ampère la déviation est de $25,8 \cdot 10^7$ degrés ou par microampère de 258 degrés.

S'il s'agit de courants alternatifs, on utilise exclusivement les appareils dont la déviation est proportionnelle au carré de l'intensité : électrodynamomètres ou galvanomètres thermiques, tarés au moyen de courant continu.

Une quantité d'électricité se mesure en l'envoyant sous forme de décharge instantanée dans un galvanomètre balistique et appliquant la formule indiquée précédemment. On shunte suivant nécessité.

Par les effets chimiques. — La loi de Faraday nous a montré la proportionnalité des ions déposés sur les électrodes d'une cuve électrolytique aux quantités d'électricité ayant passé. La masse déposée de poids

$$p = z i t \text{ d'où } i = \frac{p}{z t},$$

z étant l'équivalent électrochimique du ion déposé, en pratique un ion métal.

Dès lors, mettant en circuit un voltamètre, une source constante d'électricité et le galvanomètre à tarer, il suffira de noter la déviation permanente indiquée, le temps pendant lequel le courant a passé et de diviser le poids déposé par le produit $z t$, pour connaître l'intensité.

Certaines précautions sont à prendre : la cathode doit avoir été préalablement convenablement nettoyée afin que le dépôt soit adhérent; la solution électrolytique possédera une densité convenable; enfin, l'intensité du courant n'excédera pas un certain rapport avec la surface des électrodes, en d'autres termes on ne doit pas dépasser une certaine densité de courant qui s'exprime généralement en ampères par décimètre carré de surface cathodique active.

a) COURANTS FAIBLES (1 AMPÈRE ET MOINS). — On utilise de préférence un voltamètre à argent. La cathode présente la forme d'une coupe en platine d'au moins 10 cm de diamètre et de 4 à 5 cm de profondeur. L'anode est une plaque d'argent pur de 30 cm² environ et de 0,2 à 0,3 cm d'épaisseur, placée horizontalement dans la partie supérieure de la solution, soutenue par un fil de platine passant à travers des trous pratiqués dans des angles opposés de la plaque, enveloppée de papier filtre pur maintenu au dos au moyen de cire à cacheter, afin d'empêcher des débris de l'anode de tomber sur la cathode.

Le liquide est une solution neutre de nitrate d'argent pur contenant environ 15 parties en poids de sel, pour 85 parties d'eau. La résistance du voltamètre variant légèrement par suite du passage du courant, on insère en série avec lui une résistance additionnelle réglable. La résistance métallique totale du circuit ne doit pas excéder 10 ohms.

La plaque anodique d'argent peut être remplacée par une baguette d'argent enveloppée d'un tissu de coton sous laquelle est disposée une coupe en verre pourvue d'expansions en verre également, lesquelles permettent de l'attacher à la coupe en platine.

Pour effectuer une mesure, on lave le vase en platine à l'acide nitrique et à l'eau distillée, on le sèche à l'étuve, on le laisse refroidir dans un dessiccateur, et le pèse. On le remplit à peu près complètement de la solution et le place sur un support propre en cuivre *isolé*, pourvu d'une borne de connexion. On immerge alors l'anode dans la solution en assurant l'invariabilité de sa position et la raccorde au reste du circuit lequel est pourvu d'un interrupteur. Le moment de l'envoi du courant étant noté, on le laisse passer pendant au moins une demi-heure ce qui, pour un courant d'un ampère, correspond à un dépôt de 2 grammes environ; on note l'instant de la rupture du courant.

Le dépôt est alors lavé à l'eau distillée, et on le laisse dessécher pendant au moins 6 heures. On le lave ensuite à l'eau distillée puis à l'alcool absolu, et le sèche à l'étuve à une température d'environ 160°. On le laisse refroidir au dessiccateur, puis le pèse, d'où par différence le poids d'argent déposé.

On obtiendra le courant moyen en ampères, en divisant ce poids exprimé en grammes par le nombre de secondes pendant lequel le courant a passé et par 0,001 118.

b) COURANTS INTENSES. — Pour des courants plus intenses ou des mesures moins précises, on employera le voltamètre à *sulfate de cuivre*. Il se compose (fig. 207) d'une auge parallélipipédique en verre mesurant ordinairement 15 cm de haut, 10 cm de long et 6 cm de large. Sur les bords des petits côtés reposent deux pièces en bois présentant trois entailles parallèles aux grands côtés, dans lesquelles on suspend à l'aide d'expansions horizontales laissées au découpage, trois électrodes en cuivre parallèles. Les feuilles extrêmes, qui jouent le rôle d'anode sont épaisses, tandis que la cathode placée entre elles est mince.

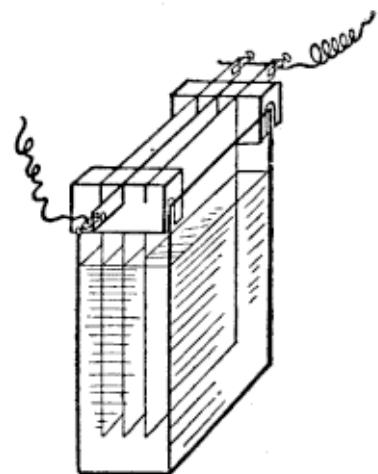


FIG. 207.

M. Oettel recommande la solution suivante ⁽¹⁾.

Cu So ⁴ cristallisé.	15 g
H ² So ⁴ de densité 1,84	2 cm ³
Alcool.	5 g
Eau	100 g

D'après lui ce voltamètre donne des résultats suffisamment exacts pour les recherches industrielles, tant que l'on ne dépasse pas les densités de 0,06 et 1,5 A par dm².

Mesure des résistances.

Pont de Wheastone. — Considérons un réseau constitué par deux conducteurs de résistances r_1 , r_2 , (fig. 208) dérivés sur un générateur d'électricité, lequel porte les points de bifurcation aux potentiels V_1 et V_2 , en émettant un courant I se subdivisant en i_1 et i_2 . Puisque le potentiel décroît régulièrement dans les conducteurs dérivés de la valeur V_1 à V_2 , nous y rencontrerons des séries de potentiels égaux. Cherchons la condition à remplir pour que le potentiel soit le même de part et d'autre.

⁽¹⁾ RICHARD LORENZ. *Traité pratique d'électrochimie*, p. 28. Gauthier-Villars, Paris, 1905.

Soit a une résistance prise dans le conducteur r_1 à partir de V_1 . La chute de potentiel depuis V_1 sera

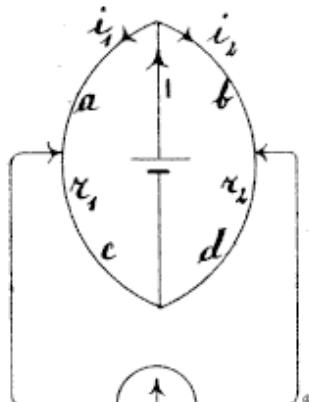


FIG. 208.

$$a i_1 = \frac{a I r_2}{r_1 + r_2}.$$

Le point au même potentiel sur le second conducteur sera évidemment obtenu quand la chute y sera la même que de V_1 à l'extrémité de a . Or au bout d'une résistance b prise à partir de V_1 elle vaut

$$b i_2 = \frac{b I r_1}{r_1 + r_2}.$$

Pour que les potentiels soient les mêmes, il faut que

$$\frac{a I r_2}{r_1 + r_2} = \frac{b I r_1}{r_1 + r_2} \text{ ou } \frac{a}{b} = \frac{r_1}{r_2} \quad (1)$$

D'autre part, puisqu'en suivant les deux dérivation vers V_2 on aboutit à un point de même potentiel V_2 , les chutes de potentiel dans le restant des deux conducteurs r_1 et r_2 doivent nécessairement être aussi égales, ce qui donne, en appelant c et d les deux résistances $r_1 - a$ et $r_2 - b$:

$$c r_2 = d r_1 \text{ ou } \frac{c}{d} = \frac{r_1}{r_2} \quad (2)$$

Pour satisfaire au cas des circuits quelconques, dans lequel les résistances r_1 et r_2 sont quelconques, éliminons ces deux quantités. L'équation générale à remplir sera donc

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad (3)$$

C'est le principe du pont de Wheatstone. L'égalité des potentiels est atteinte quand le galvanomètre, inséré en *pont* entre les deux conducteurs dérivés, reste au zéro.

Pour transformer le dispositif ci-dessus en une installation permettant la mesure des résistances, il suffit de remplacer le tronçon d par la résistance à mesurer et de pouvoir modifier à volonté la résistance c dite de *comparaison*, de manière à satisfaire à l'équation (3). On a alors

$$x = \frac{b}{a} c \quad (4)$$

En outre, on voit que suivant que le rapport $\frac{b}{a}$ est $>$ 1 la résistance mesurée sera $<$ c . Pour ce motif, les branches a et b portent le nom de *branches de proportion*. On les compose souvent de 3 bobines mesurant respectivement 10, 100, 1000 ohms, de manière à pouvoir multiplier la résistance de comparaison c par 1, 10, 100, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$ et étendre ainsi considérablement le champ des mesures.

Si $x > 10\,000$ ohms, on donne à $\frac{b}{a}$ la valeur 10 ou 100
si $x < 1$ ohm, $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{100}$.

Enfin, si aucune combinaison de résistance ne permet de ramener l'aiguille du galvanomètre au zéro et que pour une résistance c , le galvanomètre accuse une déviation α dans un sens et pour $c + 1$ une déviation α' dans l'autre sens, puisque 1 ohm en plus correspond à $\alpha + \alpha'$, une déviation de 1° correspondra à

$$\frac{1}{\alpha + \alpha'} \text{ ohm et } \alpha^\circ \text{ à } \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'} \text{ ohm.}$$

La résistance exacte sera par conséquent

$$\frac{b}{a} \left(c + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'} \right).$$

En pratique l'appareil revêt généralement la disposition indiquée (fig. 209). L'interrupteur N_1 permet de n'admettre le courant dans les circuits qu'au moment d'opérer, tandis que la fermeture de N_2 insère le galvanomètre dans le pont après chaque réglage.

On établit également la branche de comparaison c sous forme de résistance en décades, ainsi que le montre la vue 210.

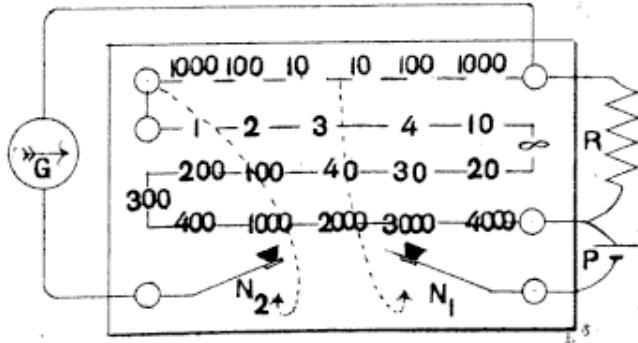


FIG. 209.



FIG. 210.

sont les *diagonales*.

L'équation $d = \frac{b}{a} c$ montre que les résistances des branches conjugées b et c , a et d ne peuvent être simultanément plus grandes ou plus petites. Donc les résistances les plus grandes et les plus faibles sont adjacentes.

L'inspection de la figure 208 montre que les petites résistances adjacentes shunteront soit la pile, soit le galvanomètre. Le résultat le meilleur sera évidemment obtenu quand les résistances les plus faibles seront dérivées sur l'appareil possédant la plus faible résistance. Comme celle du galvanomètre l'emporte généralement sur celle de la pile, c'est cette dernière qu'il sera préférable de shunter par les résistances faibles.

Pour apprécier le degré de précision auquel on peut atteindre, établissons la formule donnant l'intensité dans la diagonale du galvanomètre en fonction des facteurs électriques des diverses branches du pont.

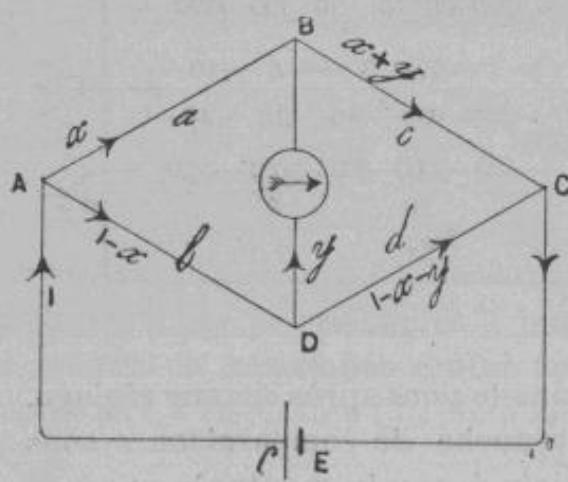


FIG. 211.

La figure schématique du pont de Wheatstone lui a fait aussi donner le nom de *parallélogramme de Wheatstone*. Les côtés opposés du parallélogramme s'appellent *côtés conjugués*, tandis que les branches contenant la pile et le galvanomètre

THÉORIE GÉNÉRALE. — Appelons I (fig. 211) le courant débité par la pile de force électromotrice E , de résistance intérieure r . Ce courant se subdivise en x et $I - x$. y étant le courant dans la branche galvanométrique, nous aurons avec la direction indiquée $x + y$ dans c et $I - x - y$ dans d .

Ayant tenu compte dans la répartition des courants de la première loi de Kirchhoff, il ne nous reste plus qu'à appliquer la seconde pour déterminer les 3 intensités inconnues I , x et y .

Nous aurons :

$$\begin{aligned} ax - gy - b(I - x) &= 0 \\ gy + c(x + y) - d(I - x - y) &= 0 \\ ax + c(x + y) + \rho I &= E \end{aligned}$$

Écrivons ces équations sous forme symétrique

$$\begin{aligned} (a + b)x - gy - bI &= 0 \\ (c + d)x + (c + d + g)y - dI &= 0 \\ (a + c)x + cy + \rho I &= E \end{aligned}$$

C'est l'intensité dans la diagonale du galvanomètre qui nous intéresse. Elle a pour valeur

$$y = \frac{\begin{vmatrix} a+b & 0 & -b \\ c+d & 0 & -d \\ a+c & E & \rho \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a+b & -g & -b \\ c+d & c+d+g & -d \\ a+c & c & \rho \end{vmatrix}} = \quad (4)$$

$$\frac{E(ad - bc)}{abc + abd + acd + bcd + (a + b + c + d) \left(\rho g + \frac{\rho(a+b)(c+d)}{a+b+c+d} + \frac{g(a+c)(b+d)}{a+b+c+d} \right)}$$

Mais $\frac{(a+b)(c+d)}{a+b+c+d}$

est la résistance combinée de $a + b$ et $c + d$ par rapport au galvanomètre. Posons-la égale à g' . De même

$$\frac{(a+c)(b+d)}{a+b+c+d}$$

est la résistance combinée de $a + c$ et $b + d$ par rapport à la pile. Appelons-la ρ' .

Remplaçant dans (1)

$$y = \frac{E(ad - bc)}{abc + abd + acd + bcd + (a + b + c + d)(\rho g + \rho g' + \rho' g)} \quad (5)$$

L'équation (4) peut encore s'écrire

$$y = \frac{E(ad - bc)}{(a + b + c + d)(\rho + \rho')(g + g') - \frac{(ad - bc)^2}{a + b + c + d}} \quad (6)$$

Avant d'aller plus loin, remarquons que ces expressions contiennent au numérateur la quantité $ad - bc$. Le courant sera nul dans le galvanomètre, quand $ad - bc = 0$ ou $ad = bc$. C'est la relation trouvée plus haut.

Pour déterminer quelle est l'approximation obtenue, supposons que l'équation $d = \frac{bc}{a}$ ne soit pas rigoureusement satisfait et que l'on ait

$$d = \frac{bc}{a} (1 + \delta) \text{ d'où } ad - bc = bc\delta.$$

Nous allons chercher jusqu'où pourra s'élever la valeur de δ avant que le galvanomètre n'accuse le déréglage. Sous l'influence de celui-ci, la branche galvanométrique est traversée par un courant

$$\Delta y = \frac{E b c \delta}{(a + b + c + d)(\rho + \rho')(g + g')} - \frac{b^2 c^2 \delta^2}{a + b + c + d}$$

δ étant faible le second terme du dénominateur peut être négligé et il reste

$$\Delta y = \frac{E b c \delta}{(a + b + c + d)(\rho + \rho')(g + g')} = \frac{E \delta}{\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d}\right)(\rho + \rho')(g + g')}$$

Mais

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d}$$

représente la résistance combinée des quatre résistances a, b, c, d , placées en dérivation. Appelons-la r il vient

$$\Delta y = \frac{E r \delta}{(\rho + \rho')(g + g')} \quad (7)$$

Si Δy est le courant le plus faible produisant une déviation sensible dans le galvanomètre utilisé, la valeur de δ tirée de (7) donnera l'erreur relative que l'on pourra commettre en prenant pour d la valeur $\frac{bc}{a}$ et permettra d'apprécier le degré de sensibilité obtenu.

Le galvanomètre et la pile pouvant être permутés, cherchons quelle est la disposition donnant la sensibilité maximum.

Avec le schéma de la figure 211 nous avons trouvé pour l'intensité du courant traversant le galvanomètre en posant

$$abc + abd + acd + bcd = m \text{ et } a + b + c + d = n$$

$$y = \frac{E (ad - bc)}{m + n (\rho g + \rho' g' + g' g)}$$

Permutons maintenant la position de la pile et du galvanomètre ; g' se transforme ρ' et vice-versa. Le courant sera devenu

$$y' = \frac{E (ad - bc)}{m + n (\rho g + \rho' g' + g' g)}$$

et le premier montage sera plus avantageux

si $y > y'$ ou si $\rho g + \rho' g' + g' g < \rho g + \rho' g' + g' g$

ou si $\rho (\rho' - g') + g (g' - \rho') > 0$

ou $(\rho - g) (\rho' - g') > 0$.

Il y aura donc lieu de préférer la disposition de la figure 211 si $\rho - g$ et $\rho' - g'$ sont de mêmes signes, c'est-à-dire si ρ étant $< g$ (cas général) ρ' est aussi $< g'$. En d'autres termes, pour se mettre dans les conditions les plus favorables, il faut relier le galvanomètre et la pile de manière que la plus petite des résistances ρ et g soit connectée avec la plus petite des deux résistances ρ' et g' .

Nous retombons ainsi sur la condition indiquée précédemment.

Enfin, si l'on cherche quelles relations de grandeur doivent présenter les diverses branches du pont, on trouve que le maximum de sensibilité est atteint quand $a = b = c = d = \rho = g$ conditions en général irréalisables, ρ et g étant donnés.

PONT A FIL DIVISÉ. — Les branches a et b peuvent être constituées (fig. 212) par un fil homogène pourvu d'une graduation exprimant le rapport $\frac{b}{a}$. Un curseur relié au galvanomètre, glisse sur ce fil et porte un index marquant sur la graduation le coefficient par lequel la résistance de comparaison doit être multipliée.

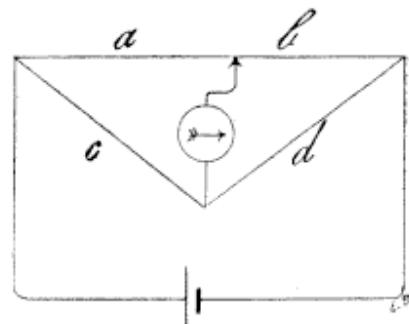


FIG. 212.

Mesure de la résistance d'un galvanomètre. — 1^o MÉTHODE DE KELVIN. Le galvanomètre de résistance à mesurer g prend la place de la résistance inconnue, tandis que sa diagonale ne comporte que l'interrupteur ordinaire N_2 (fig. 213).

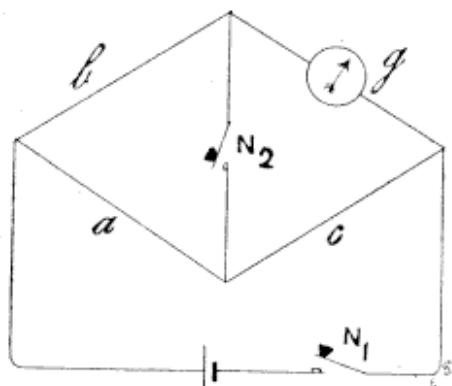


FIG. 213.

que l'on provoque ne modifie en rien le régime du courant dans les branches a, b, c, g .

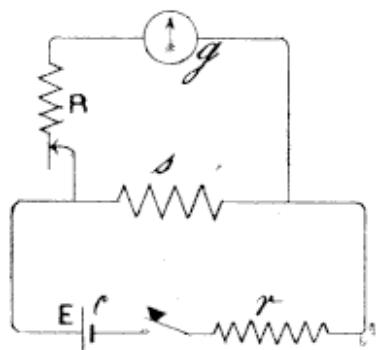


FIG. 214.

2^o MESURE DE LA DÉVIATION RÉDUITE.

— Le galvanomètre dont il faut mesurer la résistance g est mis en série (fig. 214) avec une boîte de résistance R et inséré, par l'intermédiaire d'un shunt de résistance s dans un circuit contenant une pile de force électromotrice E et de résistance intérieure r , un interrupteur et une résistance r .

Quand on ferme l'interrupteur, le courant traversant le circuit principal a pour valeur

$$I = \frac{E}{r + R + \frac{s(R + g)}{s + R + g}} = \frac{E}{r + R + s}$$

s étant généralement négligeable devant $R + g$.

Le courant traversant le galvanomètre provoque une déviation α telle que

$$i = \frac{\alpha}{k} = I \frac{s}{R + g} = \frac{E}{r + R + s} \cdot \frac{s}{R + g}.$$

Si nous ouvrons maintenant en série avec le galvanomètre une autre résistance R' , l'intensité et la déviation se modifieront de manière que

$$i = \frac{x}{k} = I \frac{s}{R' + g} = \frac{E}{\rho + r + s} \cdot \frac{s}{R' + g},$$

d'où

$$\frac{x}{x'} = \frac{R' + g}{R + g} \text{ et } g = \frac{x' R' - x R}{x - x'}.$$

Si la résistance R' débouchée est telle que $x' = \frac{x}{2}$ il vient

$$g = R' - 2 R,$$

la méthode porte alors le nom de *méthode de demi-déviation*.

Enfin, si la première lecture s'est faite sans intercalation de résistance,

$$R = 0 \text{ et } g = R'.$$

Mesure de la résistance d'un voltmètre. — Un voltmètre n'étant rien autre qu'un galvanomètre de grande résistance, les méthodes précédentes lui sont applicables.

Toutefois, pour mettre à contribution la seconde méthode, il faudra disposer d'une source pouvant entretenir une différence de potentiel constante et élevée, puisqu'on ne peut simplifier par E que si la différence de potentiel garde la même valeur dans les deux cas.

Entre les bornes de la source dont on dispose (source constante) dérivons d'abord le voltmètre de résistance cherchée G . Son aiguille dévierait de x^o sous l'effet d'un courant

$$i = \frac{E}{G} = \frac{x}{k}$$

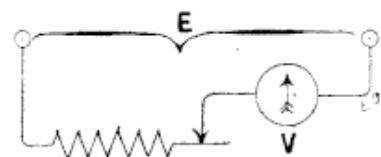


FIG. 215.

Plaçons maintenant en série avec lui une résistance R (fig. 215) nous aurons

$$i' = \frac{E}{G + R} = \frac{x'}{k}$$

d'où en divisant membres à membres

$$G = R \frac{x'}{x - x'}.$$

En particulier si l'on règle R de manière que $x' = \frac{x}{2}$, on retombe sur la méthode de la demi-déviation avec résistance primitive nulle et

$$G = R.$$

Emploi du galvanomètre différentiel. — 1^o LA RÉSISTANCE

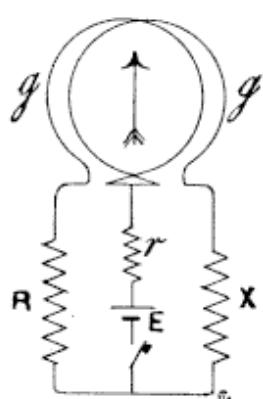


FIG. 216.

A MESURER EST PLUS GRANDE QUE CELLE DES ENROULEMENTS. On constitue un circuit comprenant les deux enroulements g (fig. 216) une boîte de résistance de comparaison R , la résistance à mesurer X , circuit sur lequel on établit en dérivation une pile E de résistance ρ en un rhéostat réglable r .

Le courant passant dans l'enroulement de droite a pour valeur

$$i = \frac{E}{\rho + r + g + X};$$

celui passant dans l'enroulement de gauche

$$i' = \frac{E}{\rho + r + g + R}.$$

Quand l'aiguille ne dévie plus les deux courants sont égaux d'où $R = X$.

Si l'on n'obtient pas un équilibre parfait et que la résistance R donne une déviation α dans un sens tandis que $R+i$ provoque une déviation α' en sens contraire, la résistance exacte est

$$R + \frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}.$$

Lorsque le galvanomètre est très sensible, on évite les déplacements brusques de l'aiguille au début des opérations en réduisant le courant principal par l'augmentation de r et, s'il y a lieu, en réduisant la force électromotrice appliquée par la mise en dérivation d'un rhéostat sur la pile. C'est seulement quand l'équilibre est à peu près obtenu, que l'on peut appliquer la force électromotrice totale.

2^o LES RÉSISTANCES A COMPARER SONT BEAUCOUP PLUS FAIBLES QUE CELLES DES ENROULEMENTS DU GALVANOMÈTRE. — Si l'on employait la disposition précédente, les résistances de contact aux points de raccordement des résistances comparées s'ajoutant à celles-ci pourraient fausser les résultats. Il est alors préférable de monter R et X en shunts sur les enroulements comme la figure 217 l'indique.

Appelons I le courant total émanant de E , g_R les résistances de contact en série avec le premier enroulement g , g_X avec le second enroulement.

Les courants traversant les enroulements g seront :

$$i = \frac{IR}{R + g + g_R};$$

$$i' = \frac{IX}{X + g + g_X}.$$

Quand l'aiguille sera au zéro

$$\frac{R}{R + g + g_R} = \frac{X}{X + g + g_X}$$

$$\text{d'où } R(g + g_X) = X(g + g_R).$$

Les résistances g_R et g_X , d'ailleurs faibles, s'ajoutent aux résistances égales, relativement grandes g , de sorte que $R = X$.

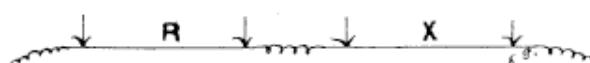


FIG. 218.

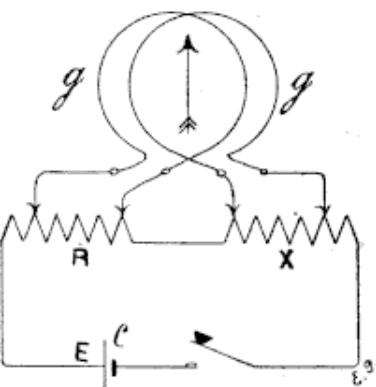


FIG. 217.

Pour qu'il en soit bien ainsi, il faut que les dérivations vers le galvanomètre soient prises sur R et sur X entre leurs points de raccordement au circuit (fig. 218).

3° LES RÉSISTANCES A COMPARER SONT TRÈS DIFFÉRENTES. — On constituera deux circuits distincts (fig. 219) dont l'un contenant la grande résistance cherchée X sera alimenté par une force électromotrice relativement grande nE , (n éléments de pile) dont l'autre, contenant la résistance faible connue r , sera alimenté par une force électromotrice faible E (un seul élément de pile). On munira en outre d'un shunt s de pouvoir multiplicateur $m = \frac{g + s}{s}$ l'enroulement de ce circuit.

L'aiguille étant au zéro

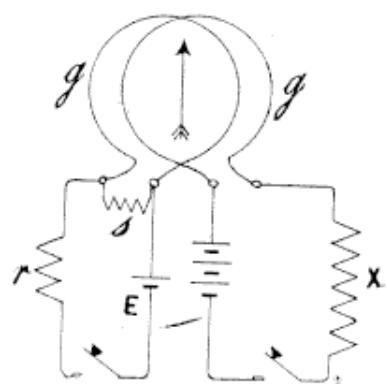


FIG. 219.

$$\frac{nE}{n\rho + g + X} = \frac{I}{m} \frac{E}{\rho + \frac{g}{m} + r}$$

d'où $m n r = X$, si $g + n\rho$ d'une part, $\rho + \frac{g}{m}$ d'autre part, sont respectivement négligeables vis-à-vis de X et de r .

4° EMPLOI D'UN GALVANOMÈTRE NON EXACTEMENT DIFFÉRENTIEL. — Enfin, si le galvanomètre n'est pas exactement différentiel, on pourra agir comme dans la double pesée, en substituant dans les cas examinés ci-dessus à la résistance X une résistance connue qui, ramenant aussi l'équilibre, lui est par conséquent égale.

Mesure des faibles résistances. — A. LA RÉSISTANCE DE COMPARAISON ET LA RÉSISTANCE À MESURER NE DIFFÈRENT PAS NOTABLEMENT. — On monte en série une source de force électromotrice E constante, capable de débiter un courant d'environ un ampère (un élément d'accumulateur par exemple) un rhéostat réglable R' , une résistance étalonnée r , d'habitude un ohm (fig. 220).

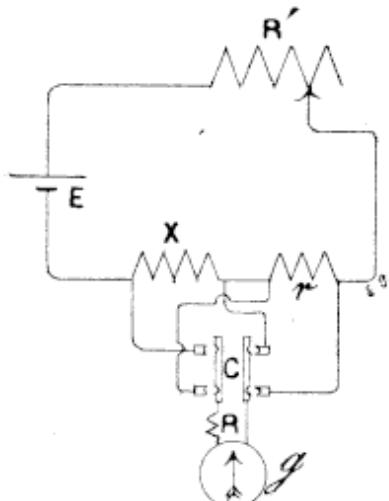


FIG. 220.

motrice E constante, capable de débiter un courant d'environ un ampère (un élément d'accumulateur par exemple) un rhéostat réglable R' , une résistance étalonnée r , d'habitude un ohm (fig. 220).

I étant le courant qui parcourt le circuit, les différences de potentiel existant aux extrémités de r et X sont respectivement $I r$ et $I X$. Si nous parvenons à les mesurer, X sera déterminé en fonction de r . A l'aide d'un commutateur à deux directions, on

peut dériver à volonté sur r ou sur X un circuit comprenant un galvanomètre g de constante k , de résistance g , et une résistance R . On donne à R une valeur telle que l'on obtienne une grande déviation, de manière à diminuer le plus possible l'erreur relative faite sur la lecture. La résistance r étant faible, sera négligeable devant $R + g$; en outre, le courant dérivé dans le galvanomètre, sera négligeable vis-à-vis de I . De la sorte la différence de potentiel aux extrémités de r ne varie pas sensiblement, du fait de l'introduction du galvanomètre. On a en effet

$$i = I \frac{r}{r + R + g} = \frac{x}{k}$$

Si $r = 1$, $R = 50$ et $g = 250$ ohms, $i = \frac{I}{301}$ et l'on peut considérer I comme constant et négliger r .

En dérivant le circuit galvanométrique sur X on a de même, R' étant la résistance débouchée pour obtenir une bonne déviation

$$i' = I \frac{X}{X + R' + g} = \frac{x'}{k}$$

d'où

$$\frac{X(r + R + g)}{r(X + R' + g)} = \frac{x'}{x}.$$

Mais r et X étant négligeables devant $R + g$ et $R' + g$ il vient

$$\frac{X(R + g)}{r(R' + g)} = \frac{x'}{x} \text{ d'où enfin } X = \frac{x'}{x} \cdot \frac{R' + g}{R + g} \cdot r.$$

Si X est voisin de r on pourra faire $R' = R$ et

$$X = \frac{x'}{x} \cdot r.$$

B. LA RÉSISTANCE À MESURER EST BEAUCOUP PLUS FAIBLE QUE CELLE DE COMPARAISON. MÉTHODE DE M. ROUSSEAU. — Le dispositif précédent, s'applique sans difficulté quand X et r ne diffèrent pas notablement l'une de l'autre. Mais, si la résistance à mesurer X , est beaucoup plus faible que la résistance étalon dont on dispose, pour obtenir une déviation suffisante quand on dérive le galvanomètre sur X il faudra faire traverser cette dernière par un courant très intense et la différence de voltage existant alors aux bornes de la résistance tarée sera trop forte. Par la méthode de M. Rousseau, la comparaison peut s'effectuer sans difficulté, même quand la résistance à mesurer est plusieurs centaines de fois plus faible que celle de l'étalon.

A cet effet la résistance de comparaison r beaucoup plus forte que X est shuntée par une résistance R et le shunt s du galvanomètre (fig. 221).

Appelons encore I l'intensité du courant dans le circuit principal, I' et i' celles traversant R et le galvanomètre.

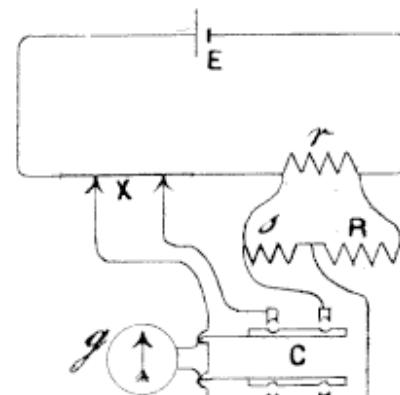


FIG. 221.

$$i' = I' \frac{s}{s+g} = I \frac{r}{r + \frac{sg}{s+g} + R} \cdot \frac{s}{s+g} = \frac{Ir s}{(r+s+R)g} = \frac{x'}{k}.$$

Dérivé sur la résistance X le galvanomètre est traversé par un courant

$$i = I \frac{X}{g+X} = I \frac{X}{g} = \frac{x}{k}$$

$$\text{D'où } \frac{X(r+s+R)}{rs} = \frac{x}{x'} \text{ et } X = \frac{x}{x'} \cdot \frac{rs}{r+s+R}.$$

L'effet Joule développé dans r acquérant, en raison de la grande intensité du courant, une valeur assez élevée, il convient de donner à cette résistance une section suffisante pour qu'elle ne s'échauffe pas sensiblement, ce qui modifierait sa valeur au cours de la mesure.

Mesures des grandes résistances. (Résistances d'isolement). — 1^o MÉTHODE DE COMPARAISON. On établit un circuit comprenant (fig. 222) un galvanomètre sensible de résistance g shunté par une résistance s , une pile de n éléments de force électromotrice E, résistance intérieure ρ , un interrupteur et une résistance étalonnée R , généralement de un mégohm.

On a

$$i = \frac{x}{k} = \frac{nE}{n\rho + \frac{sg}{s+g} + R} \cdot \frac{s}{s+g} = \frac{nE}{n\rho + \frac{g}{m} + R} \cdot \frac{1}{m}$$

en posant comme d'habitude $\frac{s+g}{s} = m$.

On remplace alors la résistance R par la résistance à mesurer X , on porte le nombre d'éléments de la pile à n' et l'on adapte au galvanomètre un shunt s' , de manière à obtenir une bonne déviation x' . Le galvanomètre est alors traversé par un courant

$$i' = \frac{x'}{k} = \frac{n'E}{n'\rho + \frac{s'g}{s'+g} + X} \cdot \frac{s'}{s'+g} = \frac{n'E}{n'\rho + \frac{g}{m'} + X} \cdot \frac{1}{m'}$$

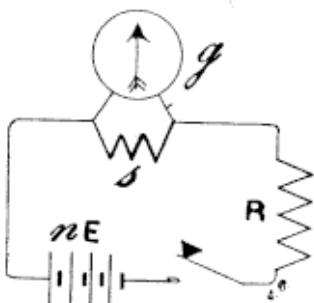


FIG. 222.

Divisant membres à membres

$$\frac{z}{z'} = \frac{n E}{n \varphi + \frac{g}{m} + R} \cdot \frac{1}{m} \cdot \frac{n' \varphi + \frac{g}{m'} + X}{n' E} \cdot m'$$

Généralement $n \varphi + \frac{g}{m}$, $n' \varphi + \frac{g}{m'}$ sont respectivement négligeables devant R et X, de sorte que

$$\frac{z}{z'} = \frac{n}{R} \cdot \frac{1}{m} \cdot \frac{X}{n'} \cdot m'$$

d'où enfin

$$X = R \frac{m}{m'} \cdot \frac{n'}{n} \cdot \frac{z}{z'}.$$

2^o EMPLOI DU VOLTMÈTRE. — Soit une canalisation (fig. 223) dont les fils sont maintenus sous la différence de potentiel constante E; le fil négatif présente un défaut d'isolation relativement à la terre T. C'est la résistance X de ce défaut, soit localisée en un point, soit généralisée tout le long du fil, qu'il s'agit de mesurer.

On connecte en premier lieu directement le voltmètre entre les fils de la canalisation. Sa résistance étant R, il fournira une déviation z sous l'effet du courant $i = \frac{E}{R}$ qui le traverse.

On a donc

$$i = \frac{E}{R} = \frac{z}{k}.$$

Laissant le voltmètre connecté au fil positif, on met son autre borne sur terre (fig. 223) c'est-à-dire qu'on la réunit à une canalisation d'eau ou de gaz, ou encore à une plaque conductrice enfoncee dans le sol humide, par exemple une plaque de zinc de 50 × 50 cm. Cette fois le courant qui le traverse doit également emprunter la résistance cherchée X, de sorte que l'on a

$$i' = \frac{E}{R + X} = \frac{z'}{k}.$$

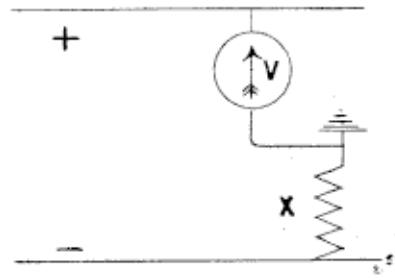


FIG. 223.

Divisant membres à membres

$$\frac{R + X}{R} = \frac{x}{x'} \text{ d'où } X = \frac{R(x - x')}{x'}.$$

Cette méthode est en général peu sensible, mais elle est pratique, parce qu'elle n'exige que l'emploi d'un appareil courant, un voltmètre.

REMARQUE. — Par suite de phénomènes complexes de polarisation, la résistance des diélectriques composés : caoutchouc, gutta-percha, papier, etc., varie non seulement avec le temps, mais encore avec l'intensité du courant qui les traverse. Il est donc nécessaire, pour donner une signification précise aux coefficients cherchés, d'indiquer les conditions dans lesquelles l'essai s'effectue. C'est pourquoi les cahiers des charges relatifs aux fournitures de câbles spécifient ordinairement la méthode d'essai, la force électromotrice à laquelle les câbles seront soumis, ainsi que *le temps* pendant lequel la force électromotrice doit être appliquée avant de faire les lectures.

Mesure de la résistance intérieure d'une pile. — **MÉTHODE DE LA PERTE DE CHARGE.** A l'aide d'un voltmètre V (fig. 224) on mesure la force électromotrice E de la pile à circuit ouvert puis,

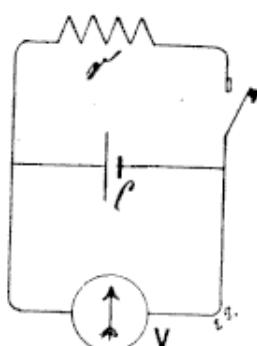


FIG. 224.

à l'aide d'un interrupteur, on ferme son circuit sur une résistance r . On note la déviation du voltmètre au premier moment de la fermeture du circuit et l'on constate, qu'après être restée un instant immobile, l'aiguille se meut plus ou moins lentement vers le zéro, par suite de la polarisation due au travail de la pile. Cet effet est d'autant plus marqué, que la résistance débouchée r est plus faible et la pile moins constante.

Lorsque l'interrupteur est fermé, le voltmètre indique la différence de potentiel aux bornes de la pile

$$e = r I = r \frac{E}{r + R}$$

d'où l'on tire pour la résistance cherchée

$$r = \frac{(E - e) R}{e}.$$

Au lieu d'un voltmètre on peut employer un galvanomètre mis en série avec une grande résistance. α et α' étant les deux déviations obtenues

$$\rho = \frac{(\alpha - \alpha') r}{\alpha'}$$

Mesure des résistances liquides. — La mesure de la résistance d'un liquide présente des difficultés spéciales car, dès que le courant passe, les électrodes se polarisent par le dépôt des ions et il naît une force contre-électromotrice de polarisation augmentant la résistance apparente de l'électrolyte.

1^o EMPLOI D'ÉLECTRODES IMPOLARISABLES. — La difficulté est éludée en utilisant des électrodes du métal qui constitue le sel. Mais le procédé n'est pas toujours applicable.

2^o MÉTHODE DES SONDES ÉLECTRIQUES DE M. LIPPMANN. — Le liquide est enfermé dans un tube bien cylindrique T , (fig. 225) fermé à ses extrémités par des bouchons métalliques de même section, qui servent d'électrodes. Deux fils de platine a et b plongent dans le liquide et sont mis en rapport avec un électromètre. A condition que celui-ci ait une faible capacité, la charge qu'il absorbe sera incapable de



Fig. 225.

polariser les électrodes a et b et l'électromètre mesurera une différence de potentiel due à la perte de charge dans la résistance X du liquide.

$$e = X i.$$

Si d'autre part on établit l'électromètre en dérivation sur une résistance métallique r en série dans le même circuit, donc traversée par le même courant I , l'appareil marquera

$$e' = r i,$$

d'où par division

$$\frac{e}{e'} = \frac{X}{r} \text{ et } X = r \cdot \frac{e}{e'}.$$

Connaissant la section du tube, la longueur l comprise entre a et b , appelant ρ la résistivité du liquide dont il s'agit, et d le diamètre intérieur de T , on aura

$$X = \rho \frac{l}{s} = \frac{4 \rho l}{\pi d^2}$$

et l'on pourra en déduire la résistivité ρ .

3^o EMPLOI DU COURANT ALTERNATIF. PONT DE KOHLRAUSCH.— En mettant à contribution un courant alternatif à alternances suffisamment rapides, les électrodes n'ont pas le temps de se polariser et, dès lors, c'est la résistance vraie que l'on mesure. Kohlrausch a utilisé à cette fin un pont de Wheatstone à fil divisé (fig. 226) dans lequel le galvanomètre est remplacé par

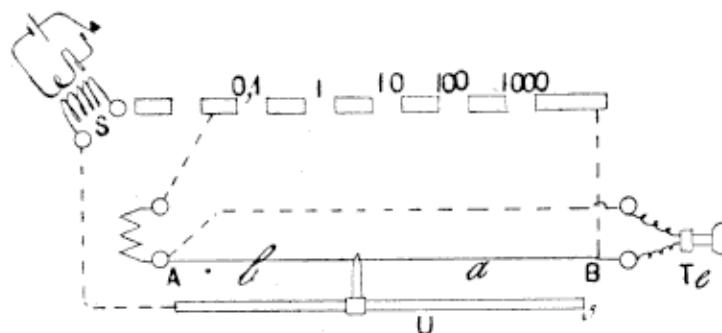


FIG. 226.

un téléphone T_e et la pile par le circuit secondaire d'une bobine d'induction, dont le primaire traversé par le courant d'une pile, est soumis à des interruptions rapides. Quand l'équilibre existe, le téléphone reste silencieux et la proportion $\frac{a}{b} = \frac{c}{X}$ est satisfaite.

Un curseur métallique U , dont le doigt touche le fil divisé $A B$, permet de repérer la valeur du rapport $\frac{a}{b}$.

En pratique on n'arrive pas à éteindre complètement les bruits dans le téléphone ; on considère que le résultat est atteint quand le téléphone émet un minimum de bruit.

Mesure d'une différence de potentiel ou d'une force électromotrice. — EMPLOI DE L'ÉLECTROMÈTRE A QUADRANTS. Nous avons établi en électrostatique (p. 71, 72 et 73) la théorie de l'électromètre à quadrants.

Pour mesurer une différence de potentiel constante, on pourra (1^o de la discussion p. 73) relier l'aiguille à l'un des pôles d'une pile à grand nombre d'éléments dont l'autre pôle est mis à la terre et connecter les deux paires de quadrants aux pôles d'une pile étalon, ce qui fournira une déviation

$$\theta = K E V,$$

E étant le voltage de l'étalon. On substituera alors aux pôles

de l'étalon les deux points entre lesquels on cherche la différence de potentiel X ce qui donnera encore

$$\theta' = K X V$$

d'où par division

$$X = E \frac{\theta'}{\theta}.$$

On peut aussi (3^o de la discussion) réunir les paires de quadrants aux pôles opposés d'une pile isolée composée d'un nombre pair d'éléments dont la jonction réunissant les deux éléments médians est raccordée à la terre. En faisant communiquer l'aiguille avec le pôle d'une pile étalon de force électromotrice E dont l'autre pôle est sur terre on aura

$$\theta = k V_2 E$$

On substitue alors à la borne de l'étalon un des deux points dont on cherche la différence de potentiel, le second point étant mis à la terre ce qui donne une nouvelle déviation

$$\theta' = k V_2 X$$

d'où la même formule que précédemment.

On obtient plus simplement des polarités égales et inverses de la pile en connectant à la terre non pas son milieu, mais le milieu d'une grande résistance réunissant ses deux pôles.

S'il s'agit d'une différence de potentiel alternative, on connecte l'aiguille avec l'une des paires de quadrants puis on réunit cet ensemble et l'autre paire avec une pile étalon (2^o de la discussion) de force électromotrice E ce qui donne une déviation

$$\theta = K E^2$$

on les réunit ensuite avec les deux points dont on cherche la différence de potentiel V ce qui donne

$$\theta' = K (V^2)_{\text{moyenne}}$$

d'où

$$(V^2)_m = \frac{\theta'}{\theta} E^2.$$

Dans le cas de fonctions sinusoïdales $(V^2)_m = e^2_{\text{eff}}$

d'où

$$e_{\text{eff}} = E \sqrt{\frac{\theta'}{\theta}}.$$

2^o EMPLOI DU GALVANOMÈTRE BALISTIQUE. MÉTHODE DE COMPARAISON. — Chargeons un condensateur étalon au moyen d'une pile étalon de force électromotrice E , il emmagasine une quantité d'électricité $q = c E$, quantité qui peut être évaluée en la déchargeant à travers un galvanomètre balistique

$$q = c E = \frac{x}{k}.$$

Si nous chargeons maintenant le même condensateur au moyen de la différence de potentiel à mesurer, puis effectuons encore la décharge dans le balistique

$$q' = c E' = \frac{x'}{k'}$$

d'où

$$E' = E \frac{x'}{x}.$$

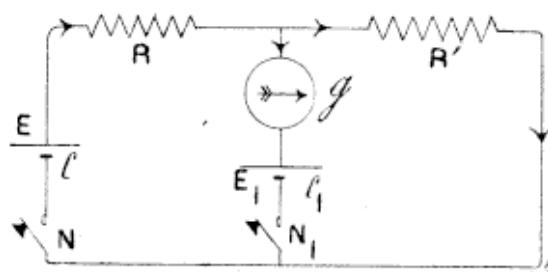


FIG. 227.

3^o MÉTHODE DE RÉDUCTION À ZÉRO. — Dans un circuit comprenant (fig. 227) une pile étalon de force électromotrice E et de résistance ρ , deux boîtes de résistance de 10 000 ohms, un interrupteur N , on dérive sur R' un galvanomètre g , la pile à comparer de force électromotrice plus faible E_i , de résistance ρ_i , enfin un interrupteur N_i .

Les résistances R et R' débouchées étant suffisantes pour que la résistance ρ de la pile étalon puisse être considérée comme négligeable, on les règle jusqu'à ce qu'en fermant l'interrupteur N_i , le galvanomètre ne dévie plus et de manière que leur somme reste constamment égale à 10 000 ohms. A ce moment, E_i est égale à la différence de potentiel existant aux bornes de R'

$$E_i = I R' = \frac{E R'}{R + R'}.$$

Pour ces mesures de réduction à zéro, l'électromètre de M. Lippmann est particulièrement bien approprié, en raison de sa grande sensibilité pour de très faibles différences de potentiel.

Mesure des différences de phase.

Entre une force électromotrice et son courant. 1^o MÉTHODE DU WATTMÈTRE. Soit un circuit dans lequel le courant est déphasé d'un angle φ sur la force électromotrice appliquée. A l'aide d'un wattmètre, on mesurera la puissance réelle dépensée dans ce circuit laquelle a pour valeur $e_{eff} i_{eff} \cos \varphi$. On mesurera d'autre part séparément e_{eff} et i_{eff} , d'où par division de l'indication du wattmètre, $\cos \varphi$.

2^o MÉTHODE GRAPHIQUE DE M. JANET. Soit un tambour métallique recouvert d'une feuille de papier légèrement humide, imprégnée de ferrocyanure de potassium et de nitrate d'ammonium (1 partie de chacune des solutions saturées et 6 parties d'eau). Sur le papier frotte un style d'acier à pointe légèrement émoussée. Lorsqu'un courant traverse le papier, de la pointe au tambour, il décompose le sel en laissant une trace bleue dans le papier. Le milieu de ce trait indique d'ailleurs le moment du maximum de l'intensité si celle-ci varie suivant la loi sinusoïdale.

Cela posé, dérivons (fig. 228) le tambour et le style sur les bornes A et B entre lesquelles règne la différence de potentiel alternative étudiée, et animons le tambour d'une vitesse connue de rotation. Nous trouverons après lavage du papier, une série de traits bleus également espacés, dont les milieux correspondront aux maxima positifs de la force électromotrice. Comme il existe un trait par période nous pourrons, d'après la vitesse angulaire du tambour, déterminer la fréquence. La résistance de l'appareil étant grande et sa réactance nulle, le courant inscripteur est en phase avec la force électromotrice.

Intercalons maintenant dans le circuit expérimenté une résistance R sans réactance, dont nous relions une extrémité à un second style, l'autre extrémité correspondant au tambour. Les secondes traces produites permettront de déterminer l'instant du maximum du courant dérivé, lequel est en phase avec le courant principal et la distance séparant les maxima des deux

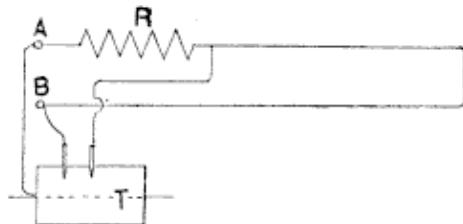


FIG. 228.

systèmes de traits, rapportée à la longueur correspondant à une période, permettra de déterminer le déphasage φ .

Différence de phase entre deux courants. — **MÉTHODE DE BLAKESLEY OU DES TROIS ELECTRODYNAMOMÈTRES.** On fait passer le premier courant dans le premier appareil et l'une des bobines du second; le second courant dans le 3^e appareil et la seconde bobine du second. Le premier appareil donne i_{eff} , le second i_{eff}' $i_{eff}' \cos \varphi$, le troisième i_{eff}'' d'où l'on déduit $\cos \varphi$.

EMPLOI D'APPAREILS SPÉCIAUX. — Des dispositifs particuliers permettent, soit de mesurer $\sin \varphi$ (phasemètre Dobrowolsky) soit φ (phasemètre Brüger) (1)

Mesure des capacités.

La mesure s'effectue généralement par comparaison. On charge à l'aide d'une différence de potentiel E un condensateur de capacité connue c et on le décharge à travers un galvanomètre balistique.

$$\text{On a} \quad q = c E = \frac{z}{k}$$

On procède de même avec la capacité à déterminer ce qui donne

$$q' = X E = \frac{z'}{k'}$$

$$\text{d'où} \quad X = c \frac{z'}{z}$$

Mesure des coefficients d'induction.

Selfinduction. 1^o **MÉTHODE DE JOUBERT.** Soit un électroaimant de résistance r , de coefficient de selfinduction \mathfrak{L} , parcouru par un courant alternatif i_{eff} sous l'effet d'une force électromotrice e_{eff} .

(1) FONTAINE. *Mesure des différences de phase*. Bulletin de l'Association des Ingénieurs Montefiore T. XI de 1899-1900 p. 51.

Nous savons que

$$i_{\text{eff}} = \frac{e_{\text{eff}}}{\sqrt{r^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2}}$$

d'où

$$\sqrt{r^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2} = \frac{e_{\text{eff}}}{i_{\text{eff}}} \text{ et } \mathfrak{L} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{e_{\text{eff}}^2}{i_{\text{eff}}^2} - r^2}.$$

Il suffira donc de calculer f , de mesurer r par une des méthodes étudiées précédemment, de déterminer au moyen d'un ampèremètre et d'un voltmètre pour courants alternatifs e_{eff} et i_{eff} , pour connaître la *valeur moyenne* de \mathfrak{L} .

On peut effectuer la détermination au moyen d'un seul appareil, d'un voltmètre, en montant à la suite de la bobine dont on cherche le coefficient de selfinduction une résistance R sans réactance (fig. 229) dont on mesure la valeur.

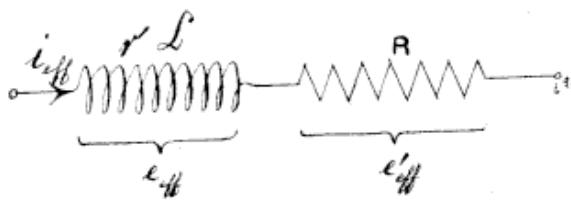


FIG. 229.

On a

$$i_{\text{eff}} = \frac{e_{\text{eff}}}{\sqrt{r^2 + 4\pi^2 f^2 \mathfrak{L}^2}} = \frac{e'_{\text{eff}}}{R}.$$

Il suffira donc, dans ce cas, de mesurer e_{eff} et e'_{eff} pour pouvoir calculer la valeur de \mathfrak{L} .

$$\mathfrak{L} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{e_{\text{eff}}^2}{e'^2_{\text{eff}}} R^2 - r^2}.$$

2^o MÉTHODE DE VASCHY ET DE LA TOUANNE. — Nous avons vu (p. 217, 218) qu'une capacité C shuntée par une résistance r' correspond à une selfinduction $-Cr'^2$. En faisant varier r' , nous disposons du moyen de modifier à volonté cette selfinduction négative. Si celle-ci est mise en série avec la selfinduction \mathfrak{L} à mesurer, l'effet inductif sera nul quand $\mathfrak{L} = Cr'^2$.

Constituons la quatrième branche d'un pont de Wheatstone (fig. 230) de la bobine de résistance r dont nous cherchons la selfinduction \mathfrak{L} et mettons-la en série avec une résistance R sur une fraction r' de laquelle nous dérivons un condensateur de C farads.

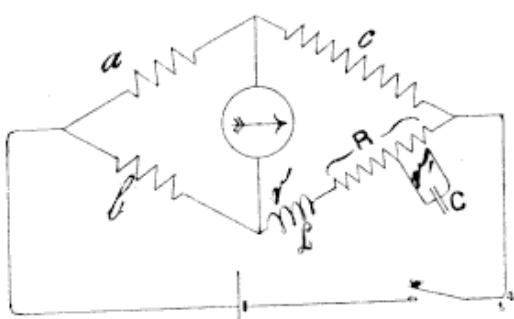


FIG. 230.

Etablissons d'abord l'équilibre en régime permanent. En rompant le circuit de la pile, le galvanomètre accusera une décharge due à la selfinduction de la 4^e branche. Faisons varier la résistance r' en ayant soin de maintenir constante la valeur de R et essayons chaque fois l'effet de l'extra-courant, soit à la fermeture, soit à la rupture. Quand cet effet est nul, on a

$$\mathfrak{L} = Cr'^2.$$

C étant exprimé en farads, r' en ohms, \mathfrak{L} l'est en henrys.

Au cas où il n'est pas possible de régler les résistances de manière à obtenir l'équilibre dans le régime variable, on supprime le condensateur et l'on établit l'équilibre en régime permanent. On observe alors l'élongation δ due à l'extra-courant de la bobine seule et $\mathfrak{L} = K \frac{\delta}{k'}$. En procédant de même avec le condensateur placé en dérivation sur une fraction r' de la résistance R mise en série avec la bobine, on obtiendra une élongation δ' due au coefficient $\mathfrak{L} - Cr'^2$, et l'on pourra écrire

$$\mathfrak{L} - Cr'^2 = K \frac{\delta'}{k'}$$

d'où

$$\mathfrak{L} = Cr'^2 \frac{\delta}{\delta - \delta'}.$$

Induction mutuelle. 1^e MÉTHODE DE VASCHY. Soient deux

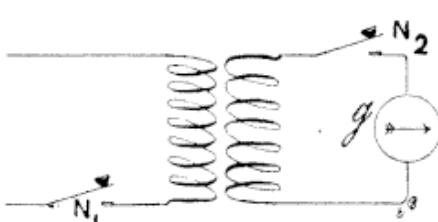


FIG. 231.

enroulements présentant un coefficient d'induction mutuelle \mathfrak{M} . Connectons l'un d'eux avec un interrupteur N_1 (fig. 231) et un galvanomètre balistique g et envoyons dans l'autre enroulement un courant constant i . Un flux $\mathfrak{M} i$

traversera l'enroulement induit, de sorte qu'au moment où on interrompra le circuit inducteur au moyen de l'interrupteur N_1 , si N_2 est fermé, le galvanomètre sera parcouru par une décharge

$$\frac{\mathfrak{M} i}{R} = \frac{\alpha}{k'} \quad (1)$$

R étant la résistance totale du circuit galvanométrique.

Chargeons maintenant un condensateur étalon de capacité c au moyen de la différence de potentiel créée aux extrémités d'une résistance r traversée par le courant i du circuit inducteur et déchargeons-le dans le balistique. Nous aurons

$$c i r = \frac{x'}{k} \quad (2)$$

d'où par division membres à membres

$$\mathfrak{M} = c r R \frac{x}{x'}.$$

2° DISPOSITIF DE RÉDUCTION À ZÉRO. Le dispositif indiqué (fig. 232) permet d'opposer la décharge du condensateur à celle due au coefficient d'induction mutuelle. On modifie la résistance r en dérivation sur le condensateur jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro, tant à la fermeture qu'à l'ouverture du circuit inducteur. A ce moment $\mathfrak{M} = c r R$.

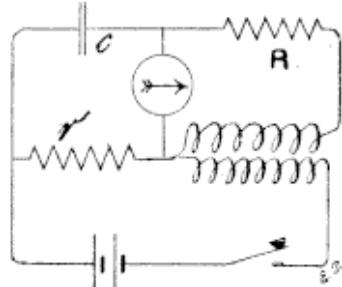


FIG. 232.

Mesure de l'intensité des champs magnétiques.

Champ magnétique terrestre. 1° PAR LE MAGNÉTOMÈTRE. Nous avons vu (p. 143) comment le magnétomètre permet de déterminer l'intensité magnétique horizontale \mathcal{M} du champ magnétique terrestre.

2° PAR L'INCLINOMÈTRE DE WEBER. L'étude de l'inclinomètre de Weber (p. 208) nous a donné le moyen de mesurer les deux composantes horizontale et verticale du magnétisme terrestre.

Champ magnétique d'une dynamo. 1° PAR INDUCTION. On construit une bobine plate à la façon d'une bobine de galvanomètre Deprez d'Arsonval, en notant son nombre de spires et déterminant leur surface moyenne. Les joues sont garnies de flasques en mica pour éviter sa détérioration. On la raccorde à un galvanomètre balistique et la glisse à l'endroit où l'on veut apprécier la valeur du champ. En la retirant alors brusquement, pour l'amener dans une position où le flux qui la traverse est

sensiblement nul, le galvanomètre donne une élongation proportionnelle au flux coupé, d'où l'on peut déduire la valeur de celui-ci et par suite celle du champ.

2^o PAR LA SPIRALE DE BISMUTH. On peut se servir de la propriété du bismuth de présenter une résistance électrique variable avec l'intensité du champ qui le traverse (p. 196), en



FIG. 233.

le façonnant sous forme d'une spirale (fig. 233) double pour éviter les effets d'induction, que

l'on place au point où l'on veut déterminer l'intensité du champ. On mesure alors sa résistance. Un diagramme qui accompagne l'appareil, permet de connaître immédiatement l'intensité cherchée.

Mesure de la perméabilité et de l'hystérésis.

Méthode basée sur la force portante. 1^o PERMÉAMÈTRE D'HOPKINSON. Nous avons vu (p. 184) que la force portante d'un barreau aimanté est exprimée en dynes par

$$P = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi} \text{ ou, si } P \text{ est exprimé en grammes par } 981, P = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi}.$$

D'autre part

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{H}, \text{ d'où } \mu = \sqrt{\frac{8\pi P \cdot 981}{H^2 S}}.$$

Si donc nous déterminons la force portante d'un barreau de section connue, soumis à un champ d'intensité connue également, nous pourrons en déduire μ .

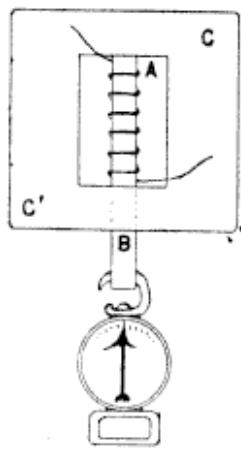


FIG. 234.

Dans ce but on façonne le métal étudié sous forme d'éprouvette cylindrique mince AB (fig. 234) que l'on introduit à frottement doux dans un cadre massif en fer CC' et dont l'extrémité A s'applique contre la culasse bien rodée. La bobine étant constituée d'un enroulement à nombre de spires par centimètre connu, son noyau sera soumis au champ $4\pi n_i i 10^{-4}$, i étant exprimé en ampères.

Afin de ne pas procéder par secousses pouvant fausser les mesures, il convient, après avoir bandé le ressort ou chargé le plateau de poids, de laisser l'arrachement se produire de lui-même en diminuant progressivement l'intensité du courant.

Cette méthode, qui a l'avantage de la simplicité et de la rapidité, est peu exacte vu notamment l'incertitude qui règne quant à la surface de contact réelle S entre le barreau et l'armature.

2^o Méthode magnétométrique d'Ewing. — L'échantillon dont on doit mesurer la perméabilité est façonné en long barreau cylindrique NS (fig.

235) que l'on place verticalement dans un solénoïde. Ses pôles N et S agiront sur l'aiguille m du magnétomètre dont le milieu est placé sur

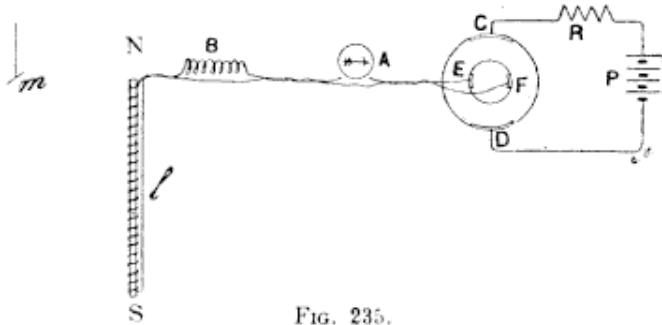


FIG. 235.

la perpendiculaire élevée à l'extrémité N du barreau et dans la direction est-ouest. A l'aide de fils tordus ensemble (pour éviter leur action magnétique) on raccorde le long solénoïde à une bobine B qui a pour objet d'annuler l'action de l'extrémité du solénoïde sur l'aiguille du magnétomètre, à un ampèremètre A et à un système permettant d'obtenir un courant sinusoïdal variant entre des limites déterminées. Ce système est constitué par un vase en poterie, rempli d'une solution de sulfate zincique, dans laquelle plongent deux électrodes fixes en zinc C et D reliées par l'intermédiaire d'un rhéostat R à une batterie d'accumulateurs P. Concentriquement à la cuve peuvent tourner sur un tambour deux autres électrodes en zinc E, F, placées diamétralement et raccordées, hors du liquide, à des bagues sur lesquelles frottent des balais terminant le circuit galvanométrique. Quand dans leur rotation, les électrodes E, F sont en face de C et D, l'intensité du courant est maximum; quand elles se trouvent placées dans la position de la figure, l'intensité est nulle. A partir de ce moment le courant s'inverse dans le circuit, pour réatteindre la valeur maximum de départ en grandeur absolue, quand E et F sont arrivés en face de D et C et ainsi de suite.

Avant toute mesure, on ramène l'échantillon à l'état neutre, en diminuant graduellement l'intensité des courants agissant, par l'interposition de résistances croissantes en R.

a étant la distance du milieu de l'aiguille au milieu du pôle N extrémité supérieure du barreau, \mathfrak{I} l'intensité d'aimantation du barreau et s sa section, la composante magnétique horizontale que le barreau produit au point où se trouve l'aiguille a pour valeur

$$\mathcal{M}_1 = \mathfrak{I} s \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{a^2 + b^2} \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) = \mathfrak{I} s \left[\frac{1}{a^2} - \frac{a}{(a^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

Sous l'influence de ce champ, l'aiguille dévie d'un angle θ et l'équilibre est atteint quand le couple déviant équivaut au couple terrestre

$$\mathcal{M}_1 \mathcal{M} \cos \theta = \mathcal{M}' \mathcal{M} \sin \theta$$

\mathcal{M} étant le moment magnétique de l'aiguille et \mathcal{M}' la composante horizontale du magnétisme terrestre.

On en tire

$$\mathfrak{I} = \frac{1}{s} \cdot \frac{\mathcal{M}' \operatorname{tg} \theta}{\frac{1}{a^2} - \frac{a}{(a^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}}}$$

et si b est suffisamment grand par rapport à a

$$\mathfrak{I} = \frac{a^2}{s} \mathcal{M}' \operatorname{tg} \theta.$$

En combinant cette équation avec l'équation générale

$$\mu = \frac{\mathcal{M} + 4\pi \mathfrak{I}}{\mathcal{M}}$$

on déduira les valeurs de μ correspondant aux diverses valeurs de la force magnétisante, si l'on connaît l'intensité horizontale terrestre du lieu où l'on opère. Cette sujexion est un premier inconvénient. En outre, pour que le champ \mathcal{M} créé dans la bobine soit constant et égal à $4\pi n_i i$, il faut que la longueur l de celle-ci et de son noyau soit au moins égale à 500 fois son diamètre intérieur, d'où nécessité de disposer d'un noyau très long. Enfin, le magnétomètre est très aisément influençable par les champs parasites.

3^e **Emploi du galvanomètre balistique.** — a) **MÉTHODE d'HOPKINSON.** L'éprouvette à expérimenter, de 1 à 2 cm de diamètre, est formée de deux tronçons A C, C E (fig. 236) placés bout à bout, dont les extrémités opposées passent à frottement doux dans une masse en fer forgé D D'. Sur chaque tronçon est montée une bobine magnétisante B₁, B₂, Enfin une petite bobine B₃, tirée latéralement par un ressort R, tend à se dégager vivement dès que le tronçon C E est retiré. Cette bobine est reliée à un galvanomètre balistique.

Soient m le nombre de spires des bobines magnétisantes B₁, B₂ traversées par le même courant, l la longueur en cm des éprouvettes limitée par le vide de la carcasse A D E D', s la section en cm² des barreaux dont la perméabilité est μ , l' la longueur moyenne des lignes de force dans la carcasse massive, s' la section moyenne de celle-ci et μ' sa perméabilité, \mathfrak{N} le flux magnétique total.

$$\text{On a } 4\pi m i \cdot 10^{-4} = \frac{\mathfrak{N} l}{\mu s} + \frac{\mathfrak{N} l'}{\mu' s'}.$$

La section s' étant considérable, le second terme est faible et on le néglige

$$4\pi m i \cdot 10^{-4} = \frac{\mathfrak{N} l}{\mu s} \quad (1)$$

D'autre part, la bobine mobile possédant n spires, coupe le flux \mathfrak{N} quand on sépare vivement les deux tronçons d'où, la résistance totale de son circuit étant R, la décharge dans le balistique

$$\frac{\mathfrak{N} n}{R} = \frac{z}{k'} \quad (2)$$

En faisant varier le courant i , dont on connaît l'intensité au moyen d'un ampèremètre, on pourra déduire de (1) et (2) les valeurs de l'induction et de la perméabilité correspondant à des forces magnétisantes données.

Cette méthode ne fournit des résultats exacts qu'à 30 % près, le terme négligé pour obtenir (1) présentant une valeur sensible

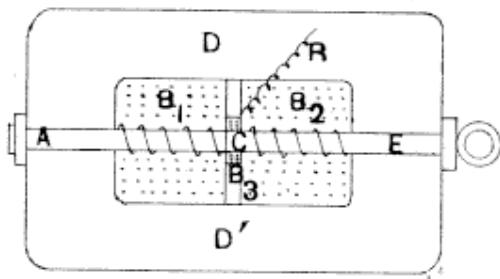


FIG. 236.

vu la faiblesse de μ' due à la faible aimantation de la volumineuse carcasse A D E D' et le joint des deux surfaces juxtaposées, bien que rodé, présentant une certaine réluctance, de même que les joints dans la carcasse. D'autre part le processus opératoire est assez compliqué.

b) MÉTHODE D'EWING. — Sur l'éprouvette D E (fig. 237) pourvue de sa culasse en fer forgé, se trouve passé l'enroulement magnétisant B qu'un commutateur à deux directions C₁

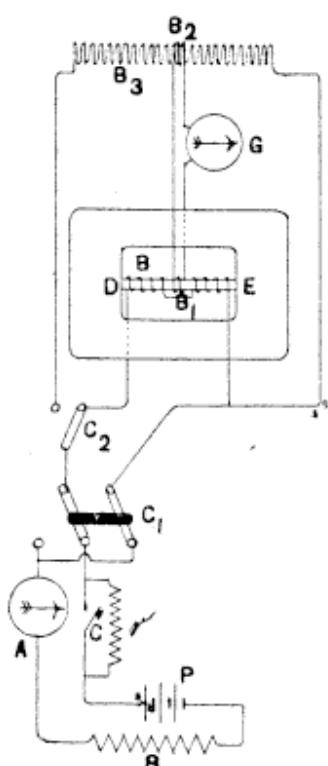


FIG. 237.

permet de faire traverser par le courant d'une batterie d'accumulateurs P dans un sens ou dans l'autre. R sert à régler le courant maximum, l'ampèremètre A mesure l'intensité du courant, enfin une résistance réglable r peut être mise en court-circuit par la clé C. Au centre de l'éprouvette se trouve enroulée une bobine B₁ reliée à un balistique G. Celui-ci est taré à l'aide d'une petite bobine B₂ embrassant le milieu d'un long solénoïde B₃ dans lequel on peut admettre le courant au moyen du commutateur C₂.

Dans la méthode d'Ewing on ramène, après chaque mesure, l'échantillon à l'induction maximum de départ, après lui avoir fait parcourir un cycle magnétique complet et l'on trace expérimentalement la moitié supérieure de la courbe cyclique (fig. 238) par différence avec cette induction maximum.

A cet effet, la clé de court-circuit C étant fermée, réglons la résistance r de manière à obtenir une force magnétisante \mathcal{H}_1 et ouvrons brusquement C. Le courant diminue et nous observons au balistique une élongation permettant de déterminer la diminution de flux magnétique, ce qui nous donne le point \mathfrak{B}_2 (fig. 238).

Nous déplaçons alors C₁ vers la gauche, refermons C et repoussons C₁ à droite ce qui porte l'échantillon aux inductions successives — \mathfrak{B}_m et $+\mathfrak{B}_m$.

On opère semblablement pour une série de résistances crois-

santes de r , ce qui permet de construire la partie $\mathfrak{B}_m R$ de la courbe (fig. 238).

Pour tracer la partie $R - \mathfrak{B}_m$, on change les connexions de la batterie après avoir placé C_1 vers la gauche. On règle r de manière à obtenir un courant faible et déplace C_1 vers la droite, ce qui donne le point \mathfrak{B}_3 par exemple. On ferme alors C amenant l'induction à $- \mathfrak{B}_m$ et repousse C_1 à gauche pour ramener l'induction à $+ \mathfrak{B}_m$ et ainsi de suite.

Ayant déterminé les points $+ \mathfrak{B}_m$ et $- \mathfrak{B}_m$ et possédant l'horizontale passant par $+ \mathfrak{B}_m$ qui a servi au tracé de la courbe, on tire aisément les axes, puis la partie inférieure de la courbe se tracera par symétrie.

L'hystérésis (comme d'ailleurs dans les méthodes précédentes) sera donnée par l'aire de la courbe cyclique relevée.

L'hystérésis peut également se mesurer au moyen du wattmètre et, pour des essais rapides, par l'intermédiaire d'appareils spéciaux comme les hystérésimètres d'Ewing, Blondel, etc.

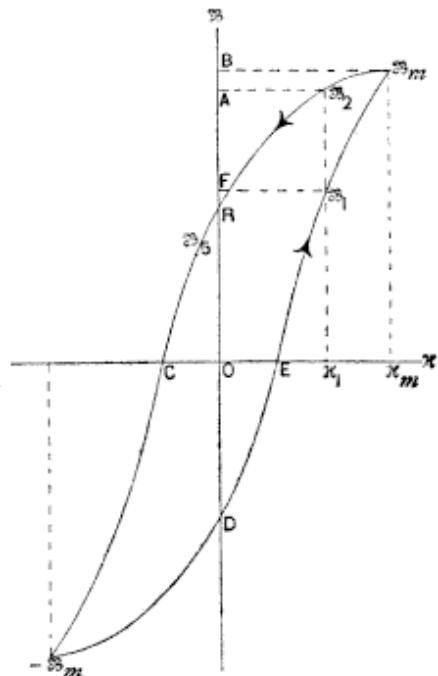


FIG. 238.

TABLE DES MATIÈRES.

Préfaces p. 5 et 9

**CHAPITRE I. — GÉNÉRALITÉS, UNITÉS FONDAMENTALES
ET DIMENSIONS** p. 11

Matière et énergie. Transformation de l'énergie. Mesure de l'énergie. Évaluation des grandeurs. Mesures directes et indirectes. Grandeurs fondamentales. Système C. G. S. Relation entre la valeur numérique et la grandeur de l'unité employée. Unités dérivées. Équations de dimensions. Changement d'unités dérivées. Multiples et sous-multiples. Principales quantités et unités dérivées géométriques et mécaniques. Surface. Volume. Angle. Vitesse. Vitesse angulaire. Accélération. Force. Énergie mécanique. Énergie thermique. Énergie chimique. Énergie électrique. Puissance. Utilité des équations de dimensions. Applications.

CHAPITRE II. — ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

§ 1. — Phénomènes généraux p. 22

Électrisation par frottement. Corps isolants, conducteurs, semi-conducteurs. Transmission de l'électricité par contact. Attractions et répulsions électriques. Deux espèces d'électricité. Leur reconnaissance. Électroscope à feuilles d'or. Production simultanée des deux électricités. Électrisation par influence. Corps inducteur et induit. Électrophore. L'électricité se porte à la surface des conducteurs. Étincelle électrique. Pouvoir des pointes. Quantités ou masses électriques. Loi de Coulomb. Densité électrique.

CHAMP ET POTENTIEL ÉLECTRIQUES p. 31

Champ électrique. Potentiel électrique. Différence de potentiel. Analogie avec les surfaces de niveau. Potentiel zéro. Surfaces équipotentielles. Champ électrique dû à une couche sphérique homogène. I. A l'intérieur de la couche l'intensité est nulle. II. L'action d'une couche sphérique homogène sur un point extérieur est la même que si toute la masse était concentrée au centre de la sphère. Action exercée par un disque infiniment mince, uniformément chargé d'un côté. Conducteur en équilibre. Énergie potentielle d'un système de masses électriques. Lignes de force. Représentation d'un champ électrique. Cas de plusieurs masses. Champ uniforme. Tube de force. Flux

de force. Théorème de Gauss. Constance du flux dans un tube de force. Tube élémentaire. Tube unité. Éléments correspondants. Théorème de Coulomb. Pression electrostatique. Action mécanique due à la pression electrostatique. Écran électrique. L'électroscopie donne des indications proportionnelles au potentiel.

§ 2. — Condensation de l'électricité p. 48

Capacité. Capacité d'une sphère. Sphère équivalente. Condensateur. Force condensante. Divers types de condensateurs. Bouteille de Leyde. Condensateur d'Aepinus. Condensateur sphérique. Condensateur à armatures parallèles. Condensateur cylindrique. Énergie d'un condensateur chargé. Couplage des condensateurs : dérivation, série. Énergie maximum que l'on peut emmagasiner dans une batterie. Pouvoir inducteur spécifique. Valeur du coefficient de la loi de Coulomb. Flux d'induction. Charge résiduelle. Absorption électrique. Constante diélectrique. Dilatation électrique. Polarisation et rôle du diélectrique.

§ 3. — Décharge d'un condensateur p. 62

1^o Décharge lente ou convective. 2^o Décharge conductive. Résistance électrique. Fusion et volatilisation des métaux. 3^o Décharge disruptive. A. A travers les corps mauvais conducteurs solides. B. A la surface de corps mauvais conducteurs. C. A travers l'air. Étincelle électrique, 1^o Étincelle proprement dite. Rigidité electrostatique ou distance explosive. Influence de la pression. 2^o L'aigrette. 3^o Les lueurs. 4^o Les rayons cathodiques. Rayons Roentgen.

§ 4. — Appareils de mesure p. 70

Électroscopie à feuille d'or. Électroscopie condensateur. Électromètre à quadrants. Électromètre absolu. Lecture des déviations. Méthode directe. Méthode indirecte. 1^o Subjective. 2^o Objective.

§ 5. — Machines électrostatiques p. 76

Principes généraux. Machines à frottement. Machine de Ramsden. Machines à influence. Replenisher. Machine de Holtz. Machine de Winshurst. Réversibilité des machines statiques. Conditions de fonctionnement.

CHAPITRE III.

§ 1. — Des forces électromotrices de contact . . . p. 83

Effet Volta. Force électromotrice dans un circuit fermé à même température. Loi des contacts successifs. Chaîne à liquides. Couple ou élément Volta.

§ 2. — Lois du courant électrique p. 86

Force électromotrice. Intensité. Loi d'Ohm. Représentation graphique. Loi d'Ohm dans le cas des grandes résistances. Décharge d'un condensateur chargé. Cas d'un circuit quelconque. Force électromotrice appliquée. Représentation graphique. Puissance d'un courant. Effet Joule. Court-circuit. Effet Peltier. Effet Kelvin. Modification de la résistance avec la température. Corps conducteurs. Calcul de la résistance d'un fil conducteur. Corps peu et non-conducteurs. Lois de Kirchhoff. Lois des courants dérivés. Résistance combinée. Conducteurs dérivés d'égales résistances. Cas de deux conducteurs. Application des lois de Kirchhoff. Exemple.

CHAPITRE IV. — DIVERS MODES DE GROUPEMENT
DES GÉNÉRATEURS D'ÉLECTRICITÉ p. 104

Groupement en série. En dérivation. Mixte. Courant maximum. Montage en échelle d'Amsterdam. Puissance et rendement.

CHAPITRE V. — EFFETS CHIMIQUES DU COURANT p. 110

Phénomène de l'électrolyse. Réactions secondaires. Théorie d'Arrhénius. Loi de Faraday. Définition pratique du coulomb et de l'ampère. Conductibilité électrolytique. Loi d'Oswald. Vitesse des ions. Sels normaux et anormaux. Loi de Kolrausch. Valeur absolue de la vitesse. Chaleur d'ionisation. Polarisation des électrodes. Courant secondaire. Courants de polarisation et de diffusion. Limite de la polarisation. Cas où la polarisation est nulle. Calcul de la force électromotrice de polarisation d'un électrolyte. Tension de dissolution électrolytique. Formule de Nernst. Limites de l'électrolyse. Vues modernes sur l'électrolyse. Les électrons.

CHAPITRE VI. — MAGNÉTISME.

§ 1. — Généralités p. 127

Aimants naturels. Aimants artificiels. L'effet magnétique est concentré aux extrémités. Action réciproque des aimants. Pôles. Intensité magnétique. Loi des actions magnétiques. Champ magnétique. Intensité du champ. Unité de champ ou gauss. Direction du champ. Moment magnétique. Potentiel magnétique. Valeur du champ en fonction du potentiel. Surface équipotentielle magnétique. Action d'un champ uniforme sur un aimant. Champ magnétique terrestre. Aimantation par influence. Magnétisme rémanent. Aimants brisés. Hypothèse de Weber. Corps magnétiques et diamagnétiques.

§ 2. — Étude théorique des aimants p. 135

Aimant élémentaire. Potentiel dû à un aimant élémentaire. Filet magnétique ou solénoidal. Feuillet magnétique. Potentiel dû à un feuillet. Énergie

d'un feuillet dans un champ. Énergie relative de deux feuillets. Cas de n feuillets. Aimant uniforme. Induction magnétique. Force magnétique dans une cavité. Caractéristiques d'un aimant. Détermination du moment magnétique d'un aimant. Magnétomètre.

§ 3. — **Aimantation par influence** p. 145

Force magnétisante. Coefficient d'aimantation ou de susceptibilité magnétique. Force démagnétisante. Cas où l'intensité d'aimantation est constante. Tore. Cylindre. Force portante d'un aimant. Aimant dans un champ. Perméabilité magnétique. Utilité des deux notions de susceptibilité et de perméabilité. Écrans magnétiques. Courbes d'aimantation. Magnétisme rémanent. Force coercitive. Cycle d'aimantation. Hystéresis. Variation de la susceptibilité. Retour à l'état neutre. Perte due à l'hystéresis. Formule de Steinmetz. Renseignements numériques. Fer doux. Acier. Fonte. Cobalt. Nickel. Corps peu magnétiques ou diamagnétiques. Oxygène. Bismuth. Effet de la durée de l'aimantation. Effet de la température.

AIMANTS PERMANENTS p. 155

Généralités. Choix du métal. Conditions auxquelles il doit satisfaire. Résultats obtenus. Variation du moment magnétique avec la température. Procédés anciens d'aimantation. Double touche. Double touche séparée. Double touche unie. Procédé actuel. Emploi du courant. Aimantation sous l'action de la terre. Conservation des aimants. Armature.

CHAPITRE VII. — **ÉLECTROMAGNÉTISME** p. 159

Expérience d'Oersted. Règle d'Ampère. Règle de Maxwell. Aiguille astatique d'Ampère. Forme du champ magnétique dû à un courant rectiligne. Expression de la force magnétique due à un courant rectiligne. Loi de Biot et Savart. Courant anguleux. Loi de Biot. Galvanomètre. Courant élémentaire. Loi de Laplace. Système électromagnétique C. G. S. Action d'un champ magnétique sur un élément de courant. Règle des trois doigts de Fleming. Travail développé par le déplacement d'un élément de courant sous l'action d'un pôle. Par le déplacement d'un courant. Règle de Faraday. Forme du champ magnétique développé par un courant fermé. Courant mobile d'Ampère. Courants de sens contraires et sinuieux. Travail développé par le déplacement d'un courant fermé sous l'action d'un pôle. Potentiel magnétique dû à un courant. Équivalence d'un courant et d'un feuillet magnétique. Théorème d'Ampère. Unité électromagnétique d'intensité. Expression du champ magnétique dû à un courant. Hypothèse d'Ampère. Énergie relative d'un courant dans un champ magnétique. Règle de Maxwell. Cadre astatique. Action mécanique des courants sur les courants. Lois d'Ampère.

Énergie relative de deux courants. Potentiel dû à un courant rectiligne indéfini. Action magnétique d'un conducteur rectiligne indéfini traversé par un courant en un point extérieur. Potentiel en un point de l'axe d'un courant circulaire. Solénoïde électromagnétique. Bobine cylindrique. Force magnétisante. Direction du champ dans la bobine. Induction dans un long électro-aimant. Aimant annulaire. Circuits magnétiques parfaits et imparfaits. Force magnétomotrice. Réductance. Application des lois de Kirchhoff au circuit magnétique. Réductances en tension. Réductances en dérivation. Coefficient d'Hopkinson. Force magnétomotrice nécessitée par un circuit hétérogène. Gilberts et Ampères-tours. Influence d'un entrefer sur la réductance. A densité constante de courant et à égalité de volume occupé par l'enroulement la force magnétomotrice est constante. Force portante d'un électro-aimant. Section à donner au noyau. Fil à utiliser. Faible, moyenne et haute tension. Calcul d'un électro-aimant. Application. Forme à donner aux extrémités polaires. Divers types d'électro-aimants. Droit. En fer à cheval. Polarisé. Cuirassé. A déplacement latéral. A noyau mobile. Cuirassé à noyau mobile. Ruhmkorff. Interrupteur automatique. Obtention des aimants en acier. Aimant droit. En fer à cheval. Aimantation transversale.

CHAPITRE VIII.— EFFETS DIVERS DUS AU CHAMP MAGNÉTIQUE.

a) **Action sur la lumière** p. 192

Pouvoir rotatoire magnétique. Loi de Verdet. Galvanomètre optique. Phénomène de Keer ; de Zeeman.

b) **Action sur le courant** p. 195

Phénomène de Hall.

c) **Déplacements électromagnétiques** p. 196

Action d'un courant vertical sur l'aiguille aimantée. Roue de Barlow, disque de Faraday. Rotation des liquides et des gaz. Rotation d'un aimant par un courant. Rotation d'un courant par un courant. Action de deux courants parallèles. Courants fermés. Explication des actions magnétiques et électromagnétiques par la notion des lignes de force.

CHAPITRE IX. — INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE.

§ 1. — **Généralités** p. 201

Phénomène d'induction. Loi générale de l'induction. Siège de la force électromotrice d'induction. Règle de Faraday. Loi de Lenz. Application. Règle de Maxwell ou du tire-bouchon. Règle de Fleming ou des trois doigts. Disque de Faraday. Application. Induction unipolaire. Quantité d'électricité

induite. Mesure de l'intensité d'un champ. Inclinomètre de Weber. Courbe du magnétisme d'un aimant. Mesure du flux d'induction. Selfinduction. Valeur du coefficient de selfinduction. Effet de la selfinduction. Extra-courant de fermeture et de rupture. Équation du courant à la fermeture. Constante de temps. Application. Équation du courant à l'ouverture. Énergie intrinsèque d'un courant. Exemple. Effet de la selfinduction dans le cas des courants dérivés. Effet d'une capacité shuntée par une résistance et d'une selfinduction mises en série dans un circuit dérivé. Enroulements sans induction. Influence de la continuité du circuit magnétique sur la valeur du coefficient de selfinduction.

§ 3. — Induction mutuelle. p. 220

Relation entre le coefficient d'induction mutuelle et celui de selfinduction. Induction dans les masses métalliques. Courants de Foucault. Moyens de réduire les courants de Foucault. Écran électromagnétique.

§ 4. — Valeur du coefficient de selfinduction dans le cas d'un circuit constitué de deux longs fils parallèles. p. 225

A. Conducteurs filiformes. B. Conducteurs cylindriques.

CHAPITRE X. — APPAREILS DE MESURE.

APPAREILS ÉLECTROMAGNÉTIQUES : GALVANOMÈTRES p. 231

Galvanomètre des tangentes. Boussole des tangentes. Galvanomètres usuels. Shunts. Moyens employés pour augmenter la sensibilité des galvanomètres à aimant mobile. 1^o Forme de la bobine. 2^o Aimant compensateur. 3^o Aiguilles astatiques. Amortissement. Galvanomètre différentiel. Kelvin. Deprez-d'Arsonval.

ÉLECTRODYNAMOMÈTRES p. 239

Siemens. Kelvin.

APPAREILS THERMIQUES p. 241

Hartmann et Braun.

MESURE D'UNE DÉCHARGE INSTANTANÉE p. 242

Résistance critique. Galvanomètre balistique. Constante balistique. Relation entre les constantes permanente et balistique. Valeur de la résistance critique. Moyens de rendre les galvanomètres balistiques.

VOLTMÈTRES p. 249

Voltmètre électrostatique. Lippmann. Galvanomètre-voltmètre.

MESURE DE LA PUISSANCE p. 251

Par l'ampèremètre et le voltmètre. Wattmètre.

APPAREILS ENRÉGISTREURS ET INDUSTRIELS p. 252

Enregistreurs. Industriels. Weston. Chauvin et Arnoux. Richard.

CHAPITRE XI. — LES UNITÉS p. 256

Deux systèmes d'unités. Système électrostatique. Quantité. Densité superficielle. Champ. Flux de force. Intensité. Résistance. Différence de potentiel ou force électromotrice. Capacité. Système électromagnétique. Quantité de magnétisme. Densité, intensité, champ, flux, moment, potentiel magnétiques. Coefficient d'aimantation ou de susceptibilité. Induction magnétique. Intensité de courant. Quantité d'électricité. Résistance. Force électromotrice. Capacité. Coefficient de selfinduction. Rapport des deux systèmes. Unités pratiques. Ampère. Coulomb. Volt. Farad. Joule. Watt. Henry. Correspondance des unités pratiques et C. G. S.

ÉTALONS DES UNITÉS PRATIQUES p. 264

Étalon de résistance. Résistances pour courants faibles. Boîte ordinaire, en décades, circulaire. Résistances par courants intenses. Étalons de force électromotrice, de capacité, de selfinduction.

CHAPITRE XII. — COURANT ALTERNATIF.

§ 1. — Généralités p. 270

Période. Vitesse angulaire ou pulsation de la force électromotrice. Fréquence. Application. Intensité. Courant redressé, ondulé, pulsatif. Renversement d'un courant alternatif. Force électromotrice effective. Intensité et force électromotrice efficaces. Utilité de la notion de l'intensité efficace. Les appareils de mesure donnent les valeurs efficaces. Intensité et force électromotrice moyennes. Effet de la selfinduction et de la capacité. Résistance apparente et impédance. Réactance. Application. Chute de voltage. Détermination graphique de la force électromotrice appliquée. Cas particuliers. Résonnance. Réactance de selfinduction. Capacitance. Déphasage des diverses forces électromotrices. Élévations de potentiel dues à la résonnance. Puissance des courants alternatifs. Variation de puissance pendant la période. Facteur de puissance. Courants wattés et déwattés.

§ 2. — Electro-aimant pour courant alternatif. Distribution du courant dans la section du conducteur. Bobine d'induction . . . p. 293

Courants de Foucault dans les noyaux des electro-aimants. Nécessité de subdiviser ceux-ci. Expression de la puissance perdue par les courants de

Foucault. Distribution du courant alternatif dans la section du conducteur.
Effet Kelvin. Transformation des courants alternatifs. Bobine d'induction.

CHAPITRE XIII. — EFFETS DIVERS DUS AUX COURANTS
ALTERNATIFS p. 298

Rotation sous l'action des courants induits. Répulsion entre un courant inducuteur et induit. Décharge oscillante. Arc chantant. Effet d'une décharge instantanée. Expériences de Lodge. Application aux parafoudres. Expériences de Hertz. Relation de Maxwell. Télégraphie sans fil.

CHAPITRE XIV. — MESURES. DES ERREURS ET DE LEUR
APPRÉCIATION. p. 311

Mesures directes. Erreurs constantes ou systématiques, variables ou fortuites, moyenne, relative moyenne. Mesures indirectes. Erreur absolue, relative.

§ 1. — Détermination des unités. Mesures absolues. p. 313

Détermination de l'ohm. Cadre tournant, méthode de Weber. Méthode de Lippmann. Détermination de l'ampère, du nombre π .

§ 2. — Mesures relatives.

INTENSITÉS ET QUANTITÉS p. 316

Par les effets électromagnétiques ou calorifiques. Par les effets chimiques. Courants faibles, courants intenses.

MESURE DES RÉSISTANCES. p. 319

Pont de Wheatstone. Théorie générale. Pont à fil divisé. Mesure de la résistance d'un galvanomètre. 1^o Méthode de Kelvin. 2^o De la déviation réduite. Mesure de la résistance d'un voltmètre. Emploi du galvanomètre différentiel. 1^o La résistance à mesurer est plus grande que celle des enroulements. 2^o Les résistances à comparer sont beaucoup plus faibles que celles des enroulements du galvanomètre. 3^o Les résistances à comparer sont très différentes. 4^o Emploi d'un galvanomètre non exactement différentiel. Mesure des faibles résistances. A. La résistance de comparaison et la résistance à mesurer ne diffèrent pas notablement. B. La résistance à mesurer est beaucoup plus faible que celle de comparaison. Méthode de M. Rousseau. Mesure des grandes résistances. (Résistance d'isolement). Méthode de comparaison. Mesure de la résistance intérieure d'une pile. Méthode de la perte de charge. Mesure des résistances liquides. 1^o Emploi d'électrodes impolarisables. 2^o Sondes électriques de M.

Lippmann. 3^e Emploi du courant alternatif. Pont de Kohlrausch. *Mesure d'une différence de potentiel ou d'une force électromotrice*. Emploi de l'électromètre à quadrants. Emploi du galvanomètre balistique. Méthode de comparaison.

MESURE DES DIFFÉRENCES DE PHASE p. 339

Entre une force électromotrice et son courant : 1^e Méthode du wattmètre ; 2^e Méthode graphique de M. Janet. *Déférence de phase entre deux courants* : Méthode de Blakesley ou des trois électrodynamomètres ; Appareils spéciaux.

MESURE DES CAPACITÉS p. 340

MESURE DES COEFFICIENTS D'INDUCTION. p. 340

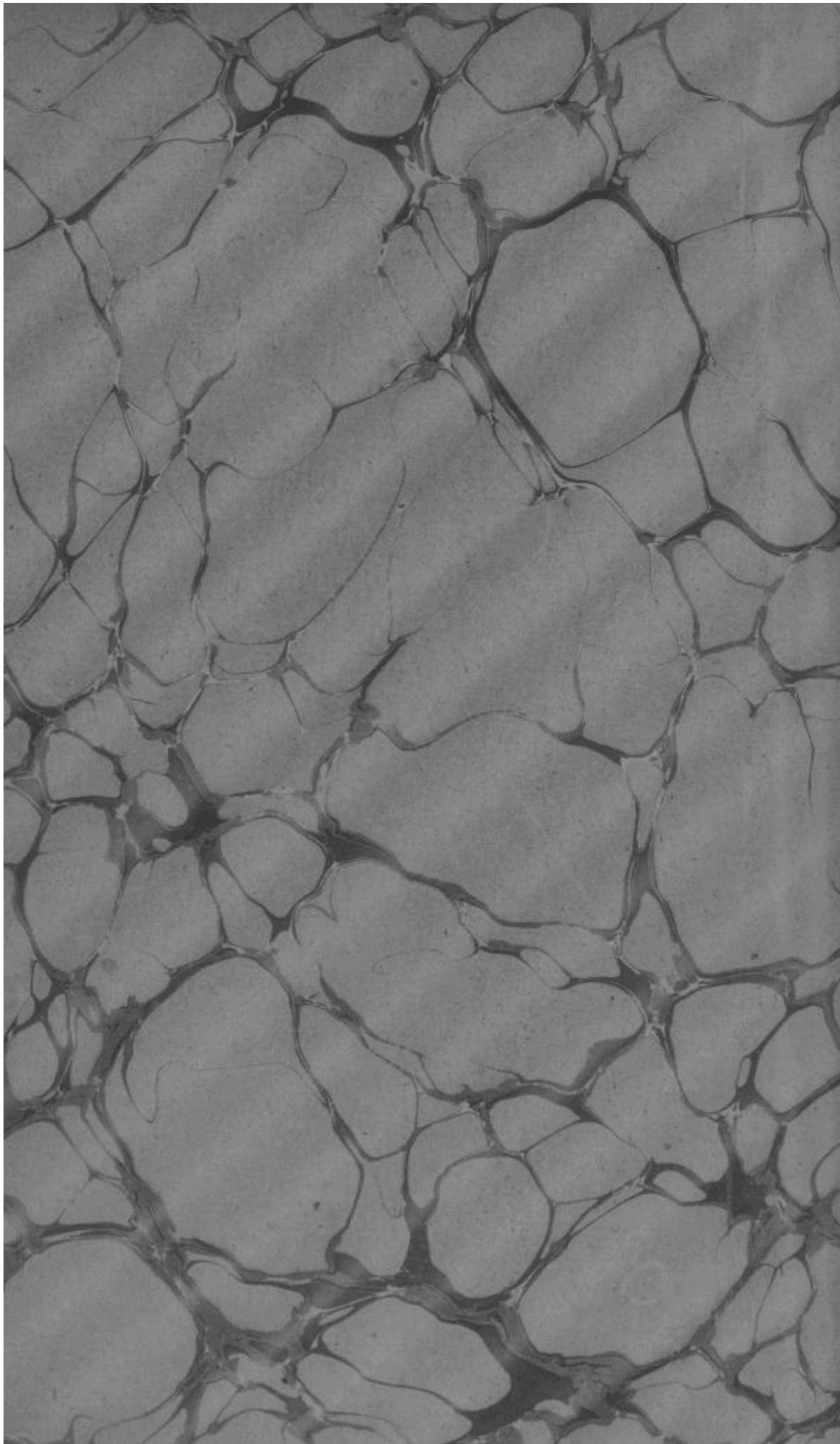
Selfinduction. Méthode de Vaschy et de la Touanne. *Induction mutuelle* : 1^e Méthode de Vaschy. 2^e Dispositif de réduction à zéro.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHAMPS MAGNÉTIQUES p. 343

Champ magnétique terrestre : 1^e Par le magnétomètre ; 2^e Par l'inclinomètre de Weber. *Champ magnétique d'une dynamo* : 1^e Par induction ; 2^e Par la spirale de bismuth.

MESURE DE LA PERMÉABILITÉ ET DE L'HYSTÉRÉSIS p. 344

1^e *Méthode basée sur la force portante* : Perméamètre d'Hopkinson. 2^e *Méthode magnétométrique d'Ewing* : 3^e *Emploi du galvanomètre balistique* : a) Méthode d'Hopkinson ; b) Méthode d'Ewing.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

