

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

A LA MÊME LIBRAIRIE

OUVRAGES DE M. E. HOSPITALIER

- Les principales applications de l'Électricité.** 3^e édition. 1 vol. gr. in-8, 140 figures et 4 planches. Prix..... 7 fr. 50
- L'Électricité dans la maison,** 2^e édition, 1 vol. gr. in-8, 160 figures. Prix..... 7 fr. 50
- Les compteurs d'Énergie électrique.** 1889. Brochure in-8..... 2 fr.
- Formulaire pratique de l'Électricien.**
- Le *Formulaire pratique de l'électricien* paraît chaque année depuis 1883 dans le format des agendas.
- « Il a pour but de fournir aux électriciens de profession, comme aux amateurs d'électricité, les *formules*, les *notions fondamentales* qui se rattachent à leurs opérations; les *recettes* et les *procédés* qui leur sont utiles. »
- L'année 1890 correspond au 8^e volume.
- Prix du volume cartonné..... 5 fr.
-

- L'Électricien,** Revue générale d'électricité (10^e année), paraissant tous les samedis. Abonnement annuel..... 20 fr.

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

PAR

E. HOSPITALIER

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

PROFESSEUR A L'ÉCOLE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES DE LA VILLE DE PARIS

RÉDACTEUR EN CHEF DE *L'Électricien*

TOME PREMIER

DÉFINITIONS — PRINCIPES — LOIS GÉNÉRALES
APPLICATIONS A LA MESURE

PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, boulevard Saint-Germain, en face de l'École de Médecine.

—
1890

Droits de traduction et de reproduction réservés.

PRÉFACE

J'appelle un chat un chat...

(BOILEAU, Art poétique.)

Les ouvrages traitant de la science électrique au point de vue de ses applications industrielles sont aujourd'hui si nombreux qu'il peut paraître téméraire de chercher à en augmenter le nombre.

Il nous a semblé cependant que les livres de science pure étaient, en général, écrits avec une préoccupation insuffisante des applications auxquelles la théorie peut donner lieu, tandis que les traités industriels, au contraire, ne tenaient pas assez compte des enseignements de la théorie.

Le cours que nous professons depuis sept ans à l'École de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris, et dans lequel nous nous efforçons d'allier intimement la théorie et ses applications, nous a convaincu qu'il y avait place pour un traité élémentaire écrit dans le même esprit que notre enseignement et sous l'empire de cette préoccupation constante.

Telle est l'origine du *Traité élémentaire de l'Énergie électrique* dont nous présentons aujourd'hui la première partie au public.

Ce premier volume est consacré à l'exposé des définitions, des principes, des lois générales de la science électrique et de leurs applications à la mesure. Le second volume passera en revue les applications industrielles. Tous deux sont exclusive-

ment basés sur le système C. G. S. et le système pratique qui en a été déduit pendant ces dernières années.

C'est que le système C.G.S. a révolutionné la science électrique, et l'on peut affirmer qu'il présente aujourd'hui un caractère d'universalité plus grand que le système métrique dont il dérive. L'*ohm*, le *volt*, l'*ampère*, le *coulomb*, le *faraad*, le *watt* et le *joule* sont aujourd'hui familiers aux électriciens du monde entier, depuis le savant le plus illustre jusqu'au plus modeste conducteur de machines dynamos. Nous avons donc suivi pas à pas le développement du système C.G.S. et adopté invariablement, dans tout le cours de l'ouvrage, les définitions établies par les Congrès des Électriciens de 1881 et de 1889, les unités qui en dérivent, des symboles et des notations toujours les mêmes pour représenter les mêmes quantités physiques et les unités qui leur servent de commune mesure.

Nous pensons, en effet, qu'il faut un mot, et autant que possible, *un seul mot*, pour désigner chaque chose distincte d'une autre chose, un symbole spécial pour représenter chaque quantité physique distincte d'une autre quantité physique, une unité spéciale pour comparer entre elles les quantités physiques de même nature.

En vue d'économiser les symboles, et en tenant compte des hypothèses que l'état actuel de la science impose encore l'obligation d'introduire pour définir les quantités électriques dans les systèmes électromagnétique et électrostatique, nous avons représenté par la même lettre les quantités physiques qui, sans être de même nature, ont cependant les mêmes *dimensions* et se mesurent avec les mêmes unités. L'application rigoureuse de ces principes nous a permis de n'écrire que des équations cohérentes, concrètes, et toujours homogènes dans le système d'où elles dérivent.

Les formules ne sont plus alors de simples relations numériques entre les différentes grandeurs qui interviennent dans les calculs ; elles représentent de véritables équivalences phy-

siques : les symboles précisent ces formules, les gravent dans l'esprit et laissent mieux voir leur coordination. Sauf mention spéciale de l'emploi des unités pratiques, les résultats des calculs sont exprimés en unités C.G.S. lorsque l'on remplace les symboles par les valeurs numériques des quantités qu'ils représentent, exprimées elles-mêmes en unités C.G.S. Grâce à cette méthode, les exemples d'applications numériques des formules sont devenus inutiles, et nous avons pu traiter symboliquement un plus grand nombre de problèmes sans donner à ce traité des proportions démesurées.

La méthode graphique nous a été aussi d'un grand secours dans tous les cas où la complexité des formules rendait leur discussion difficile.

Il nous suffit d'avoir signalé les points essentiels qui caractérisent ce traité, dans lequel nous n'avons épargné aucune peine pour en faire l'expression résumée, mais exacte, de la science électrique appliquée sous sa forme la plus moderne. Un index alphabétique, placé à la fin du volume, en rendra l'usage plus commode.

Qu'il nous soit permis, en terminant, de remercier nos anciens élèves, MM. Roux et Laffargue, de l'utile concours qu'ils ont bien voulu nous prêter pour la correction des épreuves.

E. H.

Paris, novembre 1889.

TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

Quantités, grandeurs et unités physiques basées sur le système C.G.S.

Quantités et unités fondamentales. — Quantités et unités dérivées géométriques et mécaniques. — Méthodes de mesures. — Mesure des angles, des déviations et des couples.....	1 à 36
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------

CHAPITRE PREMIER

Notions générales de magnétisme.

Système magnétique C.G.S. — Champ magnétique. — Induction magnétique. — Magnétisme terrestre.....	37 à 59
---------------------------------------------------------------------------------------------------	---------

CHAPITRE II

Notions générales d'électrostatique.

Système électrostatique. — Induction électrostatique. — Condensation. — Capacités. — Énergie potentielle des charges électriques.	60 à 97
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------

CHAPITRE III

Courant électrique. — Système électromagnétique C.G.S.

Loi d'Ohm. — Champ galvanique. — Système électromagnétique C.G.S. — Principe des galvanomètres. — Unités électromagnétiques G.G.S. pratiques.....	98 à 118
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------

CHAPITRE IV

Résistances.

Résistance. — Résistance spécifique. — Conductibilité. — Étalons de résistance. — Mesure des résistances. — Applications des lois des résistances.....	119 à 148
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

CHAPITRE V

Intensités. — Galvanométrie.

Champ galvanique. — Galvanomètres à circuit fixe et à circuit mobile. — Appareils de mesure industriels. — Propriétés générales des galvanomètres.....	149 à 192
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

CHAPITRE VI

Potentiels. — Électrométrie.

Électromètres à répulsion, symétriques, à quadrants. — Électromètres absolus. — Électromètres-balances. — Applications des électromètres.....	193 à 223
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

CHAPITRE VII

Générateurs d'énergie électrique théoriques.

Générateurs à force électromotrice constante. — Couplage des générateurs. — Lois des circuits électriques. — Mesure des constantes des générateurs électriques. — Générateurs à force électromotrice périodique.....	224 à 246
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

CHAPITRE VIII

Quantités et capacités. — Méthode balistique.

Condensateurs parfaits ou absolus. — Condensateurs à diélectrique solide. — Méthode balistique. — Applications des condensateurs et de la méthode balistique. — Relations entre les grandeurs et les unités des systèmes électrostatique et électromagnétique C.G.S..	247 à 268
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

CHAPITRE IX

Phénomènes de contact. — Electrochimie.

Loi de Volta. — Lois générales des actions électrochimiques. — Piles hydro-électriques. — Électrolyse. — Voltamètres. — Piles réversibles, piles secondaires ou accumulateurs.....	269 à 325
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

CHAPITRE X

Électrothermie.

Actions calorifiques du courant. — Thermo-électricité. — Générateurs thermo-électro-chimiques. — Applications des générateurs thermo-électriques.....	326	355
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----	-----

CHAPITRE XI

Électrodynamique.

Loi d'Ampère. — Électrodynamomètres. — Mesure des courants périodiques.....	356 à	377
-----------------------------------------------------------------------------	-------	-----

CHAPITRE XII

Compléments de magnétisme. — Aimantation due aux courants.

Potentiel magnétique. — Énergie potentielle et intrinsèque des aimants. — Champ galvanique. — Circuit magnétique. — Aimantation due aux courants. — Induction magnétique. — Diamagnétisme. — Electro-aimants.....	378 à	423
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------	-----

CHAPITRE XIII

Induction électromagnétique.

Lois générales. — Courants de Foucault. — Détermination de l'unité de résistance électrique et de l'induction magnétique. — Rotations electro-magnétiques. — Moteurs électriques.....	424 à	457
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------	-----

CHAPITRE XIV

Self-induction.

Coefficient de self-induction. — Extra-courants. — Détermination des coefficients de self-induction. — Circuits de perméabilité magnétique variable.....	458 à	483
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------	-----

CHAPITRE XV

Induction mutuelle.

Cas général. — Cas particuliers. — Bobine d'induction parfaite. — Calcul des coefficients d'induction. — Détermination expérimentale des coefficients d'induction mutuelle. — Applications. — Bobine d'induction. — Transformateurs. — Balance d'induction.....	484 à	513
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------	-----

CHAPITRE XVI

Courants alternatifs.

Générateurs à courant périodique. — Circuits inductifs. — Transformateurs. — Propagation des courants périodiques dans un conducteur. — Répulsions électrodynamiques. — Électrolyse.....	514 à 542
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

CHAPITRE XVII

Compléments de mesure.

Résistances. — Intensités. — Potentiels. — Champs magnétiques. — Puissance. — Énergie.....	543 à 568
--------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

CHAPITRE XVIII

Questions diverses.

Machines d'induction électrostatique. — Pyro-électricité. — Piézo-électricité. — Phénomènes électro-capillaires. — Électro-optique. — Idées modernes sur l'identité des phénomènes électriques, magnétiques et lumineux.....	569 à 588
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

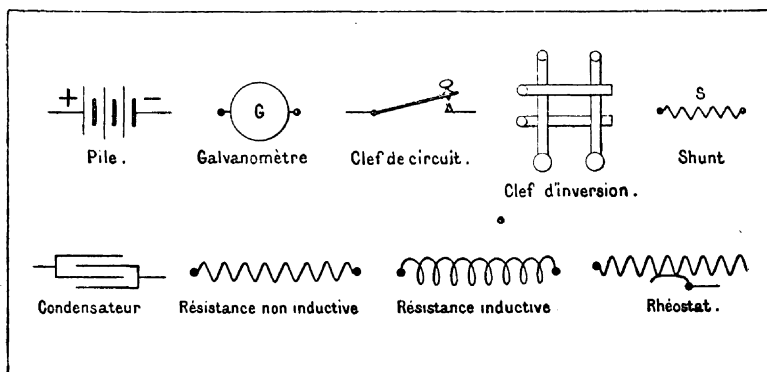
INDEX ALPHABÉTIQUE.....	589
-------------------------	-----

NOTATIONS, ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

<p>C capacité, degré centigrade.</p> <p>D densité.</p> <p>E force électromotrice.</p> <p>F force.</p> <p>G résistance d'un galvanomètre.</p> <p>H intensité de champ magnétique.</p> <p>I intensité de courant.</p> <p>K moment d'inertie.</p> <p>L longueur.</p> <p>L_s coefficient de self-induction.</p> <p>L_m coefficient d'induction mutuelle.</p> <p>M masse.</p> <p>N nombre abstrait.</p> <p>P puissance.</p> <p>Q quantité d'électricité.</p> <p>R résistance électrique.</p> <p>S surface.</p> <p>T temps.</p> <p>V volume, potentiel.</p> <p>W énergie, travail, quantité de chaleur, moment d'une force ou d'un couple.</p> <p>c centi.</p> <p>cm centimètre.</p> <p>cm² centimètre carré.</p>	<p>cm³ centimètre cube.</p> <p>d déci. différentielle.</p> <p>g gramme.</p> <p>h hecto.</p> <p>k kilo.</p> <p>kg kilogramme.</p> <p>kgm kilogrammètre.</p> <p>log logarithme décimal.</p> <p>log_e — népérien.</p> <p>m milli, mètre, minute.</p> <p>m² mètre carré.</p> <p>m³ mètre cube.</p> <p>mg milligramme.</p> <p>mm millimètre.</p> <p>mm² millimètre carré.</p> <p>mm³ millimètre cube.</p> <p>s seconde de temps.</p> <p>c capacité.</p> <p>d diamètre, distance.</p> <p>e base des logarithmes népériens, différence de potentiel.</p> <p>f force.</p> <p>g accélération due à la pesanteur.</p> <p>i intensité de courant.</p> <p>h capacité inductive spécifique constante.</p> <p>l longueur.</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

m	intensité de pôle magnétique.	λ	décroissement logarithmique.
n	nombre abstrait.	μ	perméabilité magnétique.
p	pression.	π	rapport de la circonférence au diamètre.
q	quantité, charge électrostatique.	ρ	résistance magnétique spécifique, résistance d'isolement.
r	résistance intérieure, rayon.	σ	densité électrique.
s	section.	ω	vitesse angulaire.
t	temps.	Φ	flux de force magnétique.
v	vitesse.	\mathcal{B}	induction magnétique spécifique.
z	équivalent électrochimique.	\mathcal{F}	force magnétomotrice.
α	résistance spécifique.	\mathcal{H}	force magnétisante ou intensité de champ magnétique.
α, β	angles.	\mathcal{J}	intensité d'aimantation.
γ	accélération.	\mathcal{M}	moment magnétique.
δ	déviaton.	\mathcal{P}	potentiel magnétique.
ε	écart ou élongation.	\mathcal{R}	résistance magnétique.
η	rendement.		
θ	température.		
χ	susceptibilité magnétique.		

SIGNES CONVENTIONNELS.



TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

INTRODUCTION

QUANTITÉS, GRANDEURS ET UNITÉS PHYSIQUES BASÉES SUR LE SYSTÈME C.G.S.

1. Énergie électrique. — Tous les phénomènes dont nous étudions les manifestations, mais dont la nature intime nous échappe, ne sont que des transformations plus ou moins complexes de la matière et de l'énergie, transformations opérées sans destruction de matière ni d'énergie.

La *conservation de la matière* et la *conservation de l'énergie* sont donc les deux grands principes ou axiomes fondamentaux qui doivent servir de base à toute étude consacrée aux phénomènes chimiques et physiques.

Les plus curieux et, peut-être, les plus intéressants des phénomènes physiques sont ceux qu'on attribuait autrefois à un fluide spécial, l'ÉLECTRICITÉ et dont le nom est resté et sert le plus souvent à désigner un ensemble de phénomènes appelés eux-mêmes *phénomènes électriques*.

Dans les vues de la science moderne, les phénomènes électriques ne sont plus considérés que comme un mode spécial de mouvement, une manifestation particulière d'une certaine forme de l'énergie, l'*énergie électrique*, ce qui justifie le titre donné à cet ouvrage.

L'énergie électrique est donc, pour nous, de l'énergie d'une forme particulière, capable de produire, par ses transformations, une autre forme de l'énergie (chaleur, travail, affinité chimique) ou d'être produite par la transformation d'une des autres formes de l'énergie en énergie électrique.

Nous devons donc tout d'abord, avant d'aborder cette étude, essayer de définir l'énergie électrique, sinon dans sa nature, du moins dans les propriétés qui la caractérisent et la différencient des autres formes de l'énergie.

La propriété la plus caractéristique de l'énergie électrique est celle qu'elle possède de pouvoir produire instantanément ses effets à distance, à la condition qu'on réunisse par un circuit conducteur le *générateur* ou source d'énergie électrique, et le *récepteur* dans lequel ses effets se manifestent.

Les effets de l'énergie électrique sont nombreux et variés : les principaux sont les suivants : calorifiques, lumineux, chimiques, mécaniques, magnétiques et physiologiques. Il n'y a, *a priori*, aucune raison de commencer l'étude des phénomènes électriques par l'un ou l'autre de ces effets, mais depuis que la mesure s'est introduite dans la science électrique, au plus grand profit de ses applications industrielles, il est devenu nécessaire, indispensable même d'aborder tout d'abord l'étude des effets *magnétiques* de l'électricité, parce que les unités, les appareils et les méthodes de mesure sont fondés en grande partie sur les actions magnétiques du courant électrique.

En procédant ainsi, nous serons très rapidement en possession de termes de comparaison pour juger de la grandeur de ces effets et pour en avoir les expressions *numériques*, les seules qui présentent un intérêt pratique.

2. Unités, étalons et systèmes. — Mesurer une quantité physique, c'est comparer sa grandeur à celle d'une quantité physique de même espèce prise comme *unité*.

Un *étalon* est la représentation matérielle de la grandeur servant d'unité de mesure à une quantité physique.

L'unité choisie pour chaque quantité physique peut être arbitraire dans son essence ainsi que dans ses subdivisions. C'est ainsi d'ailleurs que les anciens systèmes étaient établis. On a reconnu, par la suite, l'utilité pratique de choisir les

unités de façon à conserver entre elles des rapports simples, et d'adopter, pour simplifier les calculs, des subdivisions conformes à notre système de numération, c'est-à-dire des multiples et des sous-multiples *décimaux*.

Pour conserver des rapports simples entre les différentes unités, on en choisit un petit nombre qui servent de base et constituent les quantités et unités *fondamentales*. Les autres s'en déduisent par une série de définitions et constituent les quantités et unités *dérivées*.

L'ensemble des quantités et unités physiques, fondamentales et dérivées, forment un *système*.

3. Choix d'un système. — Le choix des quantités fondamentales et des unités qui doivent servir de comparaison à leurs grandeurs est lié à certaines conditions que doivent réaliser ces unités fondamentales. Il faut que les comparaisons soient rigoureuses, possibles en tout temps et en tout lieu, faciles et directes.

Gauss, qui a créé le premier *système absolu*, reconnu que les trois quantités physiques répondant le mieux à ces conditions étaient :

*Une longueur définie,
Une masse définie,
Un temps défini;*

et il adopta un système d'unités basé sur le *millimètre*, le *milligramme* et la *seconde*, système connu et désigné aujourd'hui sous le nom de *Système de Gauss*.

4. Système C.G.S. — Tout en conservant les mêmes quantités physiques fondamentales, l'*Association Britannique* créa un système d'unités basé sur le *mètre*, le *gramme-masse* et la *seconde*, mais il présentait certains inconvénients. Dans ce système, par exemple, la densité de l'eau, définie comme le rapport de sa masse à son volume, était exprimée par le nombre 1 000 000 au lieu de l'être par le nombre 1. Sur les instances répétées de sir William Thomson, l'*Association britannique* modifia l'unité fondamentale de longueur et adopta le centimètre au lieu du mètre.

Lé *Congrès international des Électriciens*, tenu à Paris en

1884, a sanctionné ce choix et rendu ce système international, sous le nom de : Système centimètre-gramme-seconde, ou, par abréviation :

SYSTÈME C.G.S.

C'est celui dont nous ferons *exclusivement* usage dans cet ouvrage.

5. Dimensions des quantités physiques. — Toutes les quantités physiques peuvent se déduire, par une série de définitions, des trois quantités fondamentales prises comme bases du système. Il en résulte que toute quantité physique peut être exprimée en fonction de ces trois quantités, et de ces trois quantités seulement. Cette expression s'appelle *dimensions* de la quantité physique.

Exemple : une surface est le produit d'une longueur par une longueur. L'expression d'une surface est donc : $L.L=L^2$.

On dit alors que les dimensions d'une surface sont L^2 .

De même une vitesse est le rapport d'une longueur à un temps.

$$\text{Vitesse} = \frac{\text{longueur}}{\text{temps}} = \frac{L}{T} = L T^{-1}.$$

Le rapport des grandeurs de deux quantités de même nature est un nombre, c'est-à-dire qu'il n'a pas de dimensions. Le rendement, l'équivalent mécanique de la chaleur, la perméabilité magnétique, etc., etc., sont des nombres, c'est-à-dire de simples coefficients numériques.

Le rapport ou le produit des grandeurs de deux quantités de nature différente, bien qu'étant aussi un nombre, puisque le nombre qui exprime la grandeur de chacune des quantités n'est lui-même que le rapport de la grandeur considérée à la grandeur prise comme unité, a des dimensions, parce qu'il résulte du rapport ou du produit de deux grandeurs d'espèce essentiellement différente. C'est la condition nécessaire à l'homogénéité des relations établies entre les différentes quantités physiques.

6. Homogénéité des équations. — Les quantités physiques déduites les unes des autres par une série de définitions

successives, et à l'aide de certaines hypothèses fondamentales, forment un *système*. Une équation de relation entre plusieurs quantités physiques doit toujours être *homogène*, c'est-à-dire que les différents termes de l'équation exprimés en fonction des quantités fondamentales doivent avoir les mêmes dimensions.

Ainsi, pour fixer les idées, le nombre qui mesure une vitesse doit toujours être le rapport du nombre qui mesure une longueur au nombre qui mesure un temps, et en étendant cette définition aux quantités physiques elles-mêmes, quelles que soient les unités dont il soit fait usage, on a le droit de considérer une vitesse comme le rapport d'une longueur à un temps. L'équation de dimensions d'une quantité physique devient ainsi son *équation de définition*.

Toutes les quantités physiques et les unités correspondantes se déduisent, par une série de définitions successives, de trois quantités et unités fondamentales.

QUANTITÉS ET UNITÉS FONDAMENTALES.

7. Longueur (L). — La notion de longueur découle directement des notions de l'*espace* et de l'*étendue*. La longueur est l'une des trois quantités fondamentales du système C.G.S.

Dans les équations de dimensions, la longueur s'indique par le symbole L.

L'unité C.G.S. de longueur est le *centimètre*.

Le *centimètre* est la centième partie du mètre, le mètre étant lui-même la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. Pratiquement le centimètre est la centième partie du *mètre-étalon* déposé aux Archives, et c'est à cet étalon que toutes les longueurs sont rapportées.

8. Masse (M). — La masse est une propriété essentielle de la matière, inséparable de la matière elle-même, indestructible comme elle, et dont dépendent un grand nombre de propriétés mécaniques, physiques et chimiques.

La permanence et l'indestructibilité de la matière ont fait choisir la masse comme une des trois quantités fondamentales du système C.G.S. On la désigne par le symbole M.

L'unité C.G.S. de masse est la masse d'un centimètre cube d'eau distillée à son maximum de densité. On l'appelle *gramme-masse*. La proportionnalité des masses aux poids (22) rend très faciles les comparaisons des masses entre elles à l'aide de pesées.

Pratiquement, l'unité C.G.S. de masse est la millième partie de la masse du *kilogramme-étalon* déposé aux Archives, à Paris.

9. Temps (T). — La notion de temps n'est pas susceptible d'une définition précise. Elle s'acquiert en admettant que deux phénomènes identiques ont la même durée.

La mesure du temps est basée sur la permanence des phénomènes astronomiques et la durée du *jour solaire moyen*.

Le jour solaire moyen se subdivise lui-même en 24 heures, l'heure en 60 minutes, la minute en 60 secondes.

L'unité C.G.S. de temps est la seconde définie comme la

$\frac{1}{86\,400}$ partie du jour solaire moyen.

La grande précision des appareils servant à la mesure du temps ainsi que l'adoption universelle de la seconde comme unité de temps justifient le choix du *temps* comme l'une des trois quantités fondamentales du système C.G.S.

Le temps est désigné par le symbole T.

10. Multiples et sous-multiples. Notation décimale.

— Suivant la grandeur des quantités à mesurer, les unités adoptées sont tantôt trop grandes, tantôt trop petites pour les besoins de la pratique. On se trouverait ainsi conduit à employer de trop petites fractions ou de trop grands nombres pour exprimer ces quantités en fonction de l'unité adoptée. On a alors établi, pour éviter cet inconvénient, des multiples décimaux et des fractions décimales de ces unités. Ces multiples et sous-multiples s'indiquent sous la forme de *préfixes*. En voici la nomenclature :

MULTIPLES.

<i>Méga</i> ou <i>még</i> ,	désigne une unité	1 000 000	fois plus grande.
<i>Myria</i>		10 000	—
<i>Kilo</i>		1 000	—
<i>Hecto</i>		100	—
<i>Déca</i>		10	—

SOUS-MULTIPLES.

<i>Déci</i> désigne une unité.	10	fois plus petite.
<i>Centi.</i>	100	—
<i>Milli.</i>	1 000	—
<i>Micro</i> ou <i>micr.</i>	1 000 000	—

Au lieu d'employer les multiples ou les sous-multiples, on écrit quelquefois un nombre en le décomposant en deux facteurs, dont l'un est un multiple de 10, que l'on écrit alors en le considérant comme une puissance de 10 et en l'affectant d'un *exposant*. Pour les fractions, l'exposant est négatif.

Ainsi, par exemple, le nombre 459 000 000 s'écrira $459 \cdot 10^6$ ou $45,9 \cdot 10^7$, et la fraction 0,0000459 s'écrira $459 \cdot 10^{-7}$, ou $0,459 \cdot 10^{-4}$.

L'exposant indique de combien de rangs il faut déplacer la virgule, vers la droite pour les exposants positifs, vers la gauche pour les exposants négatifs, pour écrire le nombre entier ou la fraction dans la notation ordinaire. La notation de l'exposant simplifie les calculs et les expressions numériques, et dispense de l'emploi de nombres trop longs.

QUANTITÉS ET UNITÉS DÉRIVÉES GÉOMÉTRIQUES.

11. Surface (S). — Une *surface* est le produit de deux longueurs. Ses dimensions sont : L^2 .

L'unité C.G.S. de *surface* est le *centimètre carré*; c'est la surface d'un carré de 1 centimètre de côté.

12. Volume (V). — Un *volume* est le produit de trois longueurs. Ses dimensions sont : L^3 .

L'unité C.G.S. du *volume* est le *centimètre-cube* : c'est le volume occupé par un cube de 1 centimètre de côté.

13. Angles. — La mesure naturelle de l'angle est le rapport de l'arc au rayon. L'angle se trouvant ainsi défini par le rapport de deux longueurs a pour dimensions zéro. C'est un nombre abstrait. Cette mesure des angles est dite *mesure circulaire*. L'unité de mesure circulaire est le *radian*; c'est l'angle dont l'arc est égal au rayon.

Les angles sont mesurés le plus souvent en degrés sexagésimaux, la circonférence étant divisée en 360 degrés, le degré en 60 minutes d'arc, et la minute en 60 secondes d'arc

$$1 \text{ radian} = \frac{360^\circ}{2\pi} = 57^\circ 17' 44''$$

$$1 \text{ circonférence} = 360^\circ = 2\pi \text{ radians} = 6,2832 \text{ radians.}$$

La mesure des longueurs des surfaces, des volumes, des angles et de leurs relations fait l'objet de la géométrie et de la trigonométrie : nous n'avons donc pas à nous en occuper ici.

QUANTITÉS ET UNITÉS DÉRIVÉES MÉCANIQUES.

La *mécanique* est l'étude du mouvement et de ses causes. On appelle *force* toute cause de mouvement. Tout corps en mouvement est un *mobile*. On le suppose, pour l'étude, réduit à des dimensions infiniment petites et on lui donne le nom de *point matériel*. Le point matériel conserve toutes les propriétés de la matière.

14. Mouvement d'un point matériel. — Le mouvement d'un mobile est essentiellement *continu*, c'est-à-dire qu'il ne peut se déplacer d'un point à un autre sans décrire une ligne continue, rectiligne ou curviligne, plane ou gauche, qui est sa *trajectoire*.

Le mouvement d'un mobile est déterminé lorsqu'on connaît sa trajectoire et sa position sur cette trajectoire à chaque instant. Cette position est définie par l'instant initial et l'espace.

L'*instant initial* ou *origine des temps* est le moment à partir duquel on commence à compter le temps du déplacement. L'*espace* est la longueur du chemin parcouru par le mobile à partir de l'instant initial. L'espace est une longueur et se mesure en centimètres. Les temps se mesurent en secondes sexagésimales. Lorsqu'un mobile parcourt des espaces égaux dans des temps égaux, on dit qu'il est animé d'un *mouvement uniforme*

15. Vitesse (v). — Lorsqu'un mobile est animé d'un mouvement uniforme, on appelle *vitesse* du mobile le rapport de l'espace parcouru L au temps T mis à le parcourir :

$$v = \frac{L}{T}$$

La *vitesse* est le rapport d'une longueur à un temps. Les dimensions de la vitesse sont : LT^{-1} .

L'unité C. G. S. de vitesse est le *centimètre par seconde*.

16. Vitesse angulaire (ω). — Lorsqu'un point placé à une distance r d'un axe de rotation est animé d'une vitesse uniforme v , sa vitesse est proportionnelle à cette distance r et à un facteur ω qu'on appelle *vitesse angulaire*.

$$v = \omega r; \quad \omega = \frac{v}{r}$$

La vitesse angulaire est homogène à l'inverse d'un temps. Ses dimensions sont : T^{-1} .

L'unité C. G. S. de vitesse angulaire est le *radian par seconde*. Un point dont la vitesse angulaire est de 1 radian par seconde fait une révolution complète en $2\pi = 6,2832$ secondes.

Dans la pratique industrielle, les vitesses angulaires sont le plus souvent exprimées en tours par minute. Pour exprimer sa valeur en unités C. G. S., il suffit de multiplier la vitesse angulaire exprimée en tours par minute par le facteur $\frac{2\pi}{60}$.

Un mobile dont la vitesse n'est pas uniforme est animé d'un *mouvement varié*. Sa vitesse à chaque instant v_t est alors égale à la dérivée de l'espace par rapport au temps :

$$v_t = \frac{dl}{dt}$$

17. Mouvement uniformément varié. — Lorsque la vitesse d'un mobile varie proportionnellement au temps, le mouvement est dit *uniformément varié*.

En appelant v_0 la vitesse initiale, v_t sa vitesse à l'instant t et γ la quantité dont la vitesse varie par unité de temps, on a au bout du temps t :

$$v_t = v_0 + \gamma t$$

d'où l'on tire

$$\gamma = \frac{v_t - v_0}{t}$$

18. Accélération (γ). — Le facteur γ s'appelle l'*accélération* du mouvement. C'est le rapport de l'accroissement de la vitesse à l'accroissement du temps. L'*accélération* est le rapport d'une vitesse à un temps. Ses dimensions sont : LT^{-2} .

L'*unité C.G.S. d'accélération* est le centimètre par seconde par seconde. C'est l'accélération d'un mobile dont la vitesse s'accroît de 1 centimètre par seconde.

L'accélération due à la pesanteur pour un corps tombant à Paris, dans le vide, est de 980,88 centimètres par seconde par seconde. On l'indique par le facteur g . Ce facteur g n'est donc ni une longueur ni une vitesse, comme l'indiquent trop souvent les traités de physique. Nous adopterons dans tous nos calculs

$$g = 981 \text{ centimètres par seconde par seconde.}$$

19. Inertie. Force (F). **Dyne**. — Un corps en repos ou en mouvement ne peut de lui-même modifier son état de repos ou de mouvement sans l'intervention de causes étrangères auxquelles on donne le nom de *forces*.

Lorsqu'une force constante en grandeur et en direction agit sur un point matériel partant du repos, elle lui communique un mouvement rectiligne et uniformément accéléré.

Réciproquement, si un point matériel se meut en ligne droite d'un mouvement uniformément accéléré, il est soumis à une force constante.

Une force F appliquée à une masse M lui imprime une accélération γ inversement proportionnelle à cette masse et directement proportionnelle à cette force. On a donc

$$\gamma = \frac{F}{M}$$

D'où l'on tire

$$F = M\gamma$$

La force qui s'exerce sur un corps est le produit de la masse de ce corps par l'accélération qu'il lui imprime. Les dimensions de la force sont : LMT^{-2} .

L'*unité C.G.S. de force* est la force qui, appliquée à la masse

du gramme, lui imprimerait une accélération de 1 centimètre par seconde par seconde. On l'appelle ⁽¹⁾ *dyne*.

20. Force exercée par la pesanteur. — La pesanteur imprimant au corps soumis à son action un mouvement rectiligne uniformément accéléré est une force constante en grandeur en direction *pour un point donné* de la terre. On appelle *poids* d'un corps la force exercée par la pesanteur sur ce corps.

Le poids d'un corps de masse constante est variable avec la latitude et l'altitude, et ces variations qui atteignent 0,005 environ entre le pôle et l'équateur ont conduit à choisir la masse ⁽²⁾ de préférence au poids comme quantité physique fondamentale.

L'unité pratique de poids est le *gramme* ou l'un de ses multiples ou sous-multiples. Le poids du gramme est

au pôle. . . .	983,11 dynes
à Paris. . . .	980,88 —
à l'équateur. . .	978,1 —

Un appareil pouvant mesurer la force, tel que le peson à ressort, par exemple, est un *dynamomètre* ⁽³⁾.

21. Poids et masse (M). — Lorsqu'on compare les masses des corps à l'aide de la balance, on trouve, à cause de la constante *g*, que la masse d'un corps en grammes-masse est *numériquement* égale à son poids, ou à la force exercée par la pesanteur sur ce corps, exprimée en *grammes*. De là une confusion résultant de ce que la masse d'un corps est constante, tandis que son poids est variable, et que la masse et le poids d'un corps sont des quantités physiques essentiellement différentes.

Toute confusion disparaît quand on distingue la masse *M* d'un corps et la force *F* que la pesanteur exerce sur ce corps, distinction très facile à établir dans chaque cas particulier. Dans

⁽¹⁾ Son nom exact déduit de sa définition serait : *Gramme-masse-centimètre par seconde par seconde*. Le mot *dyne* est plus commode et plus court.

⁽²⁾ Décision du Comité international des poids et mesures (1887) : *La masse du kilogramme international est prise comme unité pour le service international des poids et mesures*.

⁽³⁾ Le mot *dynamomètre* est aussi appliqué à certains appareils qui servent à mesurer la *puissance* des machines (27). C'est un exemple nouveau de choses essentiellement différentes désignées par un seul et même mot.

le premier cas on l'exprime en gramme-masse, dans le second on l'exprime en dynes ou en grammes (¹).

La balance compare les masses des corps, et n'indique pas leurs *poids* proprement dits.

Lorsqu'un corps placé dans l'un des plateaux d'une balance est équilibré par des *poids marqués* placés sur l'autre plateau, le nombre de poids marqués en gramme représente la masse du corps en *gramme-masse*. Sous ces réserves on fait usage du mot *poids* dans le sens de *masse*, et c'est cette manière de faire que l'usage a universellement consacrée bien qu'elle soit absolument inexacte.

22. Force centrifuge. — La force centrifuge est la réaction qu'un mobile assujéti à décrire une courbe fixe exerce sur cette courbe.

Considérons le cas d'un *mouvement de rotation uniforme*. Soit M la masse placée à une distance r de l'axe et animée d'une vitesse v . La force centrifuge a pour valeur

$$\frac{Mv^2}{r} \text{ dynes.}$$

Si le mobile fait n tours en T secondes, la force centrifuge est égale à

$$M \left(\frac{2\pi n}{T} \right)^2 r \text{ dynes.}$$

Et en appelant ω sa vitesse anglaire (16) en unités C.G.S.

$$M\omega^2 r \text{ dynes.}$$

23. Densité (D). — La *densité* d'un corps est le rapport de sa masse à son volume. Les dimensions de la densité sont ML^{-3} .

L'*unité C.G.S. de densité* est le *gramme-masse par centimètre cube*.

24. Poids spécifique. — Le poids spécifique d'un corps est le rapport de son poids à son volume, le poids spécifique d'un corps est donc une grandeur variable avec g .

Les dimensions du poids spécifique sont : $L^{-2}MT^{-2}$.

Certains auteurs définissent le poids spécifique le rapport du

¹) Un gramme (force) = 981 dynes environ aux latitudes moyennes.

poids, en un point donné, d'un certain volume d'un corps au poids d'un même volume d'eau. Le poids spécifique devient ainsi un simple rapport, *numériquement* égal à la densité définie comme ci-dessus. On évite toute confusion et l'on conserve l'homogénéité des formules en abandonnant la notion du poids spécifique pour ne faire intervenir que la densité dans les calculs.

25. Pression ou intensité de pression (p). — Lorsqu'une force F agit sur une surface S , elle exerce une pression p définie par le rapport de la force à la surface sur laquelle elle s'exerce. On a alors, en supposant la force uniformément répartie sur la surface :

$$p = \frac{F}{S}.$$

Les dimensions de la pression sont : $L^{-1}MT^{-2}$.

L'unité C.G.S. de pression est la *dyne par centimètre carré*.

On emploie aussi quelquefois en pratique :

L'*atmosphère*, pression exercée par une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur, équivalant sensiblement à la pression atmosphérique moyenne (1,033 kilogramme par centimètre carré).

Le *kilogramme par centimètre carré*, unité qui porte en elle-même sa définition, mais que, dans le langage courant et par abréviation, on désigne simplement, mais à tort, par le mot *ki-log* ⁽¹⁾, en sous-entendant les mots *grammes par centimètre carré*.

26. Travail (W). **Erg.** — Lorsqu'une force F agit dans sa direction et sur une distance L , elle produit un *travail* W égal au produit de la force par le chemin parcouru.

$$W = FL.$$

Les dimensions du travail sont L^2MT^{-2} .

L'unité C.G.S. de travail est le travail produit par une dyne agissant sur une distance de 1 centimètre, c'est le *centimètre-dyne* ou *Erg*. Cette unité de travail étant très petite, on emploie plus souvent le mégerg.

(1) Une chaudière timbrée à 5 *kilogs* est une machine dans laquelle la pression de la vapeur peut atteindre 5 kilogrammes par centimètre carré.

$$1 \text{ mégerg} = 1\,000\,000 \text{ ergs.}$$

En pratique, on emploie le grammètre, le kilogrammètre ou la tonne-mètre, unités qui portent elles-mêmes leurs définitions

$$\begin{aligned} 1 \text{ grammètre} &= 98\,100 \text{ ergs.} \\ 1 \text{ kilogrammètre} &= 98,1 \text{ mégergs.} \\ 1 \text{ tonne-mètre} &= 98\,100 \text{ —} \end{aligned}$$

27. Puissance (P) ⁽¹⁾. — Une machine produisant un travail W sera d'autant plus puissante qu'elle mettra un temps moins long à le produire. La *puissance* P d'une machine se mesure par le rapport du travail W qu'elle produit au temps T mis à le produire :

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

Les dimensions de la puissance sont : L^2MT^{-3} .

L'unité C.G.S. de puissance est l'*erg par seconde*. Cette unité étant très petite, on emploie souvent le *mégerg par seconde*.

$$1 \text{ megerg par seconde} = 1\,000\,000 \text{ ergs par seconde.}$$

En pratique, l'unité de puissance est le *kilogrammètre par seconde*.

$$1 \text{ kilogrammètre par seconde} = 98,1 \text{ mégergs par seconde.}$$

L'unité industrielle de puissance, unité essentiellement empirique, est le *cheval-vapeur*.

$$1 \text{ cheval-vapeur} = 75 \text{ kilogrammètres par seconde.}$$

En Angleterre, l'unité industrielle de puissance est le *horse-power* qui vaut 550 foot-pounds par seconde, 33 000 par minute.

$$1 \text{ horse-power} = 75,9 \text{ kilogrammètres par seconde.}$$

Il serait urgent de voir disparaître le cheval-vapeur et le horse-power comme unités industrielles de puissance, car ces

⁽¹⁾ La puissance est improprement dénommée par plusieurs auteurs la *force* ou le *travail*. Nous avons vu que les mots force et travail s'appliquent à des quantités physiques essentiellement différentes.

unités ne font que compliquer inutilement les calculs par l'introduction de coefficients parasites non décimaux.

28. Moment d'une force. Couple. — Le moment d'une force par rapport à un axe est le produit de la projection de cette force sur un plan perpendiculaire à l'axe par la distance de l'axe à cette projection. Le moment d'une force est donc le produit d'une force par une longueur. Il est *homogène* à un travail (26) et s'exprime dans les mêmes unités que lui.

Deux forces parallèles égales et de sens contraire appliquées à un corps solide forment un *couple*. Le *moment d'un couple* est le produit de l'une des forces par leur distance. Le moment d'un couple est homogène à un travail (26) et s'exprime dans les mêmes unités que lui.

29. Impulsion d'une force. — Lorsqu'une force F agit pendant un temps dt , on appelle *impulsion élémentaire de la force* F le produit Fdt de cette force par le temps élémentaire. L'impulsion totale ou *impulsion* est l'intégrale de toutes les impulsions pendant la durée du mouvement fini que l'on considère. L'impulsion d'une force est donc le produit d'une force par un temps et, dans le système C. G. S., s'exprime en *dynes-seconde*. Les dimensions sont : LMT^{-1} .

30. Quantité de mouvement. Principe des quantités de mouvement. — On appelle *quantité de mouvement* d'un mobile de masse M animé d'une vitesse v le produit Mv de sa masse par sa vitesse.

La quantité de mouvement a pour dimensions : LMT^{-1} .

L'unité C. G. S. de *quantité de mouvement* est celle d'un mobile dont la masse est de 1 gramme-masse et la vitesse de 1 centimètre par seconde.

On démontre qu'une force F agissant pendant un temps T sur une masse M lui communique une vitesse v telle que :

$$FT = Mv.$$

L'impulsion d'une force est égale à la quantité de mouvement qu'elle communique à une masse M . Les quantités de mouvement et les impulsions sont donc des quantités physiques de même nature, homogènes et dont les grandeurs, dans le système C. G. S., se mesurent en *dynes-seconde*.

31. Moment d'inertie (K). — Lorsqu'un système matériel est animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe, on appelle *moment d'inertie* du système le produit de la masse de chacun des points matériels par le carré de sa distance à l'axe de rotation.

En appelant m chacune des masses élémentaires, M la masse totale, on a :

$$K = \Sigma m r^2 = M \rho^2$$

ρ est le *rayon de giration* du système, M est sa masse totale en grammes-masse.

Les dimensions du moment d'inertie sont : $L^2 M$.

L'*unité C. G. S de moment d'inertie* est le moment d'inertie d'une masse égale à 1 gramme-masse placée à une distance de 1 centimètre de l'axe de rotation. Cette unité n'a pas reçu de nom spécial ⁽¹⁾.

La détermination des moments d'inertie se réduit à la détermination du carré du rayon de giration. Voici les formules relatives aux corps usuels que nous rencontrerons dans les applications aux mesures électriques.

Parallépipède rectangle (n° 1) :

$$\rho^2 = \frac{a^2 + b^2}{3}.$$

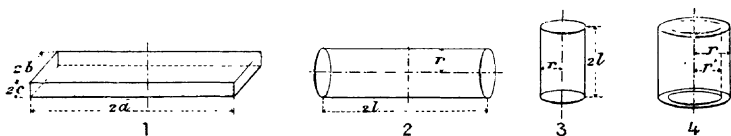


Fig. 1. — Moments d'inertie.

Cylindre plein (n° 2) :

$$\rho^2 = \frac{l^2}{3} + \frac{r^2}{4} = \frac{l^2}{3} \left(1 + \frac{3r^2}{4l^2} \right)$$

Cylindre plein (n° 3) :

$$\rho^2 = \frac{r^2}{2}.$$

⁽¹⁾ On pourrait l'appeler *gramme-masse centimètre carré*, mais ce nom est trop long.

Cylindre creux (n° 4) :

$$\rho^2 = \frac{r^2 + r'^2}{2}.$$

Si l'épaisseur $e = r - r'$ est très petite, on a sensiblement :

$$\rho^2 = r^2 \left(1 - \frac{e}{r} \right)$$

Sphère pleine de rayon r :

$$\rho^2 = \frac{2}{5} r^2.$$

Pour avoir un moment d'inertie maximum et une masse minima, il faut employer une lame mince très allongée. Une lame mince droite a un moment d'inertie $\frac{\pi^2}{3}$ fois plus grand que la même lame roulée sous forme de cylindre creux, mais ce dernier donne un frottement très faible dans l'air.

32. Puissance vive ou **énergie cinétique**. — Lorsqu'une masse M est animée d'une vitesse v , on appelle *puissance vive* (1) de cette masse la moitié du produit de la masse par le carré de sa vitesse

$$\frac{1}{2} Mv^2.$$

La puissance vive est homogène à un travail (26), s'exprime dans les mêmes unités que lui et a le même symbole.

Dans le *mouvement de rotation*, si on appelle K le moment d'inertie du système par rapport à l'axe de rotation, et ω sa vitesse angulaire, on a pour expression de la puissance vive

$$\frac{1}{2} \omega^2 K.$$

Expression également homogène à un travail.

(1) Le mot *puissance vive* a été employé par Bélanger pour établir une distinction entre la puissance vive et la *force vive* qui est le produit Mv^2 et a, par suite, une valeur double. (Voy. *Dictionnaire des mathématiques appliquées*, de Sonnet.)

QUANTITÉS ET UNITÉS PRATIQUES DIVERSES.

Sous ce titre général, nous indiquerons quelques unités physiques qui, bien que ne faisant pas partie du système C. G. S., et n'étant pas officiellement reconnues par le Congrès international des électriciens de 1881, sont cependant acceptées par les savants, d'une manière presque universelle et d'un usage industriel courant.

33. Unité de température. — L'unité de température généralement adoptée est le *degré centigrade*, ou degré Celsius (C. par abréviation).

Il est fondé sur les propriétés thermiques de l'eau distillée à la pression 760 ou pression atmosphérique. Dans l'échelle thermométrique *centigrade* pratique, le 0° est la température de la glace fondante, le 100° celle de l'eau bouillante à la pression 760, et le degré centigrade, la centième partie de cet écart de température divisé en 100 parties égales.

Dans la graduation de *Réaumur*, le 0 correspond à la glace fondante, mais l'ébullition de l'eau se produit au degré 80.

Dans la graduation de *Fahrenheit*, la glace fondante donne le degré 32 et l'eau bouillante le degré 212.

Les températures sont quelquefois indiquées à une certaine échelle dite des *températures absolues*. La valeur du degré est la même que celle du degré centigrade, mais le 0° absolu correspond au -273° du thermomètre centigrade. Pour ramener à la graduation centigrade, il suffit de retrancher 273 du nombre qui exprime la température absolue.

34. Unités de chaleur. — L'unité pratique de chaleur employée en FRANCE prend le nom de *calorie*; c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C. la température de 1 kilogramme d'eau.

L'unité théorique de chaleur est encore assez mal définie, car la chaleur spécifique de l'eau varie avec la température, et la température adoptée comme étalon varie avec les autorités. On prend ordinairement comme base une température intermédiaire entre 0° et 4°C.

Quelques physiciens ont adopté une unité mille fois plus petite, la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer de 1°C.

1 gramme d'eau. Malheureusement, ils lui donnent aussi le nom de *calorie*.

Pour éviter toute confusion dans cet ouvrage, nous distinguerons toujours la calorie (kilogramme-degré) de la calorie (gramme-degré). Cette dernière unité se nomme aussi quelquefois *milli-calorie* ou *petite calorie*.

Une quantité de chaleur pouvant se transformer en une quantité de travail équivalente est donc homogène à un travail et peut s'exprimer dans les mêmes unités que lui (26). C'est, en fait, une forme particulière de l'énergie, et l'unité choisie pour mesurer cette énergie n'est qu'une unité empirique fondée sur les propriétés thermiques de l'eau, et qui n'a aucun lien direct avec le système C. G. S.

35. Équivalent mécanique de la chaleur. — Le rapport de l'unité de chaleur, la calorie (kg-d), à l'unité industrielle de travail, le kilogrammètre, s'appelle l'*équivalent mécanique de la chaleur*. Les expériences faites par Joule et un grand nombre de physiciens indiquent comme valeur la plus probable de l'équivalent mécanique de la chaleur :

$$\frac{1 \text{ calorie (kg-d)}}{1 \text{ kilogrammètre}} = 425.$$

L'équivalent mécanique de la chaleur est donc un nombre abstrait, un simple coefficient nécessaire pour effectuer un changement d'unités, et qui disparaîtra lorsqu'on se sera décidé à mesurer toutes les formes de l'énergie en fonction d'une seule et même unité, l'*erg* et ses multiples décimaux.

L'inverse de l'équivalent mécanique de la chaleur ou rapport du kgm à la calorie (kg-d) est égal à $\frac{1}{425}$ et s'appelle l'*équivalent calorifique du travail*.

GRANDEURS DES QUANTITÉS PHYSIQUES.

Mesurer une quantité physique, c'est la comparer à une autre quantité de même espèce prise comme unité. Le nombre qui résulte de cette comparaison est la *grandeur* de la quantité physique considérée. La détermination des grandeurs phy-

siques s'effectue à l'aide de *mesures*, et les procédés de comparaison constituent des *méthodes de mesure*.

Les mesures des grandeurs physiques sont directes ou indirectes.

Les mesures sont *directes* lorsqu'on compare directement entre elles des quantités de même espèce dont l'une sert d'étalon. Les mesures sont *indirectes* lorsqu'on déduit la grandeur de la quantité cherchée des grandeurs de plusieurs autres quantités entre lesquelles il existe certains rapports définis. La détermination de la grandeur cherchée demande alors un *calcul* plus ou moins complexe. On obtient donc la grandeur d'une quantité physique, soit par une mesure directe, soit par des mesures indirectes et un calcul.

MÉTHODES GÉNÉRALES DE MESURE.

Les méthodes de mesure forment deux grandes classes :

Méthodes directes.

Méthodes indirectes.

36. Méthodes directes. — Les méthodes directes consistent à comparer les quantités à mesurer à des quantités de même espèce prises pour unités. Elles se subdivisent elles-mêmes en méthodes d'opposition, de substitution et de comparaison.

a. *Méthodes d'opposition, différentielles, de réduction à zéro, d'équilibre ou de balance.* — Elles consistent à opposer la grandeur inconnue à une grandeur connue et à réduire à zéro ou à compenser l'effet de la grandeur inconnue par des variations de la grandeur connue. Lorsque l'équilibre est obtenu, on conclut de l'égalité des effets à l'égalité des grandeurs. On a donc à observer la non-existence d'un phénomène ; l'instrument d'observation n'a pas besoin d'échelle, mais il faut un étalon variable ou des étalons gradués. Le type de la méthode est la simple pesée. L'exactitude de la mesure dépend de la sensibilité de l'appareil qui révèle l'égalité d'action.

b. *Méthodes de substitution.* — On enregistre l'effet produit par la quantité à mesurer et on lui substitue une grandeur

connue capable de produire le même effet. L'instrument d'observation doit avoir une graduation qui peut être arbitraire, mais il faut encore un étalon variable ou des étalons gradués. On réduit quelquefois l'un des effets ou les deux effets dans des proportions connues pour ramener les indications dans les limites de l'échelle ou dans de bonnes conditions de sensibilité.

c. Méthodes de comparaison. — On mesure séparément l'effet d'une grandeur fixe connue et celui de la grandeur inconnue : du rapport des effets on déduit celui des grandeurs. Il faut un instrument de mesure, étalonné ou gradué, ou un étalon fixe, mais l'on peut s'en passer si l'on connaît la constante de l'instrument, et la fonction qui relie les grandeurs à mesurer aux indications de l'instrument.

37. Méthodes indirectes. — La grandeur à déterminer se déduit par un calcul des grandeurs de deux ou plusieurs quantités différentes et dont la détermination directe est souvent plus facile ou plus rapide. Certaines grandeurs physiques sont même impossibles à mesurer directement, et l'on doit encore employer la méthode indirecte.

La puissance d'une machine motrice se détermine soit à l'aide d'un diagramme et d'un compteur de tours, soit à l'aide d'un dynamomètre d'absorption et d'un appareil servant à déterminer sa vitesse angulaire.

L'intensité d'un courant électrique se mesure souvent en faisant le rapport de la différence de potentiel aux bornes d'un conducteur de résistance connue intercalé dans le circuit à la résistance de ce conducteur, etc.

38. Mesures géométriques et mécaniques. — Nous laisserons de côté les mesures directes ou indirectes relatives à la détermination des grandeurs des quantités physiques fondamentales, longueur, masse et temps ; ces méthodes et appareils de mesure font l'objet des traités de géométrie et de physique générale, auxquels nous renvoyons le lecteur. Il en est de même pour un grand nombre de grandeurs mécaniques qui rentrent dans le domaine de la mécanique appliquée.

Nous nous réservons seulement d'étudier quelques-unes de ces méthodes de détermination d'une nature tout à fait spéciale,

en étudiant de préférence et à titre d'exemples les cas particuliers que nous rencontrerons le plus souvent dans les applications industrielles de l'énergie électrique.

MESURE DES ANGLES ET DES DÉVIATIONS.

Les déviations des systèmes ou équipages mobiles des appareils de mesure électrique se déterminent :

- 1° *Par lecture directe ;*
- 2° *Par la méthode du miroir.*

39. Lecture directe. — L'équipage mobile porte une longue aiguille ou *index* se déplaçant devant un cercle gradué. Il faut que l'*index* soit le plus près possible du plan pour éviter l'erreur dite de *parallaxe* provenant d'une lecture oblique sur l'échelle. On évite cette erreur en traçant l'échelle sur un miroir, en visant par-dessus avec un seul œil, de telle façon que l'*index* cache son image, et on lit la division correspondante.

Avec un cercle gradué de 16 centimètres de diamètre, il est difficile de lire un angle à moins d'une minute d'arc.

Lorsque l'appareil n'est pas pourvu de miroir, on peut employer un procédé indiqué par M. F. Drouin (1888) qui consiste à appliquer sur le verre qui recouvre, en général, le cadran des appareils gradués, un parallépipède de glace ou de flint. En vertu des lois élémentaires de la réfraction, l'aiguille semblera brisée toutes les fois que le rayon lumineux ne sera pas normal au cadran. La lecture est d'autant plus précise que le parallépipède de flint est plus épais.

40. Méthode du miroir. — La méthode du miroir, imaginée par Poggendorff (1826) permet de lire avec précision des déviations extrêmement petites : elle a été développée et appliquée par Gauss, Weber et sir W. Thomson.

Le principe de la méthode consiste à fixer sur le système mobile, autour d'un axe vertical, par exemple, un miroir dans lequel on observe les déplacements de l'image d'un objet extérieur. On peut alors assimiler ce rayon lumineux à un *index* sans poids de grande longueur.

Les lectures se font à la *lunette* ou par *projection sur une échelle graduée*.

Emploi de la lunette. — Un miroir plan M (fig. 2) suspendu au système oscillant et tournant autour d'un axe vertical, est

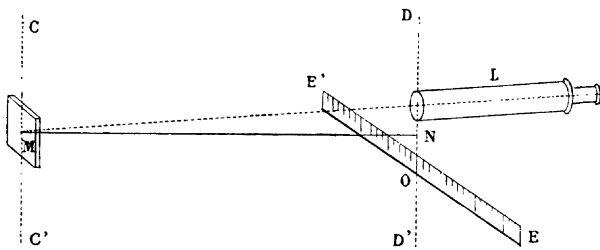


Fig. 2. — Mesure des déviations par la méthode de la lunette.

placé parallèlement à une échelle EE' fortement éclairée disposée à une certaine distance. Au-dessus de l'échelle est une lunette L mobile autour d'un axe horizontal. On la dirige vers le miroir et on la règle pour qu'elle donne une image nette de l'échelle vue par réflexion. On fait coïncider le zéro avec un fil à plomb DD' ou un réticule tendu devant le milieu de l'objectif. Lorsque le système dévie, l'échelle semble se déplacer et lorsque l'équilibre est rétabli, on lit la nouvelle division de

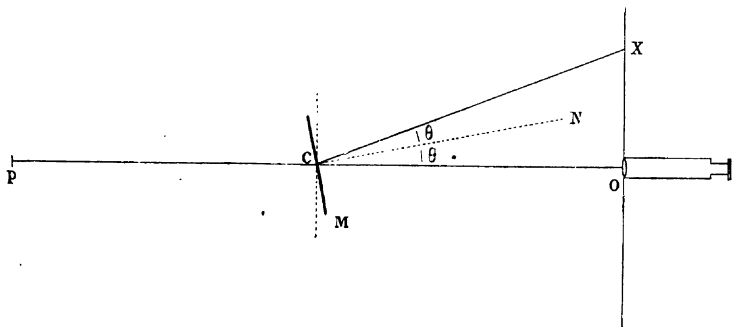


Fig. 3. — Principe de la méthode de la lunette.

l'échelle dont l'image coïncide avec le réticule. On voit (fig. 3) que les angles OCN et NCX sont égaux en vertu des lois de la réflexion, en appelant l la longueur OX , et d la distance CO ,

$$\text{tang } 2 \theta = \frac{l}{d}.$$

Les mesures sont d'autant plus exactes que la distance d est plus grande. Elle atteint souvent 3 et 4 mètres en pratique.

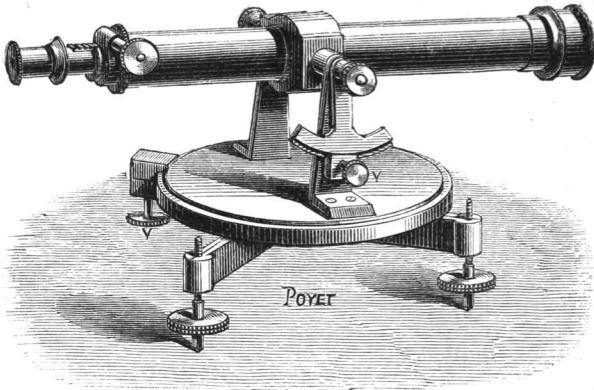


Fig. 4. — Lunette pour la méthode de Pogendorff.

Les échelles sont tracées sur papier, ou, lorsqu'on veut de la précision, sur ivoire ou sur métal. On peut aussi tracer les di-

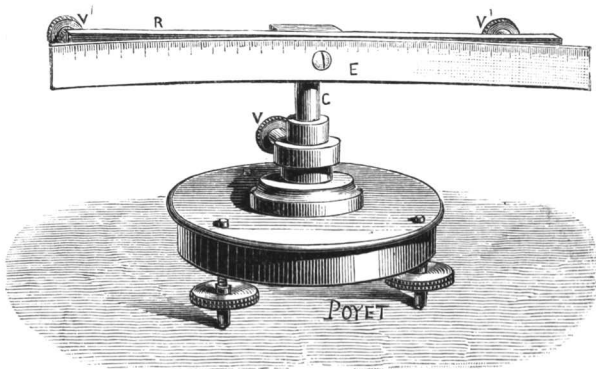


Fig. 5. — Échelle pour la méthode de Pogendorff.

visions sur verre et les éclairer par derrière; les divisions apparaissent alors en noir sur fond brillant; on peut aussi les tracer sur du verre argenté, les traits paraissent alors, en éclairant aussi par derrière, brillants sur fond noir.

Lorsqu'on a besoin d'un repère indépendant du réticule, on place sous le miroir mobile un miroir fixe tout semblable. Ces deux miroirs superposent les images de l'échelle, l'une fixe et l'autre mobile lorsque leurs plans sont parallèles.

La figure 4 est un modèle de lunette mobile appropriée aux observations magnétiques avec son échelle divisée (fig. 5), des étriers portent des miroirs plans et servent à supporter des

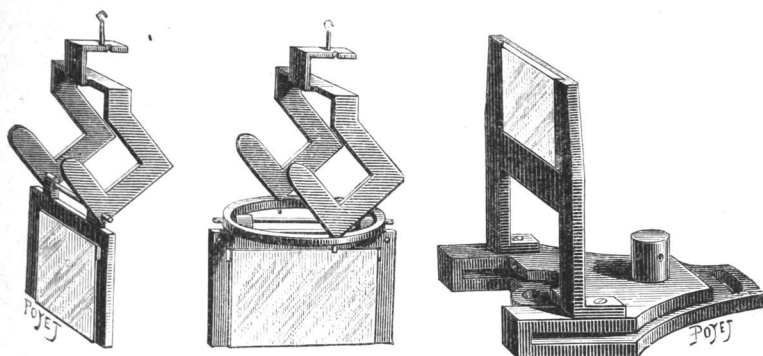


Fig. 6. — Étriers et monture fixe pour les observations magnétiques par la méthode de Poggendorff.

barreaux aimantés ainsi qu'une monture de miroir fixe pour le repérage du zéro (fig. 6).

L'échelle graduée sur une lame d'ivoire, est divisée en demi-millimètres; elle a 20 centimètres de longueur. Elle est fixée en son milieu sur une règle métallique R fixée elle-même à une colonne C qui entre à frottement doux dans un tube métallique faisant corps avec le trépied à vis calantes. Les vis V' servent à régler la courbure de l'échelle pour qu'elle prenne la forme d'un arc de cercle de rayon égal à la distance qui la sépare des miroirs lorsqu'on a à faire des lectures d'angle. L'échelle reste droite lorsqu'on veut connaître les tangentes des angles.

Méthode de projection des images. — Dans la pratique on simplifie la méthode de la lunette en projetant directement sur l'échelle l'image réfléchiée d'un objet lumineux et en faisant une lecture directement sur cette échelle. A cet effet, on emploie un miroir concave, et on place l'échelle et la fente éclairée ou un réticule se détachant dans une surface éclairée dans un même

plan passant par le centre de courbure du miroir, c'est-à-dire au double de la distance focale, et à égale distance de part et d'autre de ce centre dans le sens vertical; l'image de la fente et du réticule se projette alors sur l'échelle en vraie grandeur. On peut employer une échelle *opaque* ou une échelle *transparente*.

Les échelles transparentes sont les plus commodes et tendent à se substituer partout aux échelles opaques.

M. *Ducretet* (1885) emploie une échelle tracée sur papier verni translucide (fig. 7). La source lumineuse est un bec de gaz avec cheminée métallique portant en regard de la flamme une fente

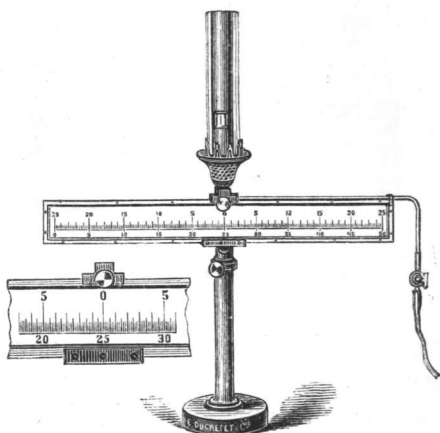


Fig. 7. — Échelle transparente de M. Ducretet.

garnie de mica et un fil tendu constituant le réticule. La lampe est mobile sur le cadre supportant l'échelle, ce qui facilite la remise au zéro.

M. *J. Carpentier* (1884) emploie un système d'échelle transparente qui mérite une mention spéciale (fig. 8 et 9).

Le point lumineux fixe est obtenu à l'aide d'une petite lanterne analogue aux lanternes de voiture, dans laquelle la bougie, contenue dans un tube, est poussée constamment par un ressort vers le bout par lequel passe la mèche. Le corps de la lanterne protège la flamme contre les agitations de l'air et peut se mouvoir le long du tube qui contient la bougie. Suivant la hauteur à laquelle on le fixe, le miroir qui constitue l'un des

fonds de la lanterne peut avoir son centre à la hauteur de la flamme, en dessus ou en dessous. Grâce à ce réglage, on obtient un faisceau lumineux, horizontal ou oblique, ascendant ou descendant, et éclairant convenablement le miroir de l'échelle

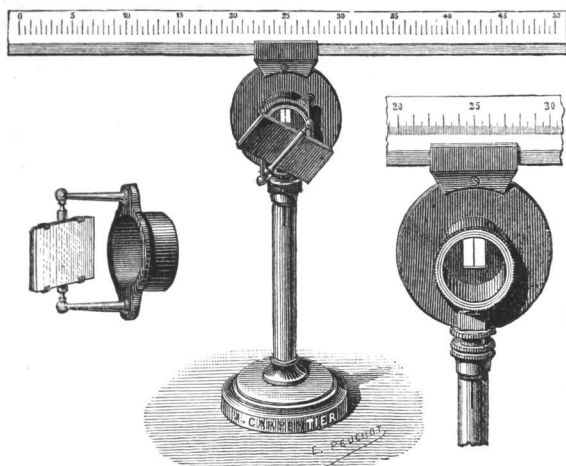


Fig. 8. — Échelle transparente de M. J. Carpentier.

transparente, destiné à réfléchir le faisceau sur le miroir du galvanomètre. On peut même, dans certains cas, utiliser la lumière du jour, si elle est convenablement orientée, à la condition essentielle qu'elle ne vienne pas frapper en plein l'échelle et affaiblir ainsi l'image du réticule.

L'échelle est en celluloid, substance assez translucide, souple et peu fragile; elle est rendue rigide par une garniture métallique pouvant glisser sur son support et permettant de déplacer, suivant les besoins, l'origine des lectures.

L'opérateur est derrière l'échelle, du côté opposé à l'arrivée du rayon lumineux, et peut s'approcher autant qu'il veut sans crainte d'obstruer la marche du faisceau.

Le pied d'optique ayant une base fort petite s'installe partout et encombre peu la table de mesures. Le même pied porte le réticule dont l'image sur la règle sert à définir l'axe du rayon lumineux, et un miroir qui, avec deux mouvements, l'un de pivotage, l'autre de basculement, peut s'orienter à volonté pour

amener la lumière sur le miroir. On augmente la précision des lectures en interposant une loupe entre l'œil et l'échelle.

Méthode optique de M. d'Arsonval (1886). — Cette méthode, qui permet de lire de très faibles déviations angulaires, consiste à renverser la méthode de Poggendorff (40). Au foyer conjugué

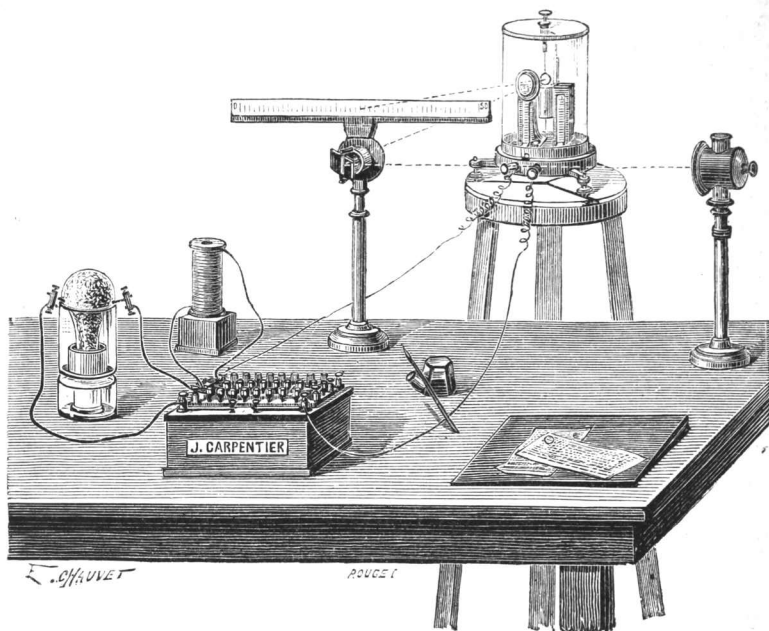


Fig. 9. — Montage complet d'une échelle transparente de M. J. Carpentier.

de l'objectif qui donne d'habitude une image de l'échelle plus petite que l'objet, M. d'Arsonval place une échelle photographiée, divisée en dixièmes et en vingtièmes de millimètre. L'objectif de la lunette donne une image agrandie de cette échelle, image qui, après avoir été réfléchié par le miroir mobile, vient se former au-dessus de cet objectif. On l'observe et on l'agrandit encore en l'examinant avec l'oculaire qui porte un réticule servant de repère. M. d'Arsonval remplace le miroir plan par un miroir concave à long foyer et, pour éviter la double image, le rayon de courbure de la face antérieure est plus petit que celui de la face postérieure qui seule est argentée. On obtient ainsi des images d'une netteté et d'une pureté

parfaites. Le système étant placé à 1,2 m du miroir mobile permet d'apprécier des déplacements de l'image de $\frac{1}{40}$ de millimètre, soit une déviation angulaire de $\frac{1}{400}$ de degré.

En substituant au micromètre un réticule et à l'oculaire une échelle Carpentier, on a 20 fois moins de sensibilité, mais on peut observer alors des déviations beaucoup plus grandes. Le pied d'optique est disposé pour faire facilement cette modification.

ÉTUDE DES OSCILLATIONS.

41. Mouvement oscillatoire. — Lorsqu'un système matériel oscille autour d'un axe, il est soumis à un couple directeur qui tend à le ramener à sa position d'équilibre, couple dont le moment est une fonction de l'angle d'écart, et à des actions retardatrices résultant du mouvement lui-même et fonction de sa vitesse. Si les forces retardatrices sont nulles, le mouvement est dit *périodique* et les oscillations sont toutes identiques. Dans le cas contraire, le mouvement est *amorti*.

On appelle *élongation* la position du système lorsqu'il fait un écart maximum avec la position d'équilibre.

L'*amplitude* est l'angle formé par deux positions extrêmes.

La *durée d'une oscillation simple* est le temps qui s'écoule entre les époques de deux élongations successives.

Le *temps périodique* ou *période* est le temps qui s'écoule entre deux élongations de même sens.

Mouvement périodique. — En pratique, le couple directeur est proportionnel à l'angle d'écart ou au sinus de l'angle d'écart.

Dans le premier cas les oscillations sont *isochrones*; dans le second elles sont *pendulaires*.

42. Oscillations isochrones. — Lorsque le couple directeur est proportionnel à l'angle d'écart, les oscillations sont isochrones. La durée de l'oscillation simple est indépendante de l'amplitude et est donnée par la formule

$$t = \pi \sqrt{\frac{K\theta}{W\theta}}$$

K étant le moment d'inertie du système oscillant par rapport

à l'axe d'oscillation, θ l'angle d'écart en radians et W_0 le couple directeur correspondant en ergs.

43. Mouvement pendulaire. — Lorsque le couple directeur est proportionnel au sinus de l'angle d'écart, la durée de l'oscillation est fonction de l'amplitude. La durée de l'oscillation t' , pour un angle d'écart α très petit est donné par la formule :

$$t' = \pi \sqrt{\frac{K \sin \theta}{W_0}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \dots \right]$$

Pour une oscillation *infinitement petite*, on retombe sur la formule théorique qui donne pour durée de l'oscillation t

$$t = \pi \sqrt{\frac{K \sin \theta}{W_0}}$$

En faisant α très petit, on peut écrire sans erreur sensible :

$$t' = t \left(1 + \frac{\alpha^2}{16} \right)$$

α étant l'angle exprimé en radians. L'augmentation de l'amplitude a donc pour effet d'accroître la durée d'oscillation théorique t .

En tenant compte de la série complète, le terme correctif n'est que de 0,0019, soit moins de *deux millièmes* pour un écart de 10° . Ces formules se rapportent au mouvement d'un pendule dans le vide, sans amortissement. On peut en déduire les formules relatives au pendule simple, idéal, constitué par une masse suspendue à un fil inextensible et sans poids, en remplaçant respectivement K et W_0 par leurs valeurs : en appelant M la masse du pendule et l sa longueur, on a

$$K = Ml^2; \quad W_0 = Mgl \sin \theta$$

d'où l'on déduit

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Les formules des oscillations isochrones et pendulaires nous serviront aux mesures magnétiques, ainsi qu'à la détermination des couples de torsion des suspensions unifilaire et bifilaire.

44. Amortissement des oscillations. — Lorsque des

causes retardatrices tendent à ramener le système au repos, on dit qu'il est *amorti*. Ces causes sont les frottements, la résistance du milieu, des courants d'induction développés dans des masses métalliques voisines, etc. Ces forces sont des fonctions de la vitesse que l'on peut supposer varier, pour plus de simplicité, comme le degré m de la vitesse. Considérons l'amortissement dans le cas des oscillations isochrones ⁽¹⁾.

Poisson a étudié le cas de $m=2$, c'est-à-dire le cas où les résistances croissent proportionnellement au carré de la vitesse ; mais ce cas ne correspond pas à celui que l'on rencontre avec les faibles vitesses des appareils de mesure électrique, aussi le laisserons-nous de côté.

Gauss a étudié le cas de $m=1$, c'est-à-dire celui de la résistance proportionnelle à la vitesse, qui correspond sensiblement aux conditions de la pratique pour la résistance de l'air, et rigoureusement pour les effets d'induction.

Le mouvement est alors *amorti* ou *apériodique*.

45. Mouvement amorti. — Le système oscillant décrit une série d'oscillations isochrones qui se succèdent à des intervalles plus longs que si les forces retardatrices étaient nulles. Les écarts successifs diminuent comme les termes d'une progression géométrique et les amplitudes suivent la même loi.

Gauss a appelé *décément* le rapport des amplitudes de deux oscillations successives, et *décément logarithmique*, le logarithme népérien du rapport de deux oscillations. On le désigne par la lettre λ .

$$\lambda = \log_e \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{1}{2} \log_e \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = \dots = \frac{1}{n-1} \log_e \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_n}$$

En appelant ε l'écart correspondant à un amortissement nul, ε_1 le premier écart observé et λ le décément logarithmique,

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \left(1 + \frac{\lambda}{2} \right).$$

Lorsque l'amortissement est faible, on peut obtenir la valeur du premier écart ε s'il n'y avait pas d'amortissement en obser-

(1) Les oscillations ayant une très faible amplitude, il est inutile de considérer le cas où le couple directeur est proportionnel à $\sin \alpha$ (mouvement pendulaire).

vant qu'entre le premier écart ϵ_1 , et le troisième ϵ_3 , il y a eu quatre demi-oscillations simples pour chacune desquelles l'oscillation a éprouvé sensiblement la même réduction. On en déduit :

$$\epsilon = \epsilon_1 + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{4}.$$

Ces relations seront utilisées dans les galvanomètres balistiques.

46. Mouvement apériodique. — Lorsque l'amortissement est assez grand pour que le système, écarté de sa position d'équilibre et abandonné à lui-même, y revienne progressivement pour ne l'atteindre qu'au bout d'un temps théoriquement infini, le mouvement est dit *apériodique*. Il a été étudié par M. Dubois-Raymond ⁽¹⁾. Ce cas se présente rarement dans les applications, ainsi que celui pour lequel le mouvement n'est pas apériodique, mais sur le point de le devenir ⁽²⁾.

47. Observation des oscillations. — Les éléments à déterminer par l'expérience pour connaître complètement un mouvement oscillatoire sont la durée d'oscillation et l'angle d'écart.

Durée des oscillations. — On observe soit le passage d'un index devant une échelle graduée, soit le passage d'une image devant une échelle au moment où la vitesse est maxima, dans le voisinage de la position d'équilibre. La différence des époques de deux passages successifs dans le même sens représente le *temps périodique* ou durée d'une oscillation double. Cette durée est obtenue avec d'autant plus de précision qu'elle est déduite d'un plus grand nombre d'oscillations.

Amplitude des oscillations. — Elle se détermine par la lecture de l'élongation sur une échelle graduée, le plus ordinairement par la méthode du miroir (40).

La lecture de cette élongation est d'autant plus facile que le temps périodique est plus grand et l'angle d'écart plus petit. On agit en pratique, dans chaque cas particulier, sur l'un ou l'autre de ces facteurs pour faciliter les lectures, en ayant soin d'apporter pour la détermination de l'écart vrai la correction due à l'amortissement (45).

(1) *Monatsberichte der K. P. Akad. der Wissenschaften*, 1869, 1870, 1873.

(2) *Thèse de doctorat ès sciences* de P.-H. Ledebøer, 1886.

48. Mesure des couples. Méthode des oscillations.

— Un couple peut se mesurer *directement*, lorsqu'on connaît les forces qui le produisent et leur bras de levier, mais ce cas se rencontre très rarement en pratique.

La théorie des oscillations permet de déterminer le couple de torsion par la durée des oscillations d'amplitude infiniment petite. A cet effet, on suspend à un fil dont on veut connaître le couple de torsion W_1 correspondant à l'angle de 1 radian un corps dont le moment d'inertie est K . En appelant t la durée d'une oscillation simple, on a la relation :

$$\frac{W_1}{K} = \frac{\pi^2}{t^2}$$

K étant exprimé en unités C. G. S. et t en secondes, W_1 est exprimé en ergs.

On réalise enfin des couples de torsion dont on peut mesurer ou calculer les valeurs à l'aide de la *suspension unifilaire* ou de la *suspension bifilaire*.

49. Suspension unifilaire. — La *balance de torsion* ou *suspension unifilaire* a été imaginée et étudiée par Coulomb en 1784. Elle se compose en principe d'un fil élastique auquel on imprime une certaine torsion par une rotation exercée à une ou à ses deux extrémités.

L'expérience a démontré à Coulomb que, dans des limites assez étendues, si l'on écarte de sa position d'équilibre un système suspendu à un fil élastique et qu'on l'abandonne à lui-même, il exécute des oscillations sensiblement isochrones ; le moment du couple qui tend à amener le fil à sa position d'équilibre est donc proportionnel à l'angle d'écart.

Pour un fil cylindrique de diamètre d et de longueur l , le couple de torsion W_0 a pour expression :

$$W_0 = \mu \frac{d^4}{l} \theta$$

θ étant l'angle d'écart (en radians) et μ un facteur dépendant de la nature du fil et de sa température, c'est le *coefficient de Coulomb*.

Le facteur $\frac{W_0}{\theta} = \mu \frac{d^4}{l}$ est le *coefficient de torsion du fil*. Il est sen-

siblement indépendant de la tension, mais des expériences précises indiquent qu'il diminue un peu avec la tension, avec une torsion permanente ou un allongement permanent. On peut déterminer le coefficient de torsion d'un fil expérimentalement en suspendant à ce fil un corps dont le moment d'inertie K est connu et en le faisant osciller. On observe la durée d'oscillation et on en déduit $\frac{W_0}{\theta}$. Les dimensions du fil permettent ensuite de calculer la valeur du *coefficient de Coulomb* du fil soumis à l'expérience. Voici les valeurs du coefficient de Coulomb qui permettent de calculer W_0 en ergs par radian en se servant de la formule ci-dessus.

Nature du métal.	μ .
Aluminium.	260.10 ⁸
Argent.	266.10 ⁸
Laiton.	343.10 ⁸
Maillechort	483.10 ⁸
Platine	679.10 ⁸
Fer.	758.10 ⁸

Ces chiffres ne sont qu'approximatifs et varient avec la pureté du métal, son recuit, sa température, etc. L'emploi de l'argent est tout indiqué lorsqu'on a besoin de sensibilité, parce qu'il présente, à ténacité égale, le plus petit coefficient de Coulomb.

Pour avoir un faible couple de torsion nul ou négligeable, il faut employer des fils métalliques de faible diamètre ou mieux un fil de cocon. Un fil de cocon pouvant supporter 10 grammes n'a pas un coefficient de torsion plus grand qu'un fil d'argent de 0,00595 millimètre de diamètre et ne pouvant porter que 0,818 gramme.

Emploi de n fils parallèles. — Le couple produit par n fils parallèles est n fois celui produit par un seul fil, tandis qu'un fil unique de section n fois plus grande donnerait un couple n^2 fois plus grand qu'un seul fil, c'est-à-dire n fois plus grand que celui produit par les n fils parallèles.

50. Suspension ou balance bifilaire. — La suspension bifilaire employée en 1836 par *Snow Harris* a été introduite dans la pratique par les travaux de *Gauss* et *Weber* en 1837.

La balance bifilaire se compose d'une masse oscillante suspendue à deux fils écartés l'un de l'autre (fig. 10, page 36). Lorsque le système suspendu n'est soumis à aucune autre force que la pesanteur, les deux fils de suspension sont dans un même plan vertical. Si on applique un couple horizontal au système suspendu, il se soulève un peu et produit un couple qui tend à le ramener dans sa position initiale.

Soit f la force exercée verticalement sur la masse du système soumis à l'action de la pesanteur; cette force peut se décomposer en deux forces égales $\frac{f}{2}$ appliquées en B et en B'. Chacune de ces forces peut, à son tour, se décomposer en deux forces, l'une qui tend le fil, l'autre dirigée vers A et égale à $\frac{f}{2} \operatorname{tg} \beta$.

En posant $OB=r$, le moment de cette force horizontale est

$$W = \frac{f}{2} \operatorname{tg} \beta \cdot r \cos \frac{\alpha}{2},$$

et le moment du couple

$$W = fr \operatorname{tg} \beta \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (1)$$

Mais on voit sur la figure 10 que

$$AB = l \sin \beta = 2r \sin \frac{\alpha}{2}; \quad \sin \beta = \frac{2r}{l} \sin \frac{\alpha}{2};$$

β étant très petit, on peut remplacer la tangente par le sinus dans (1) et écrire :

$$fr \operatorname{tg} \beta \cos \frac{\alpha}{2} = fr \cdot \frac{2r}{l} \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2}$$

d'où

$$W = \frac{fr^3}{l} 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2}$$

et

$$W = \frac{f}{l} r^3 \sin \alpha.$$

Il faudrait, en toute rigueur, tenir compte de la torsion du fil, mais cette torsion est négligeable.

Si les deux fils ne sont pas parallèles, en appelant $2a$ et $2b$ leurs écartements, la formule du bifilaire s'écrit

$$W = \frac{ab}{l} f. \sin \alpha.$$

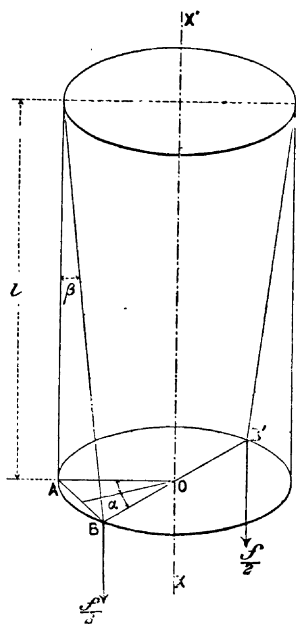


Fig. 10. — Principe de la suspension bifilaire. 1

Pour un bifilaire de longueur donnée l , on peut faire varier la valeur du couple et, par suite, la sensibilité en agissant sur le produit ab , c'est-à-dire en modifiant l'écartement des fils. Certains appareils sont munis d'une disposition mécanique permettant d'obtenir ce résultat.

Durée d'oscillation. — Si l'on fait osciller le système, en appelant K son moment d'inertie par rapport à l'axe du bifilaire, on démontre facilement que l'on a, pour valeur de la période d'oscillation

$$T = 2\frac{\pi}{r} \sqrt{\frac{lK}{f}}$$

La suspension bifilaire est appliquée à un certain nombre d'appareils de mesure électrique, l'électromètre à quadrants par exemple.

CHAPITRE PREMIER

NOTIONS GÉNÉRALES DE MAGNÉTISME

Certains minerais appelés *pierres d'aimant* ou *aimants naturels*, constitués par l'oxyde de fer magnétique Fe^3O^4 , jouissent de la propriété d'attirer le fer. C'est Thalès de Milet qui les découvrit à Magnésia dans l'Asie Mineure, d'où leur vient le nom de *magnétite*. Certains barreaux d'acier frottés avec ces pierres d'aimant acquièrent la même propriété et forment des *aimants artificiels*.

Les phénomènes ainsi manifestés par les aimants naturels et artificiels sont dits *phénomènes magnétiques*, et leur étude constitue le *magnétisme*.

51. Pôles d'un aimant. — Jusqu'à 1600, on ne connaissait que la propriété des aimants d'attirer le fer. A cette époque, Gilbert reconnut que dans un aimant il existe toujours deux régions opposées où l'attraction est plus grande. Il nomma ces régions *pôles* de l'aimant.

On montre expérimentalement l'existence des régions polaires d'un aimant en le roulant dans de la limaille de fer : cette limaille s'accumule vers les extrémités et y forme deux houppes caractéristiques (fig. 11).

52. Fantômes ou spectres magnétiques. — Si, après avoir placé un aimant sous une feuille de carton ou une lame de verre, on projette de la limaille de fer à l'aide d'un tamis,

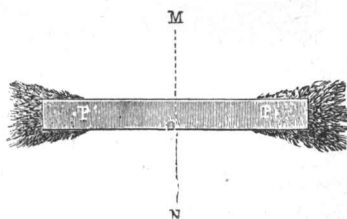


Fig. 11. — Régions polaires d'un aimant.

on voit la limaille se disposer suivant des lignes régulières et former une image à laquelle Gilbert a donné le nom de *spectre* ou *fantôme magnétique*. Ces lignes régulières constituent des *lignes de force* sur les propriétés desquelles nous aurons souvent à revenir. On peut conserver et fixer les fantômes ainsi obtenus de plusieurs façons :

De Haldat conservait les fantômes en appliquant au-dessus une feuille de papier enduite de colle d'amidon sur laquelle la

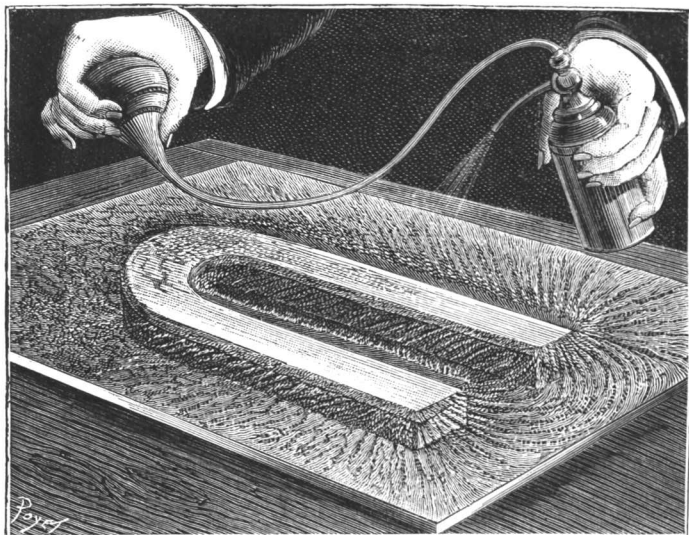


Fig. 12. — Fixation des fantômes magnétiques.

limaille s'attache et adhère ; *M. Mayer* forme le fantôme sur une lame de verre vernie à la cire d'Espagne chauffée ensuite par dessous ; *M. Silvanus Thompson* gomme préalablement une lame de verre ou une feuille de papier ; après avoir produit le fantôme sur une surface sèche de verre ou de papier, il projette de la vapeur d'eau ou de l'eau pulvérisée : la gomme se redissout et fixe la limaille lorsqu'elle sèche de nouveau (fig. 12).

On peut enfin employer le papier de ferro-cyanure de potassium sur lequel on forme le fantôme dans l'obscurité et qu'on expose ensuite au soleil pendant le temps nécessaire. Après lavage, le fantôme se détache très nettement en blanc sur fond bleu.

La figure 13 montre le fantôme magnétique d'un barreau droit posé à plat.

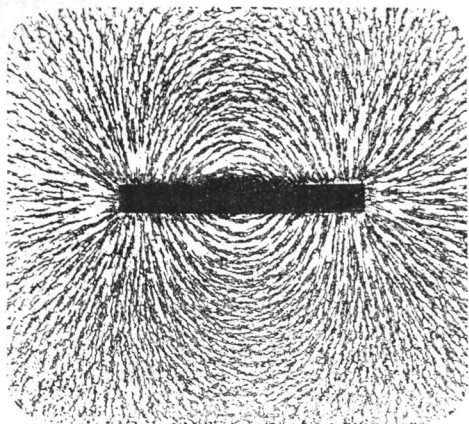


Fig. 13. — Fantôme magnétique d'un aimant droit.

53. Direction d'un aimant par la terre. — Prenons une petite aiguille aimantée et suspendons-la par son centre de gravité en la laissant libre de se mouvoir, en la supportant sur un étrier, un pivot, ou un bouchon flottant sur un liquide, nous remarquons que l'un des pôles de l'aiguille se dirige à peu près vers le nord de la terre, et l'autre vers le sud.

On appelle *pôles de même nom* tous ceux qui, ainsi abandonnés à eux-mêmes, se dirigent du même côté, et *pôles de noms contraires* ceux qui se dirigent en sens contraires.

54. Attractions et répulsions magnétiques. Noms des pôles. — Lorsqu'on approche ces pôles les uns des autres, on observe entre eux des *attractions* ou des *répulsions* et l'on constate expérimentalement que :

Les pôles de même nom se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent.

Pour distinguer les pôles entre eux, on appelle, *par convention*, *pôle nord* d'un aimant celui qui se dirige vers le nord de la terre, et *pôle sud* celui qui se dirige vers le sud ⁽¹⁾. On fait quelquefois une marque au pôle se dirigeant vers le nord

(1) Il faut éviter avec le plus grand soin d'employer les anciennes désignations de *pôle austral* et *pôle boréal*, qui prêtent à confusion.

et on l'appelle *pôle marqué*, le pôle sud étant alors, par opposition, le *pôle non marqué*.

55. Corps magnétiques et diamagnétiques. — Le fer n'est pas le seul métal jouissant des propriétés magnétiques, le nickel, le cobalt, le chrome, le cérium, le manganèse jouissent des mêmes propriétés, bien qu'à des degrés très différents.

On appelle *ferro-magnétiques*, *paramagnétiques*, ou simplement *magnétiques* tous les corps attirés par l'aimant.

Certains corps sont au contraire *repoussés* par l'aimant. Brugmann a reconnu cette propriété pour le bismuth en 1778. Faraday l'a étudiée et montré qu'elle était sensible, quoique très faible, avec l'antimoine, le phosphore, le cuivre, etc., et il a appelé *diamagnétiques* les corps repoussés par les aimants. Le diamagnétisme n'est qu'un cas particulier du magnétisme, comme nous l'établirons plus tard.

56. Forces magnétiques. Pôles d'un aimant. — Les attractions et les répulsions exercées entre les aimants s'appellent *forces magnétiques*. Si l'on considère deux barreaux aimantés, il s'exerce entre eux quatre actions et l'effet total est la résultante de ces quatre actions : deux attractions entre les pôles de noms contraires, deux répulsions entre les pôles de même nom. Si nous allongeons indéfiniment les deux barreaux en diminuant en même temps leurs dimensions transversales, les régions que nous avons appelées jusqu'ici pôles deviendront de plus en plus petites, se localiseront et tendront vers deux points géométriques, où seront concentrées toutes les actions magnétiques. Les pôles d'un aimant sont les points d'application des résultantes des actions magnétiques exercées par le barreau tout entier à une distance suffisante pour que les forces exercées puissent être considérées comme parallèles.

57. Lois de Coulomb. — En faisant agir entre eux les pôles de deux aimants très longs à des distances assez faibles et dans des positions telles que l'on puisse négliger les actions des deux autres pôles, Coulomb a établi expérimentalement, à l'aide de sa *balance*, la loi suivante ⁽¹⁾ :

(¹) Nous renvoyons aux traités de physique pour la démonstration expérimentale de ces lois et la description de la balance.

Les actions attractives ou répulsives entre deux pôles magnétiques sont en raison inverse du carré de leur distance.

Les forces exercées entre différents pôles d'aimants placés à des distances égales n'étant pas égales, on est conduit à considérer des pôles plus ou moins intenses, présentant des *masses magnétiques* plus ou moins grandes, et à prendre pour mesure de ces masses magnétiques ou *intensités de pôle* les forces mêmes qu'elles exercent.

En appelant m et m' les masses magnétiques ou intensités des pôles en présence, d leur distance, f la force qui s'exerce entre eux, la loi de Coulomb complète s'écrit alors :

$$f = k \frac{mm'}{d^2}.$$

k est une constante dépendant du *milieu* dans lequel s'exercent les actions magnétiques. On simplifie la formule en considérant k comme une *constante* et en lui donnant la valeur 1. C'est là l'hypothèse fondamentale qui sert de base au système des quantités, grandeurs et unités C. G. S. magnétiques, et qu'on appelle, pour cette raison, *système magnétique C. G. S.*

58. Système magnétique C.G.S. — Dans ce système, la formule de Coulomb, simplifiée par l'hypothèse $k=1$, devient :

$$f = \frac{mm'}{d^2}.$$

La force f est *attractive* ou *répulsive*, suivant que m et m' sont de noms contraires ou de même nom. En convenant de donner le signe + au pôle nord, et le signe — au pôle sud, le signe de la force indique celui de la *répulsion*, une répulsion négative correspondant à une attraction.

C'est en partant de la loi de Coulomb que s'établissent, par définitions successives, les relations entre les quantités magnétiques, ainsi que les unités C.G.S. correspondantes.

59. Intensité de pôle (m). — Deux pôles dont les intensités sont m et m' placés à une distance d exercent entre eux une force donnée par la loi de Coulomb.

$$F = \frac{mm'}{d^2}.$$

En faisant $m = m'$, on en tire : $Fd^2 = m^2$ et $m = d\sqrt{F}$.

Les dimensions de l'intensité du pôle magnétique sont :

$$m = L\sqrt{LMT^{-2}} = L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}.$$

L'unité C.G.S. d'intensité de pôle magnétique est l'intensité du pôle qui repousse un pôle semblable placé à une distance de 1 centimètre avec une force égale à 1 dyne. Cette unité n'a pas reçu de nom spécial.

60. Moment magnétique (\mathfrak{M}). — Le moment magnétique \mathfrak{M} d'un barreau est le produit de l'intensité de l'un de ses pôles m par leur distance l .

$$\mathfrak{M} = ml.$$

Les dimensions du moment magnétique sont : $L^{\frac{5}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$.

L'unité C.G.S. de moment magnétique est le moment d'un barreau aimanté dont l'intensité du pôle est de 1 unité C.G.S. et la distance des pôles de 1 centimètre.

61. Intensité d'aimantation (\mathfrak{J}). — L'intensité d'aimantation d'un barreau aimanté est le rapport de son moment magnétique \mathfrak{M} à son volume V .

$$\mathfrak{J} = \frac{\mathfrak{M}}{V}.$$

Les dimensions de l'intensité d'aimantation sont : $L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$.

Dans un barreau long, on peut écrire, en appelant S la section du barreau et l sa longueur

$$\mathfrak{J} = \frac{ml}{Sl} = \frac{m}{S}; \quad m = \mathfrak{J}S$$

L'intensité de pôle d'un barreau aimanté est égale à son intensité d'aimantation multipliée par la section du barreau.

L'unité C.G.S. d'intensité d'aimantation est celle d'un barreau de 1 centimètre cube et dont le moment magnétique est de 1 unité C.G.S.

62. Champ magnétique. — L'espace qui entoure un aimant et dans lequel s'exercent les actions magnétiques s'appelle *champ magnétique*.

Les fantômes magnétiques (52) mettent l'existence du champ

magnétique en évidence ; les lignes tracées par la limaille de fer ne sont pas autre chose qu'une représentation grossière de l'intensité et de la direction de la force magnétique en chaque point. Le champ magnétique serait entièrement déterminé si on connaissait en chaque point la direction, le sens et la grandeur de la force magnétique.

Supposons un pôle nord isolé, libre de se mouvoir dans le champ magnétique, il décrira une trajectoire qui est la *ligne de force* passant par le point de départ de ce pôle. La *direction* est donnée à chaque point par la tangente à la trajectoire que décrirait un pôle nord placé en ce point ; le *sens* est celui du mouvement du pôle, la *grandeur* de la force magnétique ou *intensité du champ* se mesure par la force exercée par le champ sur le pôle (63).

On traduit cette direction conventionnelle des lignes de force en disant que les lignes de force *sortent* du pôle nord et *rentrent* dans le pôle sud. La direction des lignes de force indiquant le sens de l'action magnétique, on comprend ainsi qu'un pôle nord soit repoussé par le pôle nord, et attiré par le pôle sud d'un aimant.

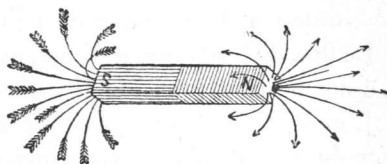


Fig. 14. — Direction conventionnelle et forme des lignes de force d'un barreau aimanté.

Une ligne de force est une ligne fermée allant du pôle nord au pôle sud à l'extérieur du barreau aimanté et du pôle sud au pôle nord à l'intérieur de ce barreau. La figure 14 représente grossièrement la direction conventionnelle et la forme des lignes de force du champ magnétique produit par un barreau aimanté. Les lignes de force magnétique sortent du pôle *nord* et rentrent dans le pôle *sud*.

Champ magnétique uniforme. — Lorsque les lignes de force d'un champ sont parallèles et équidistantes, le champ est dit *uniforme*. Le champ magnétique terrestre peut, dans un espace de faibles dimensions, être considéré comme rigoureusement uniforme. Il en est de même du champ produit par un aimant placé à une grande distance, lorsqu'on ne considère qu'un petit volume de ce champ.

63. Intensité de champ magnétique (H). — La force F exercée par un champ magnétique sur un pôle d'intensité m est proportionnelle à l'intensité du pôle m et à l'intensité du champ. L'intensité du champ H est donc le rapport de la force F exercée par le champ sur un pôle m à l'intensité de ce pôle.

$$H = \frac{F}{m}.$$

Les dimensions de l'intensité de champ sont : $L^{-\frac{1}{2}} \bar{M}^{\frac{1}{2}} T^{-1}$.

L'unité C.G.S. d'intensité de champ est celle d'un champ qui exerce une force de 1 dyne sur un pôle de 1 unité C.G.S d'intensité placé dans le champ.

64. Flux de force magnétique (Φ). — Considérons un champ magnétique uniforme et un plan perpendiculaire à la direction des lignes de force de ce champ. Si nous découpons dans le plan une surface S , elle sera traversée par un certain nombre de lignes de force ou flux de force magnétique ⁽¹⁾ proportionnel à la surface S et à l'intensité du champ H .

Le flux de force magnétique, ou, par abréviation, *flux de force*, a donc pour expression HS . Ses dimensions sont : $L^{\frac{3}{2}} \bar{M}^{\frac{1}{2}} T^{-1}$.

L'unité C.G.S. de flux de force est le flux traversant une surface de 1 centimètre carré lorsque l'intensité du champ est de 1 unité C.G.S.

Lorsque le champ n'est pas uniforme, le flux élémentaire $d\Phi$ est égal à $H ds$. Pour une surface quelconque, son expression générale est

$$\int H ds$$

expression dans laquelle H peut varier d'un point à un autre.

65. Flux de force total dû à un pôle magnétique d'intensité m . — A une distance l du pôle, le champ produit par le pôle a pour valeur, en vertu de la loi de Coulomb (57) :

$$f = \frac{m m'}{l^2}; \quad H = \frac{f}{m'} = \frac{m}{l^2}.$$

Pour une surface ds le flux de force est égal à $\frac{m ds}{l^2}$.

(1) Nous préférons l'expression *flux de force* usitée en France à l'expression *nombre de lignes de force* employée en Angleterre, parce que la première, outre sa simplicité plus grande, implique une idée de continuité plus conforme à la réalité.

Et pour la sphère entière de rayon l dont la surface est égale à $4\pi l^2$, le flux est égal à

$$4\pi m.$$

Lorsqu'on considère un barreau aimanté très long, dont l'intensité de pôle est m , le flux d'induction total est alors égal à $4\pi m$ à l'intérieur du barreau, et à $4\pi m$ en dehors du barreau, en vertu de la conservation du flux, les lignes de force constituant des circuits fermés.

INDUCTION MAGNÉTIQUE.

Tout corps ou substance magnétique placé dans un champ magnétique prend une certaine aimantation qui dépend de la nature du champ et de celle de la substance. Le phénomène porte le nom d'*induction magnétique* et l'aimantation ainsi développée s'appelle *aimantation induite*. Le champ magnétique est le *champ inducteur*.

L'aimantation induite par un champ magnétique sur un barreau est toujours produite dans la direction générale des lignes de force de ce champ. Un barreau de fer placé dans un champ uniforme, par exemple, présente un pôle sud à l'extrémité par laquelle les lignes de force le pénètrent, et un pôle nord à l'extrémité par laquelle elles en sortent.

Lorsque le champ inducteur disparaît, l'aimantation induite disparaît plus ou moins complètement. L'aimantation qui persiste après la disparition du champ inducteur est le *magnétisme résiduel*.

Avec de l'acier trempé, le magnétisme résiduel est grand, et l'on obtient un *aimant permanent*. On dit que l'acier possède une grande *force coercitive*. Avec du fer doux bien recuit, le magnétisme résiduel disparaît presque complètement avec le champ inducteur; la force coercitive du fer doux est faible ⁽¹⁾.

66. Induction magnétique (B). — Considérons un barreau long et mince placé parallèlement à la direction des lignes de force dans un champ magnétique ⁽²⁾ d'intensité \mathcal{H} . Si S est la

⁽¹⁾ Sous réserve de phénomènes particuliers dont nous parlerons à propos de l'électromagnétisme.

⁽²⁾ Nous désignons par H un champ magnétique en général, et par \mathcal{H} un champ magnétique *inducteur*.

section du barreau, il est traversé par un flux d'induction magnétique total proportionnel à sa section S et à un facteur \mathfrak{B} , qu'on appelle *induction magnétique*. L'induction magnétique est le rapport du flux d'induction à la section du barreau, elle est donc homogène à une intensité de champ. Ce flux d'induction est, d'autre part, égal au flux dû au champ $\mathfrak{H}S$, plus celui dû à l'aimant $4\pi m$. Mais le barreau étant très long, on a (61)

$$\mathfrak{J} = \frac{m l}{l S} = \frac{m}{S}; \quad m = \mathfrak{J} S$$

d'où

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi \mathfrak{J}. \quad (1)$$

L'induction magnétique est donc égale à l'intensité du champ inducteur, plus 4π fois l'intensité d'aimantation.

67. Perméabilité magnétique (μ). — Lorsqu'un corps magnétique est placé dans un champ inducteur \mathfrak{H} , il s'y développe une induction magnétique d'autant plus grande que le corps est plus *perméable* au magnétisme. On appelle *perméabilité magnétique* μ du corps le rapport de l'induction magnétique \mathfrak{B} au champ inducteur \mathfrak{H}

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}. \quad (2)$$

μ est un coefficient numérique n'ayant pas de dimensions.

68. Susceptibilité magnétique (κ). — Lorsqu'un corps magnétique est placé dans un champ inducteur d'intensité \mathfrak{H} , il prend une intensité d'aimantation \mathfrak{J} d'autant plus grande que sa susceptibilité magnétique est plus grande.

On appelle *susceptibilité magnétique* ou *coefficient d'aimantation induite* le rapport κ de son intensité d'aimantation \mathfrak{J} à l'intensité du champ inducteur \mathfrak{H}

$$\kappa = \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}. \quad (3)$$

κ est un coefficient numérique n'ayant pas de dimensions.

Relation entre μ et κ . — En tirant de (2) et (3) les valeurs de \mathfrak{B} et de \mathfrak{J} et remplaçant dans (1) on trouve :

$$\mu = 1 + 4\pi \kappa.$$

69. Corps magnétiques et diamagnétiques. — Les définitions que nous venons de donner permettent de préciser ce qu'on doit entendre par substances magnétiques et diamagnétiques. Les corps *magnétiques* sont ceux pour lesquels μ est plus grand que 1, et par suite ceux pour lesquels α est *positif*. Les corps *diamagnétiques* sont ceux pour lesquels μ est plus petit que 1, et par suite α est *négalif*, mais reste toujours plus petit que $\frac{1}{4\pi}$ en valeur absolue.

Les coefficients μ et α ne sont pas constants, ils varient avec la nature chimique de chaque corps, son état physique, sa trempe, sa température, etc., et la valeur absolue de \mathcal{H} . Nous reviendrons plus en détail sur cette question à propos de l'*électromagnétisme*, lorsque nous aurons appris à créer des champs magnétiques intenses par un courant électrique.

70. Règle générale pour déterminer le sens des actions magnétiques. — On ne peut pas, dans tous les cas, soumettre au calcul les lois des actions magnétiques, tout en ayant besoin cependant d'en prévoir le sens. Voici une règle qui, dans bien des cas, permettra de prévoir facilement le sens de ces actions.

Lorsque des aimants et des substances magnétiques sont en présence, libres de se mouvoir, les mouvements relatifs sont tels qu'ils tendent à faire superposer les lignes de force et à rendre le flux d'induction maximum dans chacun des aimants et des substances magnétiques en présence.

On peut appliquer cette règle, à titre d'exemple, aux attractions et aux répulsions de deux aimants, à la direction d'une aiguille aimantée par un champ, à l'attraction d'une armature de fer doux, à un aimant en forme de ressort qui, fermé sur lui-même, n'exerce plus d'actions magnétiques extérieures (*paradoxe magnétique*), à la répulsion de deux tiges de fer suspendues à des fils comme des pendules lorsqu'en on approche un pôle d'aimant, etc.

71. Circuit magnétique. — L'espace traversé par le flux de force produit par un aimant constitue un *circuit magnétique* qui forme, en quelque sorte, le chemin parcouru par les lignes de force. Ce chemin offert aux lignes de force par les subs-

tances magnétiques est d'autant plus facile que leur perméabilité magnétique (66) est plus grande, ou encore que le circuit magnétique est moins résistant.

Les considérations relatives au circuit magnétique seront développées à propos de l'électromagnétisme, mais on peut déjà dire que le flux de force se dérive dans les différents chemins qu'il peut suivre, et présente la plus grande densité dans les parties qui lui offrent le moins de résistance magnétique; les actions entre les aimants et les substances magnétiques ont pour effet de réduire le plus possible la résistance magnétique du circuit.

72. Procédés d'aimantation. — Le principe général appliqué dans toutes les méthodes d'aimantation consiste à placer le corps à aimanter dans un champ magnétique aussi intense que possible et dans la direction de l'aimantation à produire. Les procédés de la *simple touche*, de la *touche séparée*, de la *double touche* décrite dans tous les traités de physique ne sont que des cas particuliers de ce principe général. Aujourd'hui tous ces procédés sont à peu près abandonnés et remplacés par l'aimantation produite par des courants.

Lorsqu'on veut aimanter une *petite aiguille*, il suffit de la placer à cheval sur les pôles d'un aimant en U, en mettant sur le pôle sud l'extrémité dont on veut faire le pôle nord, et réciproquement. En frottant deux ou trois fois l'aiguille sur le barreau, dans le sens de sa longueur, elle se trouve aimantée.

L'*aimantation par la terre* n'est qu'un sens particulier de l'aimantation produite par le champ terrestre. On la met en évidence à l'aide d'une tige de fer bien doux que l'on place verticalement. Il se développe un pôle *sud* à la partie supérieure du barreau, ce qu'on démontre à l'aide d'une petite aiguille aimantée. En retournant le barreau, l'aimantation induite par le champ terrestre se trouve renversée dans le barreau qui présente toujours un pôle sud à sa partie supérieure.

73. Conservation de l'aimantation. Aimants armés. — Un barreau aimanté est constitué à l'état d'équilibre plus ou moins instable; il tend à perdre cette aimantation si l'on ne prend des dispositions spéciales pour la lui conserver. Une aiguille aimantée librement suspendue conserve son magné-

tisme parce qu'elle se place dans le champ terrestre, de façon à ajouter le flux de force dû au champ magnétique terrestre à son propre flux. Un *aimant armé*, c'est-à-dire garni d'une armature en fer doux rejoignant les pôles, conserve aussi bien mieux son magnétisme, parce que le flux magnétique total est plus grand avec l'armature que sans l'armature.

L'affaiblissement d'un aimant non armé suit une loi asymptotique, c'est-à-dire que son aimantation diminue de moins en moins vite avec le temps. Lorsqu'on a besoin de barreaux dont le moment magnétique soit sensiblement invariable, il est bon de les aimanter six mois au moins avant de les utiliser.

74. Influence de la température sur l'aimantation.

— Une élévation de température diminue l'aimantation d'un barreau, un abaissement de température l'augmente. La diminution devient permanente si la température est trop élevée. Un aimant au rouge cerise perd son aimantation; le fer à la même température n'est plus magnétique. Pour le nickel, cette limite à laquelle le métal cesse d'être magnétique est d'environ 350° C. Le manganèse n'est magnétique qu'à partir de — 20° C.

Certaines propriétés spéciales aux substances magnétiques ne peuvent être mises en évidence qu'à l'aide de champs magnétiques intenses et seront étudiées à propos de l'électromagnétisme.

MAGNÉTISME TERRESTRE.

La couche terrestre, tout au moins dans la faible épaisseur qui nous est accessible, constitue un *champ magnétique* à peu près constant en chaque point à un moment donné, mais variable d'un point à un autre, et, avec le temps, en un même point. Ce champ magnétique est à *peu près* équivalent à celui que l'on obtiendrait en assimilant la terre à un vaste aimant dont le pôle nord serait vers le sud de la terre, et inversement.

75. Déclinaison. Inclinaison. — Une aiguille aimantée libre de se mouvoir dans un plan horizontal prend une direction fixe et déterminée en chaque point.

Le plan vertical passant par l'axe de l'aiguille ainsi orientée est le *méridien magnétique*.

L'angle formé par le méridien magnétique et le méridien géographique est la *déclinaison*. La déclinaison a été découverte par Christophe Colomb en 1482.

Si une aiguille aimantée tourne autour d'un axe horizontal perpendiculaire au méridien magnétique, elle prend une position inclinée, le pôle nord dirigé vers la terre. L'angle formé par la direction de l'axe de l'aiguille et le plan horizontal est l'*inclinaison*. L'aiguille d'inclinaison donne la direction des lignes de force au point considéré.

L'inclinaison a été découverte par Norman en 1576.

76. L'action de la terre est directrice. — Le champ produit en un point étant uniforme, l'action se réduit à un couple. On le démontre expérimentalement en plaçant une aiguille sur un bouchon flottant, elle s'oriente sans translation, ce qui indique qu'il n'y a pas de résultante horizontale.

En pesant l'aiguille avant et après l'aimantation, on ne trouve aucune variation de poids, il n'y a donc pas de résultante verticale.

77. Intensité du champ magnétique terrestre. — Les lignes de force sont dirigées suivant l'aiguille d'inclinaison.

On appelle *intensité magnétique totale*, l'intensité du champ dans la direction de l'aiguille d'inclinaison. Cette intensité magnétique totale se décompose en deux. Si on appelle Z l'intensité magnétique totale, H la composante horizontale, V la composante verticale et θ l'angle d'inclinaison, on a évidemment :

$$\begin{aligned} H &= Z \cos \theta \\ V &= Z \sin \theta = \sqrt{Z^2 - H^2}. \end{aligned}$$

Il suffit donc de connaître l'inclinaison et l'une des composantes pour déterminer tous les éléments du magnétisme terrestre en un point.

DÉTERMINATION DES ÉLÉMENTS DU MAGNÉTISME TERRESTRE.

78. Déclinaison. — La déclinaison se mesure à l'aide de *boussoles de déclinaison* ou *déclinomètres*. L'appareil se compose en principe d'une aiguille aimantée de manière à rester horizontale et mobile sur un point vertical. L'angle formé par

l'aiguille avec le méridien géographique se lit sur un cercle gradué horizontal qui porte le nom de *cercle azimutal*.

Dans la boussole de *Gambey*, le barreau aimanté est supporté par un étrier de cuivre suspendu à un long faisceau de fils de soie sans torsion, pour éliminer le frottement du pivot.

Lorsque la ligne des pôles ne coïncide pas exactement avec l'axe géométrique de l'aiguille, on emploie la *méthode du retournement* (fig. 15) qui consiste à faire deux lectures, l'une avec

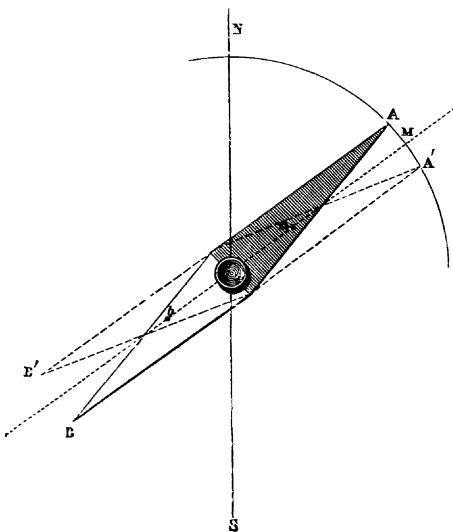


Fig. 15. — Principe de la méthode du retournement de l'aiguille.

l'aiguille dans sa position normale, l'autre avec l'aiguille retournée sens dessus dessous. La déclinaison vraie est la moyenne des deux positions AB, A'B'.

Les boussoles marines ou *compas* et les boussoles d'arpentage sont des appareils qui servent à déterminer la direction du méridien géographique lorsqu'on connaît la déclinaison au point considéré.

79. Inclinaison. — L'inclinaison se mesure à l'aide de *boussoles d'inclinaison* ou *inclinomètres*. L'appareil se compose en principe d'une aiguille aimantée mobile autour d'un axe horizontal en acier reposant sur des couteaux d'agate ; le limbe gradué est un cercle vertical qui doit être placé dans le plan du

méridien magnétique lorsqu'on veut déterminer la déclinaison.

Si la ligne des pôles de l'aiguille ne correspond pas avec l'axe géométrique de l'aiguille, on peut aussi employer la *méthode de retournement* (78).

80. Composante horizontale. — Les appareils qui servent à déterminer la composante horizontale H du magnétisme terrestre sont des *magnétomètres* ou des *balances magnétiques*.

Les balances magnétiques servent principalement à déterminer les *variations* de la composante horizontale du magnétisme terrestre. La valeur absolue en unités C.G.S. de cette composante se détermine à l'aide d'une méthode qui demande des mesures plus délicates et généralement désignée sous le nom de *méthode de Gauss*.

81. Méthode de Gauss. — Le principe de cette méthode consiste à déterminer le rapport $\frac{\mathfrak{M}}{H}$ du moment magnétique d'un barreau à l'intensité du champ par une méthode de déviation et le produit $\mathfrak{M}H$ par une méthode d'oscillation.

En posant

$$\frac{\mathfrak{M}}{H} = A; \quad \mathfrak{M}H = B,$$

on en déduit :

$$\mathfrak{M} = \sqrt{AB}; \quad H = \sqrt{\frac{B}{A}}.$$

La première relation donne le moment magnétique du barreau indépendamment de l'intensité du champ, la seconde l'intensité horizontale du champ indépendamment du moment magnétique du barreau.

Détermination de $\frac{\mathfrak{M}}{H}$ par la méthode des déviations. — Le rapport $\frac{\mathfrak{M}}{H}$ se détermine en faisant dévier une petite aiguille aimantée dirigée par le champ magnétique terrestre par un aimant de moment \mathfrak{M} placé dans deux positions différentes et qui doivent donner des valeurs concordantes.

Première position des aimants de Gauss (fig. 16). — L'aimant NS de moment \mathfrak{M} et de longueur $2l$ est placé perpendiculai-

rement à la direction du champ H et à une distance d . L'aiguille dévie et fait un angle α_1 avec sa position d'équilibre initiale. En appliquant la loi de Coulomb aux forces exercées

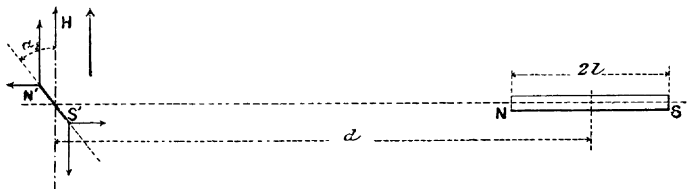


Fig. 16. — Première position des aimants de Gauss.

par les pôles de l'aimant NS sur l'aiguille et en écrivant l'équilibre des couples dus au champ H et à l'aimant NS, on démontre que si la longueur de l'aiguille est très petite par rapport à la distance d , on a la relation

$$\frac{\mathfrak{M}}{H} = \frac{(d^2 - l^2)^2}{2d} \tan \alpha_1$$

relation qui permet de déterminer le rapport cherché par la mesure de l'angle α et des deux longueurs d et l .

Seconde position des aimants de Gauss. — En plaçant l'aimant NS dans la position représentée fig. 17, et en appelant α_2

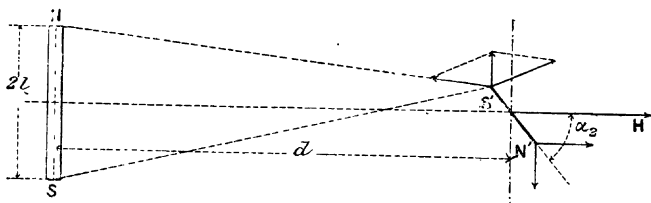


Fig. 17. • Seconde position des aimants de Gauss.

la déviation produite sur l'aiguille très courte par rapport à la distance :

$$\frac{\mathfrak{M}}{H} = (d^2 + l^2)^{\frac{3}{2}} \tan \alpha_2.$$

Les deux expériences faites avec le même barreau doivent donner la même valeur de $\frac{\mathfrak{M}}{H}$, ce qui est une vérification de l'exactitude des mesures.

Détermination de $\mathfrak{M}H$ par la méthode des oscillations. — On fait osciller horizontalement le barreau aimanté de moment \mathfrak{M} autour d'un axe vertical passant par son centre de gravité. Si les oscillations sont de faible amplitude, on peut lui appliquer la loi des oscillations pendulaires (43) en considérant une des moitiés du barreau, le poids est remplacé par la force horizontale mH s'exerçant sur le pôle, l étant la demi-longueur du barreau, K son moment d'inertie *total*. La durée d'une oscillation simple est alors :

$$t = \pi \sqrt{\frac{K}{2} \cdot \frac{1}{mHl}}$$

Mais $2ml = \mathfrak{M}$. En remplaçant et en effectuant, on a :

$$\mathfrak{M}H = \frac{K\pi^2}{t^2}$$

t se détermine par l'expérience (47); K se calcule par la forme et les dimensions du barreau et sa masse (31), ou se détermine expérimentalement par la méthode suivante.

82. Détermination expérimentale du moment d'inertie d'un barreau aimanté par la méthode des oscillations. — On fait osciller le barreau aimanté dans le champ magnétique terrestre, autour d'un axe vertical, d'abord seul, puis en lui ajoutant deux masses auxiliaires égales M placées à une distance r de l'axe d'oscillation. Soient

K le moment d'inertie du barreau ;

\mathfrak{M} son moment magnétique ;

H l'intensité horizontale du magnétisme terrestre ;

t la durée d'une oscillation simple du barreau seul ;

t' — — — — — avec les masses

additionnelles.

On a évidemment :

$$t = \pi \sqrt{\frac{K}{\mathfrak{M}H}} ; t' = \pi \sqrt{\frac{K + 2Mr^2}{\mathfrak{M}H}}$$

d'où

$$\frac{t^2}{t'^2} = \frac{K}{K + 2Mr^2}$$

Et, en effectuant le calcul :

$$K = \frac{2Mr^2l^2}{l'^2 - l^2}.$$

Vérification. On calcule le moment d'inertie du barreau d'après sa forme et ses dimensions en considérant d'abord sa masse seule, puis sa masse plus celle de l'étrier qui le supporte. La valeur trouvée par expérience doit être évidemment intermédiaire entre les deux valeurs ainsi calculées.

83. Cartes magnétiques. — Lorsqu'on a déterminé les éléments du magnétisme terrestre en différents points et qu'on réunit par des lignes continues les points pour lesquels chacun de ces éléments possède une valeur donnée on obtient des cartes magnétiques qui permettent d'embrasser d'un seul coup d'œil l'état magnétique de tout ou partie de la terre.

On a donné aux courbes ainsi tracées des noms particuliers. On appelle :

Ligne isogonique ou *isogones* : le lieu des points d'égale déclinaison.

Ligne agonique : le lieu des points de nulle déclinaison.

Ligne isoclinique : le lieu des points d'égale inclinaison.

Équateur magnétique : le lieu des points de nulle inclinaison.

Pôles magnétiques : les points où l'inclinaison = 90°.

Lignes isodynamiques : le lieu des points d'égale intensité.

84. Variations des éléments du magnétisme terrestre. — Tous les changements subis par le magnétisme terrestre en fonction du temps sont des *variations*. Les unes se produisent à des périodes indéterminées, ce sont des *perturbations* ou *orages* magnétiques. D'autres ont lieu régulièrement et constituent des *variations périodiques*.

Les variations périodiques sont diurnes, mensuelles, annuelles et séculaires. Les causes de ces variations ne sont pas encore parfaitement connues, et c'est seulement par une longue série d'observations, enregistrées d'une manière continue par des *magnétographes* que l'on pourra trouver les causes réelles des dépendances des différents phénomènes magnétiques, électriques, météorologiques et atmosphériques.

Voici, d'après M. Th. Moureaux, chargé du service magnétique

à l'Observatoire du parc Saint-Maur, les éléments des variations du magnétisme qui présentent pour nous le plus d'intérêt.

Déclinaison. — A Paris, la déclinaison était orientale au seizième siècle, époque à laquelle remontent les premières observations. En 1866, le méridien magnétique se confondait avec le méridien astronomique; en d'autres termes, la déclinaison était nulle. Depuis lors, elle est occidentale; sa valeur maxima, $22^{\circ}34'$, a été observée en 1814 et 1815; actuellement elle n'est plus que de 16° environ. La décroissance moyenne annuelle, pendant cette période, a été de 5,4 minutes; en supposant qu'elle continue dans la même proportion, la déclinaison redeviendrait nulle à Paris dans deux siècles environ, mais cette moyenne est loin d'être constante, en sorte qu'il est impossible de rien préciser à cet égard.

Indépendamment de cette *variation séculaire*, la déclinaison est soumise à une *variation diurne* régulière. Elle est minimum vers 8 heures du matin, puis croît progressivement, c'est-à-dire que le pôle nord de l'aiguille s'éloigne vers l'ouest, jusqu'à 1 ou 2 heures du soir; elle passe dans la nuit par une seconde oscillation de moindre amplitude que la première. Ce double mouvement, plus accentué en été qu'en hiver, est d'ailleurs toujours compris dans des limites très étroites; à Paris, la variation diurne de la déclinaison dépasse rarement 12 à 15 minutes.

Inclinaison. — A Paris, le pôle nord de l'aiguille aimantée s'abaisse au-dessous de l'horizon d'un angle qui était de 75° en 1671, et qui est actuellement de $65^{\circ}25'$ environ. L'inclinaison diminue graduellement dans nos régions; elle est d'ailleurs soumise, comme la déclinaison, à des variations périodiques et à des variations accidentelles.

Les variations séculaires de la déclinaison et de l'inclinaison sont dues au déplacement de l'axe magnétique terrestre. Cet axe, en effet, n'est pas immuable, comme l'axe du monde, et les pôles magnétiques paraissent exécuter un mouvement de rotation d'une extrême lenteur autour des pôles géographiques. Au siècle dernier, le pôle magnétique nord se trouvait près de la baie de Baffin, au nord-est de l'Amérique septentrionale; la position que les observations les plus récentes lui assignent actuellement est reportée beaucoup plus à l'ouest, vers la baie

de Melville, par environ 72° de latitude, et 97° de longitude occidentale. Le pôle magnétique sud est plus rapproché du pôle géographique; ses coordonnées approximatives sont les suivantes : 76° de latitude, et 154° de longitude orientale. Bien que les observations s'étendent déjà à plus de deux siècles, la série n'est pas encore assez longue pour qu'il soit possible d'en déduire la durée d'une rotation complète des pôles magnétiques autour de l'axe du monde.

Les perturbations magnétiques sont en relation intime avec l'apparition des aurores boréales, mais on n'a pas encore expliqué les coïncidences signalées entre le magnétisme terrestre et certains phénomènes, par exemple, entre l'amplitude de l'oscillation diurne de l'aiguille aimantée et la fréquence des taches solaires; et la question de savoir si les orages magnétiques ont une influence sur nos grands troubles atmosphériques reste encore à l'état d'hypothèse. Nos connaissances sont bien imparfaites sur les causes et le lieu d'origine de ces forces mystérieuses qui agissent quelquefois simultanément sur les deux hémisphères du globe.

85. Cartes magnétiques de la France (1885). — Les premières observations magnétiques effectuées en France d'après un plan d'ensemble ont été entreprises par Lamont, directeur de l'observatoire de Munich, qui, en 1856 et 1857, détermina la valeur des divers éléments en 44 stations. Douze ans plus tard, en 1868 et 1869, le R. P. Perry, directeur de l'observatoire de Stonyhurst, mesura également, avec le P. Sidgreaves, la direction et l'intensité magnétique terrestre en 33 stations françaises. MM. Marié-Davy et Descroix, en 1875 et 1876, ont mesuré la déclinaison en 40 stations et fait quelques observations de la composante horizontale; enfin M. de Bernardières, capitaine de frégate, a exécuté à diverses époques un certain nombre de déterminations sur les côtes.

A l'occasion des expéditions polaires internationales, M. Mascart, directeur du bureau central météorologique, a jugé utile de reprendre ces observations d'une manière systématique, et a chargé M. Th. Moureaux de ce travail.

Les observations ont été faites en 1884 et 1885, pendant la belle saison. M. Moureaux a effectué 167 mesures de la déclinaison.

naison, 137 de la composante horizontale et 85 de l'inclinaison dans 78 stations disséminées dans les diverses régions de la

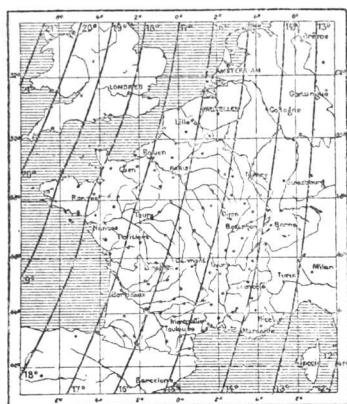


Fig. 18. — Lignes d'égale déclinaison au 1^{er} janvier 1885.

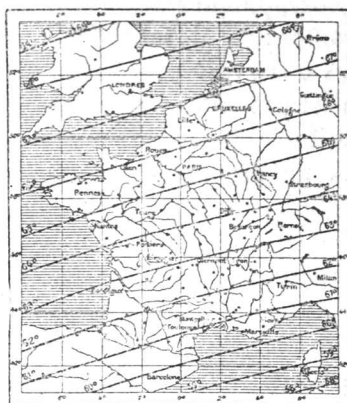


Fig. 19. — Lignes d'égale inclinaison au 1^{er} janvier 1885.

France. Les valeurs des différents éléments, ramenés par le calcul à la date 1^{er} janvier 1885 d'après les courbes de varia-

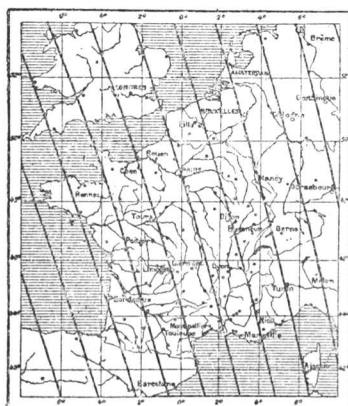


Fig. 20. — Méridiens magnétiques.

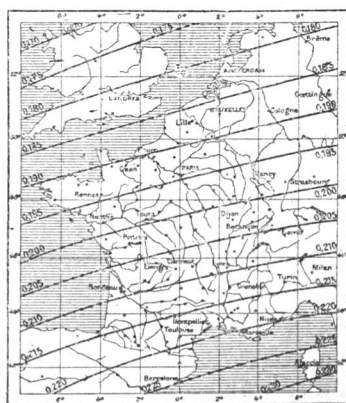


Fig. 21. — Lignes d'égale composante horizontale.

tions relevées par les appareils magnétiques enregistreurs, ont servi à construire les courbes magnétiques dont les figures 18, 19, 20 et 21 sont une réduction et peuvent donner une idée

générale de l'état des éléments *moyens* du magnétisme en France à l'époque indiquée.

La figure 21 présente un intérêt particulier au point de vue des mesures électromagnétiques, car elle montre que la composante horizontale du magnétisme terrestre varie de 20 pour 100 environ entre Dunkerque et Marseille. Cette variation condamne à l'avance tous les appareils de mesure étalonnés à l'avance, dans lesquels le champ terrestre servant de champ directeur est supposé constant et invariable dans tous les points où l'instrument peut être utilisé.

Ces notions bien incomplètes de magnétisme sont nécessaires et suffisantes pour aborder l'étude des phénomènes électriques et établir l'ensemble du système électromagnétique C.G.S. Nous aurons l'occasion de les compléter à propos de l'électromagnétisme.

CHAPITRE II

NOTIONS GÉNÉRALES D'ÉLECTROSTATIQUE

86. Attraction électrique. — Lorsqu'on frotte un bâton de cire à cacheter ou d'ébonite avec une étoffe de laine ou une peau de chat, il acquiert la propriété d'attirer les corps légers. Le fait a été reconnu pour la première fois avec l'ambre jaune (ἤλεκτρον) et c'est ce qui a donné le nom au phénomène. On attribua tout d'abord cette propriété à un fluide que l'on appela *électricité*.

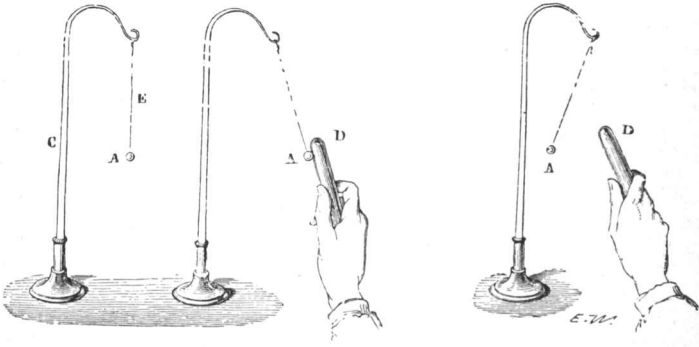


Fig. 22. — Pendule électrique.

C'était la seule propriété électrique connue jusqu'au xvi^e siècle, lorsque *Gilbert*, de Colchester, médecin de la reine Élisabeth, reconnut que cette propriété était commune à un grand nombre de corps, et il appela *corps électriques* tous ceux qui pouvaient ainsi s'électriser par le frottement.

Les attractions électriques sont mises en évidence à l'aide de

l'expérience classique du *pendule électrique* (fig. 22), constitué par une balle de sureau suspendue à un fil de soie.

87. Répulsion électrique. — *Otto de Guericke* constata le premier (1672) que si la balle de sureau vient au contact du corps électrisé, l'attraction est suivie d'une répulsion et se trouve à son tour électrisé *par contact* avec le premier.

Quelle que soit la nature intime du phénomène, l'expérience prouve que l'électrisation du premier corps s'est transmise en partie du corps électrisé à celui qui ne l'était pas ; elle prouve de plus qu'il s'exerce une *répulsion* entre les corps possédant la même électrisation. Cette répulsion se montre à l'aide de deux balles de sureau suspendues au même support : elles se repoussent dès qu'on les met toutes deux en contact avec un corps électrisé que l'on retire ensuite.

Les répulsions électriques se produisent aussi entre les différentes parties d'un même corps électrisé. On le démontre en électrisant une bulle de savon qui gonfle lorsqu'on l'électrise.

88. Deux états électriques différents. — Deux corps électrisés n'exercent pas toujours une répulsion entre eux. *Du Fay* découvrit (1733) qu'il se produit deux électrisations absolument différentes. Une barbe de plume qui a touché un morceau de verre frotté et qui en est repoussée est, au contraire, attirée si on lui présente un morceau de cire à cacheter frotté de la même manière.

Si on électrise la barbe de plume en lui faisant toucher d'abord le bâton de cire à cacheter, elle sera au contraire attirée par le verre électrisé et repoussée par le bâton de cire à cacheter. *Du Fay* fut conduit à admettre par ses expériences qu'il existait deux électricités : l'électricité *vitreuse* développée sur le verre par son frottement avec de la soie, et l'électricité *résineuse* obtenue en frottant de la cire à cacheter ou de la résine avec de la laine, chacune de ces substances ne pouvant produire qu'une seule espèce d'électricité. L'expérience a démontré que l'électrisation produite par le frottement de deux corps dépend à la fois du corps frottant et du corps frotté, car le verre prend de l'électricité résineuse en le frottant avec une peau de chat, et la résine de l'électricité vitreuse en la frottant avec un amalgame d'étain étendu sur une peau.

89. Production simultanée des deux états électriques. — Le frottement produit toujours les deux états électriques, pris l'un par le corps frotté, l'autre par le corps frottant.

Si on met en communication successivement le corps frotté et le corps frottant avec un troisième, ce dernier ne manifeste aucune action électrique, ce qui indiquerait que les deux états électriques ont été produits *en quantités égales*, et se sont équilibrés, *neutralisés*, en se communiquant au troisième corps.

On peut donc assimiler ces états électriques à des *quantités d'électricité positive* et *négative* développées sur les corps par le frottement, ces quantités étant rigoureusement égales et de signes contraires. Le signe donné à ces quantités est purement arbitraire, et c'est *par convention* que l'on attribue le signe positif à l'électrisation prise par la peau de chat frottant un bâton de cire à cacheter qui s'électrise alors négativement.

90. Électrisation par frottement. — Tous les corps peuvent être rangés dans un ordre tel qu'ils s'électrisent d'une manière ou d'une autre suivant leur ordre dans cette liste. Les premiers sur la liste s'électrisent *positivement* par rapport à ceux qui les suivent qui s'électrisent alors *négativement*. Les corps positifs correspondent aux corps *vitreux* de l'ancienne classification et les corps négatifs aux corps *résineux*.

Voici la liste des principaux corps dans l'ordre de leur électrisation par frottement :

+ <i>Peau de chat.</i>	<i>Gomme-laque et résines.</i>
<i>Verre poli.</i>	<i>Verre dépoli.</i>
<i>Étoffes de laine.</i>	<i>Soufre.</i>
<i>Plumes.</i>	<i>Métaux.</i>
<i>Bois.</i>	<i>Caoutchouc.</i>
<i>Papier.</i>	<i>Gutta-percha.</i>
<i>Soie.</i>	— <i>Collodion.</i>

Tous les corps frottés avec une peau de chat s'électrisent *négativement*, tandis que la peau de chat s'électrise *positivement* avec tous les corps.

En s'en tenant aux faits d'observation, et en dehors de toute hypothèse sur la nature intime des deux états électriques différents, on peut dire que les corps électrisés positivement se re-

poussent, les corps électrisés négativement se repoussent. Un corps électrisé positivement et un corps électrisé négativement s'attirent.

91. Charge électrique. — Décharge. — État neutre.

— Lorsqu'on électrise un corps, par frottement ou par contact avec un corps déjà électrisé, on lui communique une certaine quantité d'électricité qui constitue sa *charge électrique*. Un corps ainsi électrisé s'appelle un *corps chargé*.

Les charges des corps électrisés diffèrent par leur grandeur et leur signe. Lorsqu'un corps ne manifeste aucune propriété électrique on dit qu'il est à l'*état neutre*. L'opération par laquelle un corps chargé revient à l'état neutre s'appelle la *décharge*.

L'étude des corps chargés et de leurs propriétés constitue l'*électrostatique* ou étude de l'électricité *en équilibre*, par opposition à l'*électrocinétique* ou *électrodynamique* qui étudie l'électricité *en mouvement*.

92. Partage des charges.

— Lorsqu'un corps chargé est mis en communication avec un autre corps non chargé, les charges se partagent entre les deux corps suivant leurs *capacités* (114). Nous pouvons définir, jusqu'à nouvel ordre, la *capacité* comme la propriété que possède un corps de prendre une charge électrique.

Lorsque les deux corps sont de même forme et de mêmes dimensions la charge se divise, par raison de symétrie, en deux parties égales. C'est là un moyen de diviser les charges en plusieurs parties égales pour étudier les lois de leurs actions.

93. Conducteurs et isolants.

— En étudiant l'électrisation des corps par le frottement, Gilbert avait remarqué que tous les corps ne s'électrifaient pas. Il les avait divisés en deux classes :

- 1° Les *corps électriques* ou *idioélectriques* ;
- 2° Les *corps anélectriques*, incapables de s'électriser.

Parmi ces derniers, il rangeait les métaux, les liquides, le corps humain, l'air humide, etc. Leur impuissance à s'électriser venait de ce que, par suite de la conductibilité même de ces corps, leur électrisation se perdait dans la terre au fur et à mesure de son développement. Il suffisait de les *isoler* pour les rendre électriques. On distingua alors les *conducteurs* et les

isolants. Ces derniers ont été nommés par Faraday des *diélectriques*.

En réalité, il n'y a ni conducteurs ni isolants, mais une chaîne ininterrompue de corps de plus en plus isolants, depuis l'argent jusqu'à l'air sec, ou de plus en plus conducteurs depuis l'air sec jusqu'à l'argent : ceux qui occupent le milieu de la série peuvent s'appeler semi-conducteurs, suivant la nature des actions électriques auxquelles on les soumet, ils jouent tantôt le rôle de *conducteurs*, tantôt le rôle d'*isolants*.

La liste suivante fait connaître la chaîne d'isolement et de conductibilité des corps usuels.

LISTE DES CORPS USUELS

DANS LEUR ORDRE DE CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE DÉCROISSANTE
OU D'ISOLEMENT CROISSANT (*Culley*).

CORPS DITS CONDUCTEURS.	CORPS DITS SEMI-CONDUCTEURS.	CORPS DITS ISOLANTS OU DIÉLECTRIQUES.
Argent. Cuivre. Or. Zinc. Platine. Fer. Étain. Plomb. Mercure.	Charbon de bois et coke. Acides. Dissolutions salines. Eau de mer. Air raréfié (1). Glace fondante. Eau pure. Pierre. Glace non fondante. Bois sec. Porcelaine. Papier sec.	Laine. Soie. Verre (2). Cire à cacheter. Soufre. Résine. Gutta-percha. Caoutchouc. Gomme laque. Paraffine. Ebonite. Air sec.

(1) La place de l'air raréfié dans cette liste dépend du degré de raréfaction.
(2) Certaines variétés de verre bien sec isolent mieux que la gutta-percha.

La conductibilité électrique coïncide, en général, avec la conductibilité pour la chaleur. L'état moléculaire modifie la conductibilité. Le verre pulvérisé et le soufre conduisent mieux qu'à l'état ordinaire, le diamant est isolant, la plombagine conduit assez bien. La cire conduit à l'état liquide, mais non à l'état solide. La glace est isolante, l'eau conduit beaucoup mieux. Le verre conduit lorsqu'il est hygrométrique ou recouvert de vapeur d'eau, de là l'obligation de sécher les pieds des appareils. La chaleur rend les corps isolants conducteurs et di-

minue au contraire la conductibilité des métaux. Le verre brûlant, le soufre brûlant, l'air chaud conduisent mieux qu'à la température ordinaire. Nous reviendrons sur cette question à propos de la conductibilité pour les courants.

94. Sources d'électrisation autres que le frottement. — L'électricité à l'état statique s'est appelée longtemps à tort *électricité de frottement*.

Le frottement est, à la vérité, le moyen le plus employé pour développer des charges électriques, mais il est loin d'être le seul. La percussion, la compression, la chaleur, l'action chimique, les actions physiologiques, le contact, sont autant de sources d'électrisation. Le frottement produit *toujours* deux sortes d'électrisation, quelles que soient les substances frottées.

Les moindres différences d'état moléculaire ou de température changent la répartition. Il n'y a aucune équivalence entre le travail mécanique dépensé dans le frottement et la quantité d'électrisation produite. Le frottement n'est donc pas la vraie cause de l'électrisation qui est probablement le *contact de substances dissemblables*, contact que le frottement favorise ; il faut ensuite séparer les parties qui ont pris des états électriques différents pour pouvoir observer ces états différents, et le travail dépensé pour effectuer cette séparation représente l'énergie mise en jeu dans l'électrisation des corps.

Dans cet ordre d'idées, une machine électrique à frottement serait un appareil amenant au contact intime des substances dissemblables et séparant ensuite les parties qui se sont électrisées par leur contact mutuel.

95. Électroscopes. — Tout appareil permettant de reconnaître l'état d'électrisation d'un corps chargé est un *électroscope*. Le pendule magnétique, les brins de papier attirés par un corps électrisé constituent les formes les plus simples, sinon les plus sensibles de l'électroscope.

Le premier électroscope très sensible est dû à Gilbert. Cet appareil se composait d'une paille reposant par son centre de gravité sur une pointe aiguë. Tout corps léger mobile sur une pointe constitue d'ailleurs un électroscope.

L'*électroscope à feuilles d'or* est dû à *Bennet* (fig. 23). Il se compose de deux feuilles d'or très légères *a* et *b* suspendues à une

tige métallique à l'intérieur d'un bocal qui sert à les isoler et à les protéger de la poussière. La moindre électrisation commu-

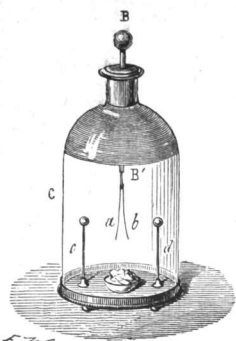


Fig. 23. — Électroscope à feuilles d'or.

niquée aux feuilles d'or les fait diverger, et l'électrisation communiquée aux feuilles d'or se conserve très longtemps si l'on a soin de maintenir l'intérieur du bocal parfaitement sec.

L'électroscope de Henley (1772) est constitué par une balle en moelle de sureau portée par une tige conductrice mobile sur un cadran d'ivoire. C'est un appareil peu sensible employé pour mettre en évidence des électrisations intenses.

96. Lois des actions des charges électrostatiques. Lois de Coulomb.

— Des corps électrisés exercent entre eux des attractions et des répulsions (87). Coulomb a déterminé à l'aide de sa balance les lois de ces actions, et il les a ainsi formulées :

La répulsion exercée entre deux corps dont les charges sont de même signe varie en raison inverse du carré de leur distance.

A distance égale, la force exercée entre deux corps chargés est égale au produit des charges que chacun de ces corps possède.

Les lois de Coulomb se résument dans la formule suivante : soit f la force exercée entre deux charges q et q' placées à une certaine distance d ,

$$f = k' \frac{qq'}{d^2}$$

k' étant une constante dépendant du milieu dans lequel s'exercent ces actions.

L'hypothèse fondamentale servant de base au système électrostatique consiste à faire $k' = 1$. Nous avons vu que le système magnétique (58) est basé sur une hypothèse analogue.

Nous examinerons un peu plus tard les conséquences de ces hypothèses au point de vue des dimensions des quantités physiques de même nature définies dans des systèmes différents, et des relations entre les grandeurs des unités qui servent à les mesurer dans chacun des systèmes.

97. Système électrostatique C.G.S. — Dans ce système, la formule de Coulomb simplifiée par l'hypothèse $k' = 1$ devient :

$$f = \frac{qq'}{d^2}$$

La force f est *répulsive* ou *attractive*, suivant que les charges q et q' sont de même signe ou de signes contraires.

La formule donne toujours le signe de la force répulsive, une force répulsive négative correspondant à une attraction.

C'est est partant de la loi de Coulomb que s'établissent, par définitions successives, les relations entre les différentes quantités électrostatiques ainsi que les unités C.G.S. correspondantes.

98. Quantité d'électricité. — Deux charges q et q' placées à une distance d exercent entre elles une force donnée par la loi de Coulomb

$$F = \frac{qq'}{d^2}.$$

En faisant $q = q'$, on en tire : $Fd^2 = q^2$,

$$\text{d'où } q = d\sqrt{F}.$$

Les dimensions de la quantité d'électricité dans le système électrostatique sont :

$$q = L\sqrt{LMT^{-2}} = L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}.$$

L'unité électrostatique C.G.S. de quantité est la quantité qui repousse une quantité égale placée à une distance de 1 centimètre avec une force égale à 1 dyne. Cette unité n'a pas reçu de nom spécial.

99. Répartition des charges électriques. — La charge électrique produite par le frottement sur un corps *isolant* ne se répartit que très lentement à sa surface et reste localisée au point où elle a été développée.

Si le corps électrisé est *conducteur*, la charge se répand presque instantanément sur toute sa surface, mais, en général, d'une façon irrégulière et que nous précisons un peu plus loin.

Conducteur ou isolant, *la charge réside entièrement à la surface du conducteur.*

On le démontre expérimentalement en construisant des conducteurs de même forme, pleins ou creux, en bois recouvert de feuilles d'étain ou de clinquant, etc., et en montrant que la charge ne dépend que des formes et des dimensions des conducteurs.

Plan d'épreuve. — Le *plan d'épreuve* est un petit appareil destiné à montrer l'existence des charges électriques et à étudier leur distribution, leur signe, etc. Il se compose d'un petit disque de papier doré ou d'une petite sphère métallique, montée sur un long manche isolant. On met le plan d'épreuve en contact avec le corps électrisé dont il prend une petite partie de la charge, et on le transporte ensuite près d'un électroscope pour étudier la charge ainsi *puisée* sur le corps électrisé.

100. Sphère creuse. Sphères de Biot. Filet et cage de Faraday. — Si on électrise une *sphère creuse* (fig. 24), isolée sur un manche de verre, on constate avec le plan d'épreuve qu'il n'y a aucune charge intérieure.



Fig. 24. — Sphère creuse.

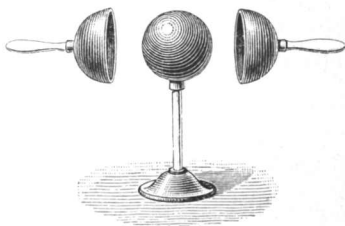


Fig. 25. — Sphères de Biot.

Les *sphères de Biot* (fig. 25), le *filet à papillons* (fig. 26) de Faraday, sont des appareils classiques de démonstration de l'absence de charge intérieure. Le fait que la charge est nulle à l'intérieur d'un conducteur fermé a été utilisé par Faraday à la construction d'*écrans électriques* destinés à protéger des appareils de mesure électrostatique très délicats de toute influence extérieure. Ce fait est aussi une conséquence néces-

saire de la loi de Coulomb (96), et sert même de démonstration à l'exactitude de cette loi (1).

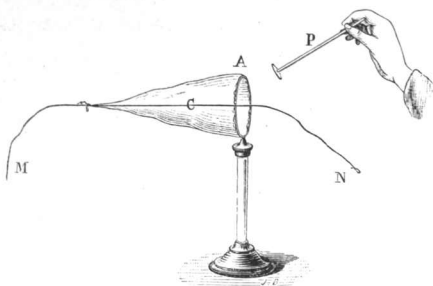


Fig. 26. — Filet à papillons de Faraday.

101. Densité électrique (σ). — Lorsqu'une quantité d'électricité Q est distribuée d'une manière uniforme sur une surface S , le rapport $\frac{Q}{S}$ est la *densité électrique* de la charge.

$$\sigma = \frac{Q}{S}.$$

Les dimensions de la densité électrique sont $L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$.

L'*unité électrostatique C.G.S. de densité électrique* est la densité d'une charge égale à 1 unité électrostatique C.G.S. de quantité distribuée uniformément sur une surface de 1 centimètre carré. Lorsque la charge n'est pas uniformément répartie, la densité en chaque point est la limite du rapport $\frac{Q}{S}$ lorsque S tend vers zéro autour du point considéré.

102. Distribution de la charge à la surface d'un conducteur. — L'expérience démontre que la charge ne se distribue pas uniformément à la surface d'un corps chargé : elle est plus grande aux extrémités, aux angles et aux pointes. La distribution d'une charge sur un conducteur est connue lorsqu'on connaît la densité électrique en chaque point (101).

Exemple : Sur une *sphère isolée*, la distribution est uniforme. Sur un *cylindre à bouts arrondis*, la densité est la plus

(1) *Introduction à l'étude de l'électricité statique*, par MM. E. Bichat et R. Blondlot, p. 18.

grande aux points où la courbure est la plus petite, c'est-à-dire aux extrémités. Avec *deux sphères en contact*, la densité est la plus grande aux points les plus éloignés du point de contact.

Pouvoir des pointes. — Lorsqu'un corps présente une *pointe*, c'est-à-dire une surface de très faible rayon de courbure, la densité y est très grande. La pression électrostatique (108) peut alors devenir suffisante pour que la charge pénètre dans l'air et décharge le conducteur sous forme d'aigrette ou d'étincelle. Le pouvoir des pointes a été découvert par *Franklin* en 1747.

103. Redistribution des charges. — Lorsqu'on enlève à un corps chargé une partie de sa charge, en le mettant, par exemple, en communication avec un autre corps non chargé, la charge restante se répartit, après la séparation, comme elle l'était avant le partage, la densité en chaque point se trouve diminuée dans le rapport de la charge restante à la charge initiale.

Dans le cas où les deux corps chargés ont même forme et mêmes dimensions, et où l'un d'eux seulement est chargé, ils se partagent également la charge, par raison de symétrie, la densité en chaque point sur le corps chargé devient, après la répartition, égale à la moitié de ce qu'elle était primitivement. Si les deux corps sont inégalement chargés, ils partagent leurs charges pour les égaliser, et possèdent chacun, après la répartition, une charge égale à la moitié de la somme algébrique des charges. Dans le cas où les charges sont égales et de signes contraires, la charge finale est nulle.

104. Champ électrique. — L'espace qui entoure un corps chargé ou un certain nombre de corps chargés s'appelle le *champ électrique*. Il est caractérisé par la présence de *lignes d'induction électrique*, analogues aux lignes de force magnétiques (61) qui représentent la trajectoire que suivrait une charge positive libre de se mouvoir dans le champ électrique.

Les lignes d'induction électrique d'une sphère chargée sont des rayons indéfiniment prolongés à la condition qu'il ne se produise pas à distance des phénomènes d'induction ou d'influence (116).

Lorsque les lignes de force d'un champ électrique sont parallèles et équidistantes, le champ est dit *uniforme*.

105. Intensité du champ électrique ou force électrique. — Une charge placée dans un champ électrique est soumise à une force dirigée suivant les lignes d'induction électrique, et proportionnelle à l'intensité du champ et à la charge. La *force électrique* en un point du champ est donc le rapport de la force exercée sur une charge placée dans le champ à cette charge elle-même.

L'expression *force électrique* nous semble peu appropriée, car la quantité physique dont il s'agit *n'est pas* une force, mais le rapport d'une force à une quantité d'électricité, aussi préférons-nous l'expression *intensité de champ électrique*.

Les dimensions de l'intensité de champ électrique sont : $L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$.

Un point d'un champ électrique a une intensité égale à 1 unité électrostatique C.G.S. lorsqu'il exerce une force égale à 1 dyne sur une quantité d'électricité égale à 1 unité électrostatique C.G.S. de quantité.

106. Flux de force électrique. Théorème de Gauss.

— Si l'on considère une petite surface élémentaire dS autour d'une ligne de force d'un champ électrique, le *flux de force* traversant cette surface dS est le produit de l'intensité du champ au point où se trouve la surface élémentaire multipliée par cette surface dS .

On démontre, comme pour le flux de force magnétique produit par un pôle (65), que le flux de force électrique total produit par une quantité d'électricité q est égal à $4\pi q$.

Cette relation, conséquence directe d'un théorème plus général, énoncé par *Gauss* en 1813 et connu sous le nom de *Théorème de Gauss*, s'exprime en disant que :

Le flux de force total sortant d'une surface donnée est égal à 4π fois la quantité d'électricité que cette surface renferme.

Le flux est, par convention, *sortant* ou *positif* lorsqu'il est produit par une charge positive, il est *entrant* ou *négatif* lorsqu'il provient d'une charge négative.

107. Théorème de Coulomb. — *L'intensité du champ électrique (ou force électrique) en un point infiniment voisin d'un corps chargé en équilibre est égale à la densité électrique en ce point multipliée par 4π .*

En effet, si l'on considère un élément de surface dS et le tube de force correspondant, le flux de force HdS doit être égal à la quantité d'électricité en ce point σdS multipliée par 4π , d'après le théorème de Gauss. On a donc

$$H dS = 4\pi\sigma dS$$

d'où

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

108. Pression électrostatique. — L'intensité du champ électrique H a une valeur nulle à l'intérieur d'un corps chargé, et, d'après le théorème de Coulomb (107), elle est égale à $4\pi\sigma$ à une distance très petite de la surface du corps chargé : H a donc varié de 0 à $4\pi\sigma$ en traversant la couche électrique. On ne connaît pas la loi de variation, mais on peut néanmoins déterminer la pression à laquelle est soumise la charge en chaque point, ou *pression électrostatique*.

Considérons une surface S (fig. 27) d'épaisseur AC à la surface d'un corps chargé. Menons une section MN parallèle aux

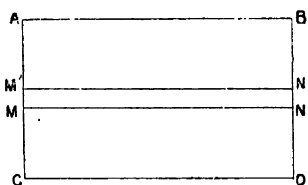


Fig. 27.

bases (fig. 27); soit q la quantité d'électricité dans la partie $CDMN$. Le flux de force électrique latéral est nul; le flux à travers CD est nul puisque CD est dans l'intérieur du conducteur chargé où H est nul. Le flux à travers MN est $HS = 4\pi q$ d'après le théorème de Gauss (106). Si

nous découpons une tranche infiniment petite par une section voisine $M'N'$, elle renfermera une quantité élémentaire dq , et la force qui s'exerce sur cette quantité élémentaire sera égale à

$$Hdq = \frac{4\pi}{S} q dq.$$

La force totale F qui s'exerce sur tout le cylindre renfermant la quantité Q sera :

$$F = \int_0^Q H dq = \int_0^Q \frac{4\pi}{S} q dq = \frac{2\pi}{S} Q^2.$$

Mais la pression électrostatique p est $\frac{F}{S}$.

$\frac{Q}{S}$ n'étant autre chose que la densité électrique (101) au point considéré, on a

$$p = 2\pi \frac{Q^2}{S^2} = 2\pi\sigma^2$$

Cette pression électrostatique tend à repousser la charge vers l'extérieur, mais la charge reste à la surface parce qu'elle ne peut pénétrer dans le milieu mauvais conducteur qui l'en-

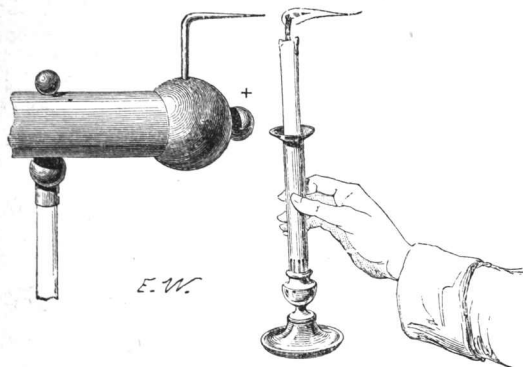


Fig. 28. — Vent électrique.

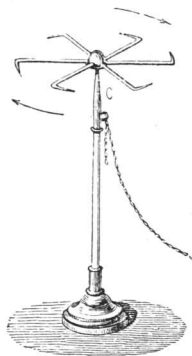


Fig. 29. — Tourniquet électrique.

tourne, excepté aux pointes ou aux arêtes où, la densité étant très grande, la charge s'échappe sous forme d'aigrettes et produit des phénomènes mécaniques tels que le *vent électrique* (fig. 28) et le *tourniquet électrique* (fig. 29).

109. Force exercée par un plan indéfini sur une

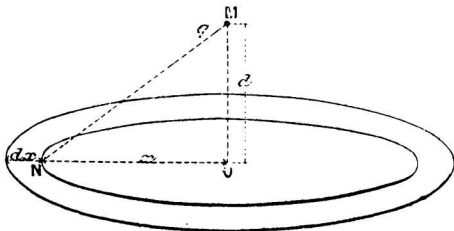


Fig. 30. — Force exercée par un plan indéfini sur une charge.

charge. — Considérons une charge q placée à une distance d d'un plan indéfini chargé (fig. 30) et cherchons la force exercée

par le plan sur la charge q . Appelons σ la densité de la charge sur le plan, et décomposons-le en petits anneaux élémentaires ayant pour centre commun le pied de la perpendiculaire abaissée de la charge q . L'un de ces anneaux $(x, x+dx)$ renferme une quantité d'électricité égale à

$$\pi\sigma[(x+dx)^2 - x^2] = 2\pi\sigma x dx$$

en négligeant $2\pi\sigma dx^2$, infiniment petit du second ordre. En appliquant la loi de Coulomb, on a pour valeur de la force normale exercée par l'anneau $x, x+dx$:

$$df_n = \frac{2q\sigma\pi l x dx}{x^2+l^2} \cdot \frac{l}{\sqrt{x^2+l^2}}.$$

Cette expression simplifiée et intégrée depuis $x=0$ jusqu'à $x=\infty$ donne finalement

$$f_n = 2\pi\sigma q.$$

Expression remarquable montrant que la force exercée par le plan sur la charge q est indépendante de la distance. Nous appliquerons plus loin cette formule à la théorie des électromètres à attraction.

110. Potentiel. — Considérons une charge positive q isolée dans l'espace, et une charge q' , également positive, placée à une grande distance. Il s'exerce entre q et q' une force répulsive dont la grandeur est donnée par la loi de Coulomb (96). Si nous voulons rapprocher la charge q' de la charge q , il faudra dépenser un certain *travail*, travail d'autant plus grand que les charges q et q' seront plus grandes. Supposons que la charge q' soit à une distance infinie, et qu'on l'amène en un point A à une distance r de la charge q . Il faudra dépenser un travail W.

Définition. — Le potentiel au point A dû à la charge q est le rapport du travail dépensé pour amener la charge q' de l'infini au point A à cette charge q' . On le désigne par la lettre V.

$$V = \frac{W}{q'} \quad (1)$$

Si la charge q est négative, le travail dépensé est négatif, ainsi que le potentiel au point A dû à la charge q .

Considérons la charge q' à une distance r , la force répulsive F exercée par la charge q sur la charge q' est égale à

$$\frac{qq'}{r^2}.$$

Si elle s'approche d'une quantité dr , le travail élémentaire dW dépensé pour produire ce déplacement est

$$dW = \frac{qq' dr}{r^2} = d\left(-\frac{qq'}{r}\right).$$

En faisant la somme des travaux depuis l'infini jusqu'au point A

$$W_{\infty}^A = \left(-\frac{qq'}{r}\right)_{\infty}^A = \frac{qq'}{r} - 0 = \frac{qq'}{r}.$$

Expression indépendante du chemin parcouru. En portant cette valeur dans l'équation (1)

$$V = \frac{W}{q'} = \frac{q}{r}.$$

Si l'on a plusieurs charges q, q', q'' , placées à des distances $r, r', r'' \dots$ du point considéré, le potentiel en ce point est égal à la somme algébrique des potentiels dus aux différentes charges.

$$V = \sum \frac{q}{r}.$$

111. Potentiel, différence de potentiel. — Le *potentiel en un point* dû à une charge q est le rapport de la charge q à sa distance à ce point. Le potentiel en un point est donc le rapport d'une quantité d'électricité à une longueur.

Les dimensions du potentiel dans le système électrostatique sont $L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$.

Un point est à un potentiel égal à 1 unité électrostatique C.G.S. lorsqu'il est à une distance de 1 centimètre d'une charge égale à 1 unité électrostatique C.G.S. de quantité.

La *différence de potentiel* entre deux points est le rapport du travail qu'il faut dépenser pour amener une quantité q d'électricité (+) d'un point à l'autre à cette quantité q .

Il existe entre deux points une différence de potentiel égale à 1 unité électrostatique C.G.S. lorsqu'il faut dépenser un

travail égal à 1 erg pour amener une charge égale à 1 unité électrostatique C.G.S. de quantité d'un point à l'autre. L'unité de différence de potentiel n'a pas reçu de nom spécial.

112. Potentiel zéro. — A une distance infinie de tout corps chargé, il ne s'exerce aucune force électrique, le potentiel est nul. En pratique, on est convenu de considérer le potentiel de la terre au point où l'on se trouve comme étant égal à zéro.

113. Surfaces équipotentiellles. — Lorsqu'une charge électrique se déplace dans un champ électrique (104) sans effectuer ni dépenser aucun travail, elle décrit une *surface équipotentielle*.

Pour une sphère chargée, les surfaces équipotentiellles sont des sphères concentriques. Ces surfaces se compliquent dès qu'il y a plusieurs corps chargés dans le champ, mais elles ne se coupent jamais parce que le potentiel ne peut pas avoir deux valeurs différentes en un point donné.

Les lignes de force ou d'induction électrique sont toujours normales au plan tangent d'une surface équipotentielle aux points où elles traversent ces surfaces. Les intersections des lignes de force et des surfaces équipotentiellles par un plan forment toujours des systèmes orthogonaux.

114. Capacité. — Considérons un corps conducteur possédant une charge q . Son potentiel est uniforme et égal à V . Si nous doublons son potentiel, nous doublerons sa charge et par suite nous doublerons la densité électrique en chaque point. Il y a donc un rapport constant entre le potentiel et la charge d'un conducteur. Ce rapport constant s'appelle la *capacité électrostatique*, ou simplement la *capacité* du conducteur.

$$C = \frac{q}{V}.$$

Les dimensions de la capacité électrostatique sont : L.

L'unité électrostatique C.G.S. de capacité est la capacité d'un conducteur dont le potentiel augmente de 1 unité électrostatique C.G.S. lorsqu'on augmente sa charge de 1 unité électrostatique C.G.S. de quantité.

Une sphère de 1 centimètre de rayon a une capacité égale à 1 unité électrostatique C.G.S. de capacité.

Deux conducteurs ont la même capacité lorsque, chargés au même potentiel, ils prennent des charges égales.

Deux conducteurs chargés au même potentiel prennent des charges proportionnelles à leurs capacités. Deux conducteurs possédant des charges égales sont à des potentiels inversement proportionnels à leurs capacités.

115. Capacité d'une sphère isolée. — Lorsqu'on communique une charge q à une sphère de rayon r , son potentiel est $\frac{q}{r}$ sa capacité est donc égale à r .

La capacité d'une sphère est égale à son rayon.

Une sphère de 1 centimètre de rayon a une capacité égale à 1 unité électrostatique C.G.S de capacité.

La capacité d'un *ellipsoïde* ⁽¹⁾ est représentée par une fonction assez complexe de ses trois axes.

La capacité d'un *plateau circulaire* de rayon r a pour expression ⁽²⁾

$$C = \frac{2r}{\pi} = \frac{r}{1,571}.$$

116. Potentiel à la surface d'un corps conducteur chargé. — Le potentiel étant le même en tous les points d'un corps conducteur chargé, il suffit, pour en avoir la valeur, de déterminer ce potentiel en un point quelconque.

Cas d'une sphère. — Considérons une sphère de 1 centimètre de rayon et donnons-lui une charge égale à une unité C.G.S. Cette charge agit comme si elle était placée au centre. A 1 centimètre du centre, c'est-à-dire à la surface de la sphère, son potentiel est

$$V = \frac{q}{r} = 1$$

Comme $Q = VC$, il en résulte que la capacité de la sphère est égale à son rayon, et que les capacités électrostatiques des sphères en unités C.G.S. sont proportionnelles et numériquement égales à leurs rayons exprimés en centimètres.

(1) *Mascart et Joubert*, t. I, § 74, 75, 76.

(2) *Ibid.*

Densité à la surface d'une sphère. — Pour une sphère de rayon r , la surface est $4\pi r^2$.

Si on communique à cette sphère une charge Q , on aura pour la densité σ

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{4\pi r^2}.$$

Et comme la charge est uniformément répartie, σ est constant
 $Q = 4\pi r^2 \sigma$.

Pour deux sphères r et r' on a :

A densité égale : $\frac{Q}{Q'} = \frac{r^2}{r'^2}$.

A charge égale : $\frac{\sigma}{\sigma'} = \frac{r'^2}{r^2}$.

INDUCTION ÉLECTROSTATIQUE OU INFLUENCE.

Lorsqu'un corps conducteur isolé, non chargé, est placé dans un champ électrique, il manifeste des signes d'électrisation. Ce phénomène, découvert en 1753 par *Canton*, s'appelle *influence*, *induction électrostatique*, ou simplement *induction*.

Les corps chargés produisant le champ électrique est le corps *influent* ou *inducteur*, le corps conducteur isolé est le corps *influencé* ou *induit*.

117. Faits d'expérience. — Soit A (fig. 31) un corps

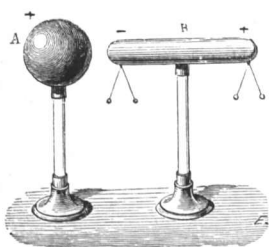


Fig. 31. — Influence : cas d'un conducteur isolé.

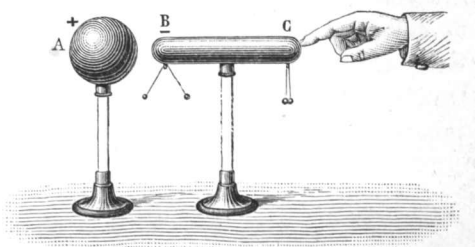


Fig. 32. — Influence : cas d'un conducteur communiquant avec le sol.

possédant une charge positive : si on l'approche d'un conducteur B isolé, à l'état neutre, l'extrémité la plus éloignée de A se trouve électrisée positivement, l'extrémité la plus rapprochée est électrisée négativement.

En retirant le corps inducteur, tout revient à l'état neutre. Si le conducteur B est en deux parties et qu'on les sépare, l'extrémité A possède une charge de signe contraire à celle de C et l'extrémité B une charge de même signe.

En faisant communiquer le conducteur BC avec le sol pendant un instant (fig. 32), en le touchant avec le doigt par exemple, et en enlevant l'inducteur, le conducteur isolé possède une charge *de signe contraire* de celle possédée par l'inducteur.

118. Induction sur un conducteur fermé. Théorème de Faraday. — Si l'induit entoure entièrement l'inducteur, la quantité d'électricité induite à l'intérieur du conducteur est égale et de signe contraire à la charge q de l'inducteur.

Puisqu'il y a équilibre électrique, c'est que le flux de force total dû aux charges est nul ; en appelant q' la charge induite sur la face interne, on a, d'après le théorème de Gauss (106)

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

d'où

$$q = -q'.$$

Cette relation est connue sous le nom de *théorème de Faraday*.

Il en résulte que lorsqu'on fait des expériences dans une salle fermée, les parois de cette salle sont chargées d'une quantité d'électricité égale et de signe contraire à la somme algébrique de toutes les charges des appareils renfermés dans la salle.

On démontre expérimentalement le théorème de Faraday à l'aide d'une expérience connue sous le nom de *seau à glace de Faraday*.

Considérons un seau métallique profond et isolé (fig. 33), relié à un électroscope à feuilles d'or.

En introduisant dans ce seau un corps chargé C, la divergence des feuilles d'or augmente jusqu'à un certain degré d'enfoncement à partir duquel elle reste constante.

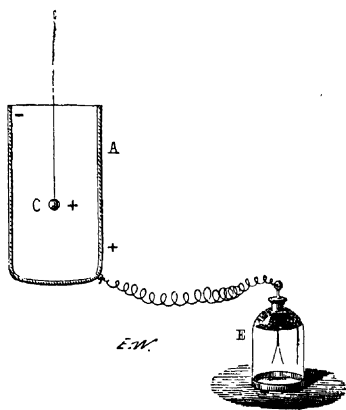


Fig. 33. — Seau à glace de Faraday.

Elle reste également constante si on fait toucher le corps chargé à la paroi du seau, mais alors en retirant le corps C, on constate qu'il n'est plus chargé. Sa charge s'est transmise au seau. Voici l'interprétation ordinaire de ce phénomène dans l'hypothèse des deux fluides.

En introduisant la charge q dans le seau, elle a induit une charge égale à $-q$ à l'intérieur du seau et une charge extérieure $+q$. C'est cette charge $+q$ qui fait dévier l'électroscope.

En faisant toucher le seau et l'inducteur la charge $+q$ de l'inducteur équilibre la charge $-q$ intérieure, et il reste seulement la charge antérieure $+q$ sur le seau. C'est une preuve nouvelle du fait que, dans des conducteurs en équilibre, il ne peut y avoir de charge électrique qu'à la surface extérieure.

119. Théorie de l'induction électrostatique. Conservation du flux d'induction. — Un corps chargé est un corps d'où émane un flux de force ou d'induction électrique, le flux Φ étant égal à 4π fois la charge q . Les lignes de force *sortent* ⁽¹⁾ d'un corps possédant une charge positive et *rentrent* ou s'absorbent dans un corps possédant une charge négative égale. Un corps isolé possédant une charge positive, tel que nous l'avons considéré au début de notre étude, serait un corps pour lequel toutes les lignes de force iraient se perdre à l'infini.

En pratique, ce cas n'est jamais rigoureusement réalisé, et les lignes de force émanant d'un corps chargé aboutissent aux parois de l'enceinte qui l'entoure, réalisant plus ou moins complètement l'expérience du seau à glace de Faraday (118). Les charges sont donc, en réalité, les extrémités où aboutissent les lignes d'induction, ce qui justifie la nécessité des charges égales et de signes contraires dans tout phénomène d'électrostatique et la conservation du flux d'induction.

En partant de ces considérations, si différentes de l'hypothèse surannée des deux fluides, il va être facile d'interpréter les phénomènes fondamentaux de l'influence.

Une sphère isolée, chargée, placée au centre d'une vaste salle dont les parois communiquent au sol — potentiel zéro —

(1) Ce sens est purement conventionnel.

produit un champ électrique caractérisé par des lignes de force rayonnantes et des surfaces équipotentiellles sphériques (113).

Nous en approchons un corps conducteur isolé non chargé (induit). Ce corps va se trouver porté au potentiel moyen de la région dans laquelle il est placé, et sa surface sera une surface équipotentielle. Sa présence a donc modifié la répartition initiale du champ électrique, puisque la surface équipotentielle de niveau moyen qui était une sphère concentrique à la sphère chargée est maintenant celle du corps introduit dans le champ. Un certain nombre de lignes d'inductions aboutiront à la surface la plus rapprochée du corps induit (charge négative), et sortiront par son extrémité la plus éloignée (charge positive), pour s'absorber dans les parois de la salle au potentiel zéro.

En mettant l'induit en communication avec le sol, son potentiel devient nul, et sa surface devient une surface équipotentielle pour laquelle $V = 0$. Il n'y a plus de lignes d'induction sortant de l'induit, c'est-à-dire qu'il ne possède plus de charge positive : il est chargé négativement, tout en étant au potentiel zéro. Nouvelle répartition des lignes d'induction.

En retirant la communication avec le sol, on ne change ni la distribution du champ électrique ni le potentiel de l'induit.

Si, enfin, nous éloignons le corps inducteur, le flux rentrant que nous avons ainsi créé sur le corps induit isolé n'est pas pour cela anéanti, il aboutit aux parois de la salle au potentiel zéro ; le corps est chargé négativement.

A la limite, lorsque le corps induit enveloppe entièrement le corps inducteur, et c'est le cas de l'expérience de Faraday, tout le flux de force émis par le corps chargé positivement aboutit à l'intérieur de l'induit, la charge induite est égale à la charge inductrice. La charge extérieure de même signe et de même grandeur que la charge inductrice, charge que l'on constate avec l'électroscope, résulte de ce que le potentiel du seau à glace (induit) est intermédiaire entre celui de l'inducteur et celui de la terre, et qu'une ligne de force partant d'un corps chargé ne peut se terminer qu'en un point de potentiel nul. Il doit donc émaner du seau un flux égal à celui qui y a été introduit par la charge inductrice. Le théorème de Faraday

(118) n'est donc qu'une manière indirecte d'exprimer le principe de la *conservation du flux d'induction*.

Nous trouverons d'autres conséquences de ce fait dans la théorie des condensateurs et dans l'étude de l'énergie potentielle des charges électriques.

120. Applications de l'induction électrique. — On peut, en mettant à profit l'induction électrostatique, étudier le signe d'une charge électrique sans en rien dépenser, ce que ne permet pas le plan d'épreuve.

Il suffit pour cela d'introduire le corps à étudier dans le seau à glace de Faraday chargé au préalable d'une certaine quantité d'électricité dont on connaît le signe. Si la divergence de l'électroscope *augmente*, la charge du conducteur est de même signe que celle de l'électroscope.

On peut aussi communiquer par induction, à un conducteur ou à un électroscope, une charge de signe contraire à celle d'un corps chargé donné. Il suffit d'approcher le corps chargé de l'électroscope, et de mettre en contact avec le sol pendant un instant et de retirer ensuite le corps inducteur. L'électroscope possède alors une charge de signe contraire.

CONDENSATION. — CONDENSATEURS.

Jusqu'ici nous avons étudié les charges indépendamment des réactions qu'elles peuvent exercer les unes sur les autres et des modifications qu'une charge donnée peut produire sur le potentiel et la distribution des autres charges placées dans son voisinage. Les réactions des corps chargés les unes sur les autres donnent lieu à des phénomènes très importants réunis sous le nom de phénomènes de *condensation électrique*, et à une série d'appareils nommés *condensateurs*.

121. Principe de la condensation électrique. — Le condensateur à plateau d'*Æpinus* (1760) est l'appareil qui convient le mieux à la démonstration des phénomènes de condensation. Il se compose de deux plateaux verticaux en laiton A et B (fig. 34) montés sur des pieds de verre et munis de pendules pour montrer à chaque instant la répartition des charges et des potentiels. Ces disques montés sur une glissière peuvent être rapprochés ou éloignés à volonté.

Communiquons d'abord une charge positive, pour fixer les idées, au plateau A en le mettant en communication avec une source d'électrisation quelconque, et rapprochons le plateau B communiquant avec le sol par une chaîne métallique. On constate que le potentiel de la charge à la surface de A diminue et que pour l'amener au même potentiel il faut lui fournir un surcroît de charge.

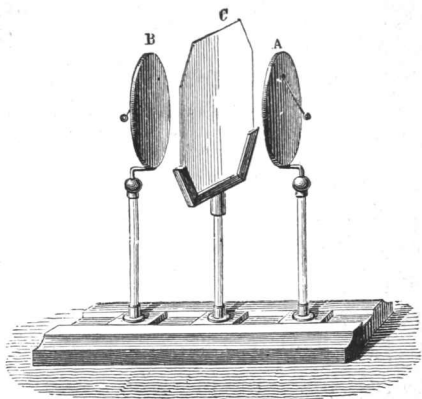


Fig. 34. — Condensateur d'Épinus.

La présence de B permet donc à A de prendre une charge plus grande que s'il était seul. C'est cette propriété qui constitue la *condensation*. L'ensemble des plateaux constitue un *condensateur* dans lequel le plateau A est le *collecteur* et le plateau B le *condenseur*. Les phénomènes de condensation trouvent facilement leur explication par la considération du potentiel dû à des corps chargés.

122. Théorie des condensateurs. — Considérons une sphère de rayon r , placée au centre d'une seconde sphère creuse de rayon r' reliée à la terre. En communiquant une charge à la sphère r , à l'aide d'un corps chargé placé assez loin pour ne pas induire le système, on communique une charge $+q$ à la sphère r , et une charge induite $-q$ à la sphère r' reliée au sol. Le potentiel V de la sphère r s'obtient en prenant le potentiel au centre, potentiel qui est celui de la source

$$V = \Sigma \frac{q}{r} = \frac{q}{r} - \frac{q}{r'} = q \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right).$$

Si la sphère r était isolée dans l'espace, sa charge q' serait donnée par la relation :

$$V = \frac{q'}{r} = q' \frac{1}{r}.$$

Le facteur $\frac{1}{r}$ est $> \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right)$, il faut donc que q soit $> q'$ pour

porter le système au même potentiel dans le cas des deux sphères. La capacité du système est donc augmentée : il y a *condensation*. La présence d'un corps conducteur relié à la terre, c'est-à-dire mis au potentiel zéro, et voisin d'un corps chargé, a donc pour effet d'*augmenter* sa capacité. Si le corps possédait une charge constante, l'augmentation de capacité a eu pour effet de faire baisser son potentiel.

On appelle *force condensante* ou *pouvoir condensant* le rapport de la capacité d'un système muni de son condensateur à sa capacité lorsqu'il est isolé. Le pouvoir condensant ne joue d'ailleurs aucun rôle dans l'étude des condensateurs, et c'est seulement la *capacité* du système qu'il importe de connaître.

Le calcul des capacités d'un condensateur constitue, en général, un problème très compliqué, et ne peut être résolu que pour des cas simples. Nous examinerons ceux qui présentent un intérêt pratique.

123. Capacité de deux sphères concentriques. —

Soient r et R les rayons des deux sphères. R est relié à la terre, r est porté au potentiel V . Il se développe par induction, à l'intérieur de la sphère R , une charge q égale et de signe contraire à celle de la sphère r .

Le potentiel V de la sphère r est alors

$$V = \frac{q}{r} - \frac{q}{R} = q \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right).$$

Et comme

$$C = \frac{q}{V},$$

on a

$$C = \frac{1}{\frac{1}{r} - \frac{1}{R}} = \frac{Rr}{R - r}.$$

La capacité est proportionnelle au produit des rayons des sphères et inversement proportionnelle à la différence de leurs rayons. Si R et r sont exprimés en centimètres, la capacité du système sera exprimée en unités électrostatiques C.G.S. On peut donc déduire la capacité électrostatique du système de ses dimensions. Les condensateurs de formes géométriques

simples dont on peut calculer les capacités par les dimensions sont dits *condensateurs absolus*.

124. Capacité de deux conducteurs cylindriques concentriques de longueur indéfinie. — 1° Le diélectrique est l'*air*. La charge étant uniforme, et la densité partout la même, si on appelle Q la charge d'une longueur l du cylindre intérieur, cette charge sera $-Q$ sur le cylindre extérieur. Con-

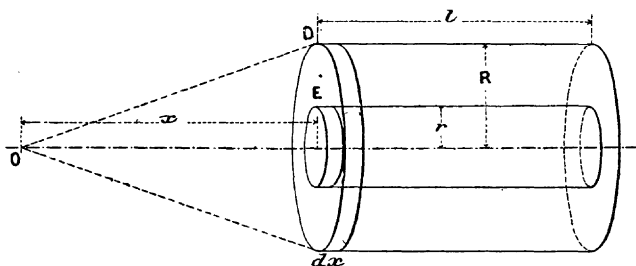


Fig. 35. — Capacité de deux cylindres concentriques indéfinis.

sidérons (fig. 35) deux anneaux de hauteur dx découpés par deux plans perpendiculaires à l'axe, leurs charges seront

$$\frac{Q dx}{l} \text{ et } -\frac{Q dx}{l}.$$

Appelons R et r les rayons et x la distance du plan considéré à un point O sur l'axe des cylindres, le potentiel élémentaire dV dû aux deux anneaux aura pour expression

$$dV = \frac{Q dx}{l.OE} - \frac{Q dx}{l.OD} = \frac{Q}{l} \left(\frac{dx}{\sqrt{r^2 + x^2}} - \frac{dx}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right).$$

En intégrant

$$V = \frac{Q}{l} \left[\log_e \left(\frac{x + \sqrt{r^2 + x^2}}{r} \right) - \log_e \left(\frac{x + \sqrt{R^2 + x^2}}{R} \right) \right]$$

$$V = \frac{Q}{l} \log_e \left(\frac{x + \sqrt{r^2 + x^2}}{x + \sqrt{R^2 + x^2}} \frac{R}{r} \right).$$

Entre les limites $+\infty$ et $-\infty$, on trouve

$$V = \frac{2Q}{l} \log_e \frac{R}{r}.$$

d'où

$$Q = \frac{Vl}{2 \log_e \frac{R}{r}};$$

et comme

$$C = \frac{Q}{V},$$

$$C = \frac{l}{2 \log_e \frac{R}{r}} = \frac{0,434l}{2 \log \frac{R}{r}}.$$

Si l , R et r sont exprimés en centimètres, la capacité est exprimée en unités électrostatiques C.G.S.

125. Capacité de deux cylindres très rapprochés.

— Lorsque l'on a deux cylindres très rapprochés, $R = r + d$, en appelant d leur distance, la capacité C du système a pour valeur

$$C = \frac{l}{2 \log_e \frac{R}{r}} = \frac{l}{2 \log_e \left(1 + \frac{d}{r}\right)},$$

mais $\frac{d}{r}$ étant très petit, on peut remplacer $\log_e \left(1 + \frac{d}{r}\right)$ par $\frac{d}{r}$; on a alors

$$C = \frac{l}{\frac{2d}{r}} = \frac{lr}{2d}.$$

Soit S la surface du cylindre de longueur l , on a :

$$S = 2 \pi r l; \quad r l = \frac{S}{2\pi}$$

et

$$C = \frac{S}{4\pi d}.$$

Relation déjà établie pour les condensateurs plans, en partant de la formule relative à deux sphères concentriques.

La formule donnant la capacité de deux cylindres très rapprochés est applicable aux bouteilles de Leyde, aux condensateurs plans, et aux électromètres à anneau de garde que nous décrirons plus complètement dans le chapitre consacré à l'électrométrie.

126. Capacité d'un cylindre et d'un plan. — Dans ce cas R est infini, et r très petit par rapport à d , distance du plan au fil cylindrique.

On a alors

$$C = \frac{l}{2 \log_e \frac{2d}{r}}$$

Cette formule s'applique au calcul de la capacité des lignes aériennes suspendues.

Cylindre isolé. — En faisant R infini dans la formule, on trouve $C = 0$.

Un cylindre isolé n'a pas de capacité.

La formule relative à deux cylindres excentriques est très compliquée. Elle a été donnée par *E. Blavier* dans le *Journal de physique* (1874).

127. Capacité des condensateurs plans. — On peut assimiler les condensateurs plans à des condensateurs cylindriques dont le rayon est infiniment grand, et la distance des armatures très petite. En appelant d la distance, σ la densité et V le potentiel, on a ⁽¹⁾

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

En théorie, la densité est plus grande sur les bords, mais on peut considérer la distribution comme uniforme si la distance d est petite par rapport à la surface.

Les densités sur les deux faces sont respectivement, en appelant d et d' les distances

$$\sigma = \frac{V}{4\pi d} \quad \sigma' = \frac{V}{4\pi d'}$$

$$Q = S\sigma + S\sigma' = \frac{VS}{4\pi} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} \right)$$

(1) En effet, dans un condensateur plan, on a

$$C = \frac{S}{4\pi d}; \quad Q = VC = \frac{VS}{4\pi d}$$

et

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{V}{4\pi d}$$

d'où

$$C = \frac{S}{4\pi} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} \right).$$

Si le condensateur est formé par l'armature au potentiel V placée à égale distance de deux autres, $d = d'$ et

$$C = \frac{S}{2\pi d}.$$

Cas particulier. — S'il n'y a que deux plaques, comme dans les bouteilles de Leyde et les carreaux fulminants, $\frac{1}{d'}$ devient négligeable devant $\frac{1}{d}$ et

$$C = \frac{S}{4\pi d}.$$

128. Diélectriques. — Les actions électriques se transmettent à travers un milieu isolant. C'est ce milieu auquel Faraday a donné le nom de *diélectrique*. L'expérience prouve que les actions électriques sont modifiées par la nature du diélectrique. Le fait découvert par *Cavendish* en 1771 fut redécouvert par *Faraday* en 1837. En particulier, si l'on construit un condensateur dont l'intervalle qui sépare les deux conducteurs soit occupé par des milieux isolants différents, l'air et un solide, comme du soufre fondu ou de la résine, et qu'on charge ces condensateurs au même potentiel à l'aide d'une source électrique quelconque, la charge prise par les condensateurs à diélectrique solide est plus grande que celle prise par le condensateur à air.

129. Capacité inductive spécifique. — Faraday appelle *capacité inductive spécifique* ou *pouvoir inducteur spécifique* d'un diélectrique le rapport de la charge que prend un condensateur, constitué par le diélectrique, à celle qu'il prendrait en remplaçant, toutes choses égales d'ailleurs, le diélectrique par l'air. La capacité inductive spécifique ou *constante diélectrique*, est donc un simple rapport numérique.

Il en résulte que la capacité d'un condensateur dépend non seulement de la forme des armatures et de leur distance,

mais aussi de la capacité inductive spécifique du diélectrique interposé. Le tableau suivant fait connaître les capacités inductives spécifiques des corps les plus employés comme diélectriques.

Capacités inductives spécifiques.

SUBSTANCES.	CAPACITÉ INDUCTIVE SPÉCIFIQUE.	AUTORITÉ.
Air à la pression de 1 millimètre de mercure	0,97	Ayrton.
Air à la pression de 5 millimètres de mercure.....	0,9985	Ayrton.
Hydrogène à 760 millimètres.....	0,9997	Boltzmann.
Air à 760 millimètres.....	1,0000	<i>Etalon.</i>
Acide carbonique à 760 millimètres.....	1,000356	Boltzmann.
Paraffine claire.....	1,92 à 1,96	"
	1,979	Gibson et Barclay.
	2,32	Boltzmann.
Caoutchouc pur	2,34	Schiller.
— vulcanisé.....	2,94	"
Résine.....	2,55	"
Ebonite.....	2,56 à 2,76	"
	3,15	Boltzmann.
Soufre.....	2,88 à 3,21	Wüllner.
Gomme-laque.....	3,84	Boltzmann.
Gutta-percha.....	4,2	"
Mica.....	5,00	"
Flint-glass.....	6,57	J. Hopkinson.
{ très léger.....	6,85	—
{ léger.....	7,4	—
{ dense.....	10,1	—
{ double extra-dense.....		

130. Bouteille de Leyde, jarres et batteries. — Les bouteilles de Leyde (fig. 36), les jarres et batteries (fig. 37), ne sont pas autre chose que des condensateurs de grande capacité auxquels on donne la forme et les dimensions les plus diverses.

On peut, par exemple, constituer une bouteille de Leyde avec un gobelet en verre formant le diélectrique, du plomb de chasse et une cuillère constituant l'armature intérieure et la main formant l'armature extérieure.

La charge d'une bouteille réside en entier dans le diélectrique : on le démontre à l'aide de la classique *bouteille à armatures mobiles* (fig. 38).

Cette charge ne se produit qu'avec une lenteur relative; la charge croît et tend vers une limite. La décharge n'est pas non

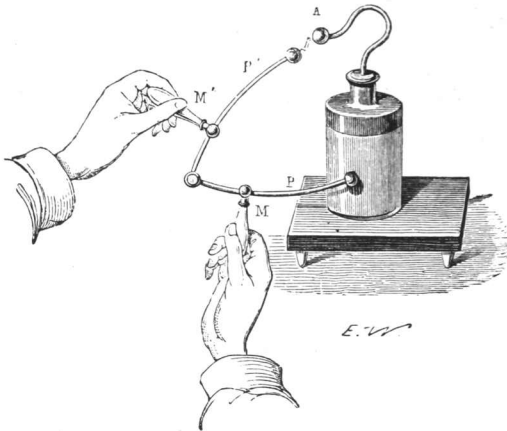


Fig. 36. — Bouteille de Leyde.

plus instantanée et il se produit, avec les diélectriques solides, des décharges résiduelles. C'est ce phénomène, encore mal

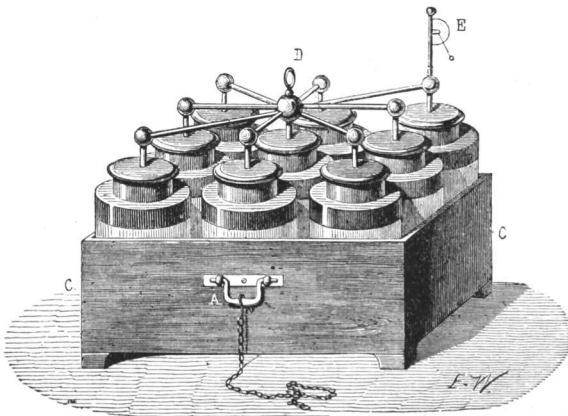


Fig. 37. — Batterie électrique.

étudié, que Faraday appelle *absorption électrique*, et sur lequel nous reviendrons à propos des capacités dans le système électromagnétique. L'absorption varie avec la nature du dié-

lectrique, et ne se manifeste pas pour les diélectriques gazeux.

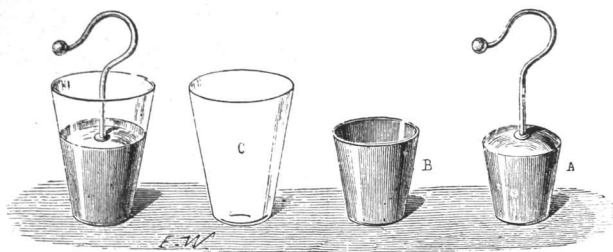


Fig. 38. — Bouteille de Leyde à armatures mobiles.

131. Couplages des condensateurs. — On peut coupler les condensateurs en surface, en série ou en cascade et en séries multiples.

Couplage en surface. — On relie entre elles toutes les armatures intérieures et, d'autre part, toutes les armatures entre elles. Le système constitue un condensateur dont la capacité totale est égale à la somme des capacités des condensateurs séparés.

En appelant C la capacité totale, c, c_1, c_2, \dots les capacités partielles, on a :

$$C = c + c_1 + c_2 + \dots$$

Si les n condensateurs renferment des charges séparées,

$$q = c v \quad q_1 = c_1 v_1 \quad q_2 = c_2 v_2 \dots$$

et qu'on les réunisse, on aura pour la quantité totale :

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

Et pour le potentiel commun :

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{c v + c_1 v_1 + c_2 v_2 + \dots}{c + c_1 + c_2 + \dots}$$

Couplage en cascade. — L'armature intérieure du condensateur c est reliée à l'armature extérieure de c_1 , l'armature intérieure de c_1 à l'armature extérieure de c_2, \dots , etc., l'armature extérieure de c et l'armature intérieure de c_m restant libres. On démontre facilement que

$$C = \frac{1}{\frac{1}{c} + \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots}$$

Si les n condensateurs ont la même capacité c , on a

$$C = \frac{c}{n}.$$

Le montage en cascade permet d'utiliser des potentiels élevés, sans dépasser celui que peut supporter l'isolement du diélectrique et sa résistance mécanique à la décharge. Le potentiel se trouve distribué par échelons sur les condensateurs successifs.

Couplage en séries multiples. — Lorsqu'on dispose de n condensateurs de capacités différentes, on peut les associer ensemble et réaliser ainsi un grand nombre de capacités variables, la plus grande étant donnée par les n condensateurs en surface, et la plus petite par les n condensateurs en cascade ⁽¹⁾.

132. Électroscope condensateur. — Cet appareil, imaginé par Volta (1775), a pour but de rendre sensibles de très petites différences de potentiel en mettant à profit les propriétés des condensateurs. Il se compose (fig. 39) d'un électroscope à feuilles d'or dont la boule est remplacée par un plateau A en laiton verni à la gomme laque. On y place un second plateau B de même dimension et isolé par un manche en verre ou en ébonite. Pour constater une différence de potentiel entre deux points, on les met en communication avec les deux plateaux à l'aide de conducteurs. Le condensateur de grande capacité formé par les deux plateaux prend alors une certaine charge. En enlevant le plateau supérieur, on diminue la capacité, on élève alors le potentiel et les feuilles d'or

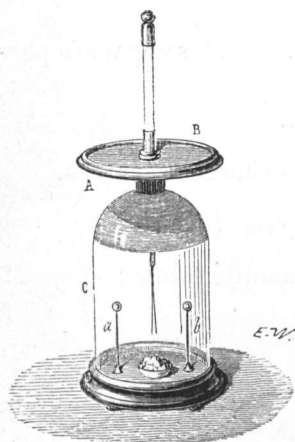


Fig. 39. — Électroscope condensateur de Volta.

(1) *Mnémotechnie.* — Les formules relatives aux couplages des condensateurs sont identiques mais *inverses* de celles relatives aux couplages des résistances électriques (173).

divergent fortement. On peut alors considérer le condensateur ainsi employé comme un *multiplicateur* de potentiel.

Nous aurons l'occasion de revenir sur les propriétés et les applications des condensateurs en électrodynamique.

ÉNERGIE POTENTIELLE DES CHARGES ÉLECTRIQUES.

Un corps ou système chargé d'électricité et revenant à l'état neutre, *se déchargeant*, produit une certaine quantité d'énergie, essentiellement positive, et qui se manifeste par des actions mécaniques, calorifiques, lumineuses, physiologiques, etc. Il a donc fallu, en vertu du principe de la conservation de l'énergie, lui fournir une quantité d'énergie égale à celle qu'il restitue pendant la décharge, énergie qui existe dans le système à l'état d'*énergie potentielle*. La grandeur de cette énergie potentielle peut se déterminer, soit en calculant le travail dépensé pour charger le système, soit en mesurant l'énergie restituée pendant la décharge.

133. Énergie d'un conducteur chargé unique. — Soient V son potentiel, q sa charge, C sa capacité. Pour augmenter sa charge d'une quantité dq , il faut dépenser un travail égal à $V dq$.

L'accroissement d'énergie est alors :

$$dW = V dq = \frac{q}{C} dq.$$

Pour faire passer la charge de la valeur q_0 à la valeur q_1 , il faudra dépenser une quantité de travail égale à :

$$W_1 - W_0 = \int_{q_0}^{q_1} \frac{q dq}{C} = \frac{1}{2C} (q_1^2 - q_0^2).$$

Comme $W_0 = 0$ pour $q = 0$, l'énergie correspondante à une charge q a donc pour expression, en tenant compte des relations précédemment établies

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV.$$

Si Q , C et V sont exprimés en unités électrostatiques C.G.S., W est exprimé en ergs.

134. Énergie potentielle d'un système de conducteurs chargés. — On démontre, par un raisonnement analogue au précédent, qu'en appelant q_1, q_2, \dots , les charges, et V_1, V_2, \dots , les potentiels, on a pour expression de l'énergie totale

$$W = \frac{1}{2} (q_1 V_1 + q_2 V_2 + \dots) = \frac{1}{2} \Sigma qV.$$

L'énergie potentielle d'un système de conducteurs chargés est égale à la demi-somme des produits de chaque charge par le potentiel correspondant.

Un corps isolé n'agit que par influence et possède une charge nulle : il n'intervient donc pas *directement* dans la valeur de l'énergie potentielle d'un système de conducteurs, pas plus qu'un corps relié à la terre et dont le potentiel est toujours nul. Ces corps n'interviennent qu'indirectement, par les modifications qu'ils apportent dans la valeur des capacités, et, par suite, des potentiels.

Nous allons appliquer ce principe à quelques problèmes présentant un intérêt pratique.

135. Énergie potentielle des condensateurs. — On peut, comme nous l'avons indiqué, coupler les condensateurs *en surface* ou *en cascade*.

Condensateurs en surface. — L'énergie due à la décharge est, dans le cas de n condensateurs identiques, ayant chacun une capacité C :

$$W = \frac{1}{2n} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} nCV^2.$$

A charge donnée, l'énergie est en raison inverse du nombre des condensateurs ; à potentiel donné, l'énergie est proportionnelle au nombre des condensateurs.

Condensateurs en cascade. — La capacité C de n condensateurs c, c', c'' en cascade est donnée par la relation

$$C = \frac{1}{\frac{1}{c} + \frac{1}{c'} + \frac{1}{c''} + \dots}$$

Si la cascade se compose de n condensateurs identiques,

$$C = \frac{c}{n}.$$

Et l'énergie potentielle est :

$$W = \frac{1}{2} n \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \frac{CV^2}{n}.$$

Pour une charge donnée, l'énergie est n fois plus grande que celle d'un seul condensateur; pour un potentiel donné, elle est n fois plus petite, mais elle permet d'utiliser des potentiels élevés sans détruire le diélectrique, le potentiel total se partageant également entre les n condensateurs.

Riess avait démontré ces lois expérimentalement à l'aide de son thermomètre électrique.

Les propriétés des couplages des condensateurs ont été fort ingénieusement mises à profit par M. Gaston Planté dans un appareil auquel il a donné le nom de *machine rhéostatique*, et que nous décrirons à propos des *phénomènes d'énergie des décharges électriques*.

136. Travail de déplacement des charges électriques. — Lorsqu'on permet un déplacement relatif à un système de corps conducteurs chargés, sous l'influence des seules forces électriques en présence, on modifie l'énergie du système. Ce déplacement peut s'effectuer à charge constante ou à potentiel constant.

Déplacement à charge constante. — Les corps conducteurs chargés et isolés, abandonnés à eux-mêmes, obéissent aux forces électriques qu'ils exercent entre eux, ils tendent à produire un certain travail extérieur emprunté à leur énergie potentielle qui, en vertu du principe de la conservation de l'énergie, diminue d'une quantité égale.

L'énergie potentielle tend vers un minimum, ainsi que le potentiel, tandis que la capacité tend vers un maximum.

Un corps conducteur isolé primitivement à l'état neutre est attiré dans le champ électrique, parce que sa présence fait baisser le potentiel (122).

Déplacement à potentiel constant. — Ce potentiel est main-

tenu constant par une source étrangère, l'énergie potentielle du système s'accroît d'une quantité égale au travail des forces électriques. Il est positif et emprunté à la source électrique qui maintient le potentiel constant.

Cette énergie se compose de deux parties égales, l'une produit le travail de déplacement, l'autre augmente l'énergie potentielle du système qui tend vers un maximum, ainsi que les capacités ⁽¹⁾. Dans tous les cas, potentiel constant ou charge constante, *la capacité tend vers un maximum*, ce qui, dans chaque cas, permet de prévoir le sens du déplacement.

137. Électroscopes et électromètres. — Les électroscopes et les électromètres ne sont que des applications du travail de déplacement des charges électriques. Lorsqu'on établit une différence de potentiel constante entre des corps isolés, nous venons de voir (136) que la capacité du système tend vers un maximum. C'est pour cela qu'il s'exerce une répulsion entre les corps chargés de même signe et une attraction entre les corps chargés de signes contraires, puisque ces mouvements sont ceux qui rendent la capacité maxima et l'énergie potentielle minima.

Nous étudierons les électromètres plus complètement à propos de la mesure des potentiels en *électrocinétique*.

Lorsque l'énergie d'un système électrisé se modifie, il se manifeste, pendant la *période variable* qui sépare deux états d'équilibre successifs, des effets de mouvement : de l'énergie est mise en jeu, mais les effets ainsi produits n'ont plus rien d'électrostatique que le nom rappelant leur origine, et leur étude doit être faite avec celle de l'*électricité dynamique*.

138. Machines électriques. Électrophore. — Puisque tous les corps chargés représentent une certaine quantité d'énergie *potentielle* qui devient *actuelle* pendant la décharge, il a donc fallu, en vertu du principe de la conservation de l'énergie, dépenser, pour produire les charges, dans un appareil quelconque approprié, une quantité d'énergie *au moins* égale à celle que représentent les charges.

On appelle *machine électrique* tout appareil qui, dépensant

(1) Mascart et Joubert, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. I, p. 96.

de l'énergie mécanique, la transforme en énergie électrique capable de produire des charges électrostatiques et de l'énergie potentielle.

Nous croyons devoir réserver l'examen des machines électriques jusqu'au moment où nous aurons terminé l'étude du courant électrique. Les machines électriques ne seront plus alors considérées que comme un cas particulier de ces transformations d'énergie, et leur compréhension sera beaucoup plus facile et plus rapide que dans l'état actuel de nos connaissances relativement aux phénomènes électriques.

Nous pouvons cependant dire déjà quelques mots de l'*électrophore de Volta* (1775), la plus simple des machines électriques que l'on puisse réaliser. L'électrophore se compose (fig. 40) d'un gâteau de cire à cacheter ou résine, coulée dans un moule métallique, ou d'une plaque d'ébonite, et d'un disque en bois recouvert de papier d'étain terminé par un manche isolant en verre ou en ébonite.

En frappant le plateau d'ébonite avec une peau de chat, il s'électrise négativement (90). On place à sa surface le disque qui, ne touchant le gâteau qu'en un petit nombre de points, forme condensateur, s'électrise par influence et prend

une charge positive lorsqu'on l'a mis en communication avec le sol pendant un instant en le touchant avec le doigt. Si on retire alors le disque, on diminue la capacité du système et on augmente le potentiel du disque qui se trouve chargé positivement, et dont on peut utiliser la charge à volonté. Une seule charge du plateau permet d'obtenir un nombre indéfini de charges du disque. L'énergie potentielle représentée par la charge du disque est fournie par l'opérateur au moment où il soulève le disque pour l'éloigner du plateau. L'électrophore rentre donc bien dans la série des *machines électriques* proprement dites.

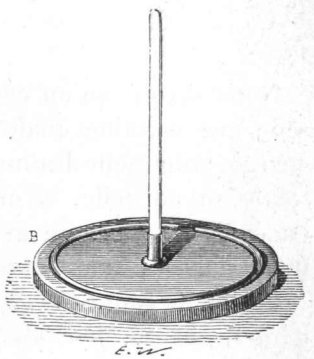


Fig. 40. — Électrophore de Volta.

CHAPITRE III

LE COURANT ÉLECTRIQUE SYSTÈME ÉLECTROMAGNÉTIQUE C.G.S.

Nous savons qu'un corps chargé à un certain potentiel possède une certaine quantité d'*énergie potentielle*. Lorsque son énergie potentielle diminue, il la restitue sous forme de *décharge* totale ou partielle, et produit certains effets particuliers mis en évidence dans un grand nombre d'expériences improprement classées dans l'étude de l'*électrostatique*.

Ces effets sont *calorifiques, lumineux, mécaniques, physiologiques, etc.* Si, *par un artifice quelconque*, nous maintenons le potentiel constant et que nous produisons une décharge continue et constante, nous constatons des phénomènes continus et constants, dans le conducteur et l'espace qui l'environne; ce conducteur et l'espace qui l'environne possèdent des propriétés qu'ils ne possédaient pas auparavant: on dit alors que ce conducteur est traversé par un *courant électrique*.

On assimile, *par convention*, ce courant électrique à un véritable *écoulement* ou *flux* d'électricité traversant le conducteur, mais cet écoulement ne peut se produire qu'aux dépens d'une certaine quantité d'*énergie* qui l'entretient et qui peut être empruntée, *suivant l'artifice employé pour maintenir le potentiel constant*, à du travail mécanique, de la chaleur, de l'affinité chimique, etc. On crée ainsi de l'énergie électrique par transformation d'une autre forme de l'énergie. L'appareil qui est le

siège de cette transformation constitue un *générateur électrique* ou *source d'énergie électrique*.

Le plus simple des générateurs d'énergie électrique est la *pile hydro-électrique*, fondée sur la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique.

139. Principe de la pile hydro-électrique. — Lorsqu'on plonge deux métaux dans un liquide qui les attaque inégalement, et qu'on relie ces deux métaux par un *conducteur* métallique, ce conducteur est le siège de phénomènes particuliers qui se manifestent à l'extérieur par des effets calorifiques, lumineux, mécaniques, physiologiques, magnétiques, etc. C'est ce phénomène qui ne nous est connu que par ses manifestations qu'on appelle *courant électrique*, et qu'on assimile, par convention, à un *flux* ou écoulement allant, dans le conducteur extérieur du corps le moins attaqué ou *pôle +* au corps le plus attaqué ou *pôle négatif (-)*.

Ce courant électrique se manifeste tant que le corps le plus attaqué subsiste et que le liquide attaquant n'est pas épuisé.

Le premier générateur électrique de cette nature est la pile de *Volta* (1800) formée (fig. 41) d'une lame de cuivre C et d'une lame de zinc Z plongeant dans de l'eau acidulée sulfurique.

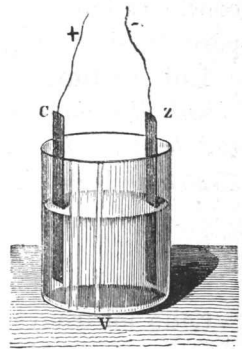


Fig. 41. — Pile de Volta.

Ce moyen de produire un courant nous suffit pour l'étudier *en dehors de ses causes*, et en analyser les effets.

140. Éléments du courant électrique. — La cause en vertu de laquelle un courant s'établit dans un conducteur, et qui tend à maintenir une *différence de potentiel* constante entre les deux extrémités de ce conducteur s'appelle *force électromotrice*. Cette force électromotrice est donc la *cause* du courant, comme la force, en mécanique, est la cause du mouvement ; cette cause a pour *effet* de produire une différence de potentiel aux extrémités du conducteur et un *flux d'électricité* ou *courant électrique* traversant ce conducteur.

Par convention, le courant est supposé circuler dans un

conducteur du point où le potentiel est le plus élevé au point où il est le plus bas. Il n'y pas de courant dans un conducteur dont les extrémités sont au même potentiel.

Les actions diverses produites par ce courant dépendent de sa grandeur, de son *intensité*, et celle-ci dépend à son tour de la force électromotrice de la source et de l'obstacle ou *résistance* que le conducteur oppose au passage du courant.

Le chemin parcouru par le courant constitue le *circuit électrique*. Les trois éléments qui caractérisent et définissent un courant traversant un circuit électrique sont donc la force électromotrice, la résistance du circuit et l'intensité du courant.

Ces trois éléments sont reliés entre eux par une loi importante découverte par *Ohm* en 1827, en s'appuyant sur des considérations purement mathématiques, loi redécouverte expérimentalement quelques années après par *Pouillet*.

Loi d'Ohm. — *L'intensité I d'un courant traversant un circuit électrique est proportionnelle à la force électromotrice E qui le produit, et inversement proportionnelle à la résistance électrique R du circuit qu'il traverse.*

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

Cette loi trouvera sa démonstration expérimentale dans les nombreuses méthodes de mesure où nous en ferons l'application ; chaque expérience donnant des résultats conformes à ceux indiqués par la théorie, sera une démonstration nouvelle de cette loi : nous pouvons donc l'admettre comme une loi expérimentale démontrée *a posteriori*.

Mais la loi d'Ohm n'établit qu'une équation de condition entre trois quantités physiques. D'autres considérations sont donc nécessaires pour définir complètement les trois quantités physiques qui figurent dans cette loi.

On pouvait choisir arbitrairement, pour établir de nouvelles relations entre E, I et R, parmi les actions si nombreuses et si variées que produit le courant, mais le *Congrès international des électriciens* tenu à Paris en 1881 ayant adopté comme base des définitions des quantités et unités électriques les effets *magnétiques* du courant, et sanctionné par son choix le *système*

électromagnétique C.G.S., ce sont les effets magnétiques du courant dont nous aborderons tout d'abord l'étude.

141. Actions magnétiques du courant. — C'est *Oersted*, de Copenhague, qui découvrit, en 1820, qu'un courant agit sur l'aiguille aimantée. Il démontra que l'aiguille tend à se mettre en croix avec le courant, et que le sens de la rotation dépend de la position relative de l'aimant et du courant, ainsi que du sens de ce courant. *Ampère* a résumé tous les cas étudiés par *Oersted* dans une règle qui porte son nom et dont voici l'énoncé :

142. Règle d'Ampère. — Si l'on suppose un observateur couché sur le fil, de manière que le courant lui entre par les pieds, et regardant l'aiguille, le pôle nord ira toujours vers la

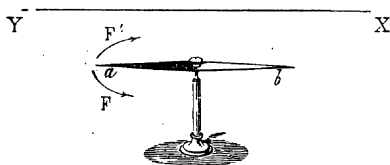


Fig. 42. — Expérience fondamentale d'Oersted.

gauche de l'observateur, ou, comme on le dit souvent, en personnifiant le courant, vers la *gauche* du courant. Dans la figure 42 allant de X vers Y, le pôle nord *a* de l'aiguille ira dans le sens indiqué par la flèche F.

Si un courant passe au-dessus de l'aiguille aimantée dans un certain sens et au-dessous de l'aiguille en sens inverse, les

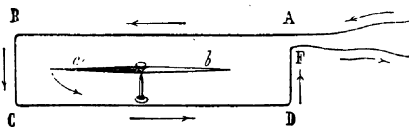


Fig. 43. — Expérience d'Oersted dans le cas d'un cadre.

deux portions du courant ajouteront leurs actions et produiront une action directrice plus énergique (fig. 43).

143. Galvanoscopes. — Un système analogue à celui que nous venons de réaliser est un *galvanoscope*, c'est-à-dire un appareil capable de signaler l'existence d'un courant dans le

fil. Le galvanoscope ainsi construit est un appareil assez peu sensible au passage des courants très faibles.

Pour comprendre comment on peut augmenter sa sensibilité, il faut étudier de plus près les propriétés magnétiques du courant mises en évidence par la découverte d'Oersted.

144. Champ galvanique. —

Lorsqu'un courant traverse un conducteur, que nous supposons tout d'abord rectiligne, il développe dans l'espace qui l'entoure un *champ galvanique* absolument identique au *champ magnétique* produit par un aimant permanent. Ce champ galvanique est caractérisé par la présence de lignes de force qu'on peut mettre

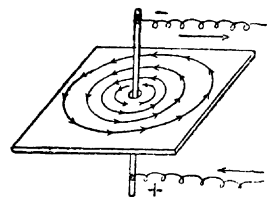


Fig. 44. — Direction des lignes de force d'un champ galvanique.

en évidence à l'aide de la limaille de fer si le courant est assez intense.

Dans le cas d'un courant rectiligne, ces lignes de force sont

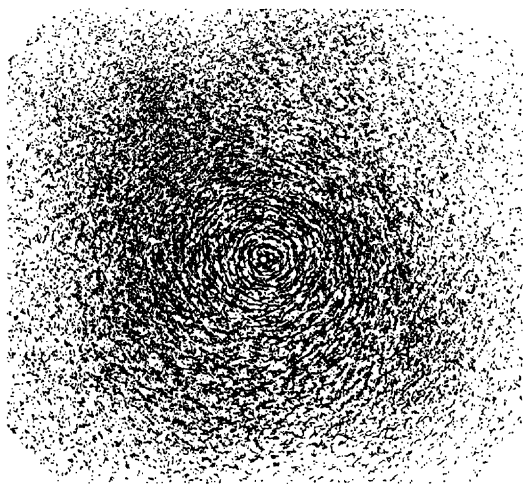


Fig. 45. — Fantôme produit par un courant rectiligne dans un plan indéfini perpendiculaire à sa direction.

des cercles fermés concentriques au conducteur dans des plans perpendiculaires à sa direction. Le champ galvanique prend

naissance avec le courant et cesse avec lui. Si l'on suppose le conducteur vertical, et que l'on considère les lignes de force dans un plan horizontal, chacune d'elles forme un cercle; le sens des lignes de force est celui des aiguilles d'une montre pour le courant descendant, et inverse de celui des aiguilles d'une montre pour un courant ascendant (fig. 44).

Avec un courant d'intensité suffisante, on obtient des *fantômes galvaniques* aussi nets qu'avec des aimants. La figure 45 montre le fantôme obtenu avec un courant rectiligne vertical perpendiculaire au plan du fantôme.

On trouve facilement la direction de ces lignes de force du champ à l'aide de la règle suivante formulée par Maxwell, et qui est équivalente à la règle du bonhomme d'Ampère (142).

145. Règle du tire-bouchon de Maxwell. — Lorsqu'on tourne un tire-bouchon dans le sens des aiguilles d'une montre il *avance* dans le bouchon; il recule lorsqu'on tourne en sens contraire.

En assimilant le sens du courant à celui de la rotation du tire-bouchon, le sens de son avancement fait connaître celui

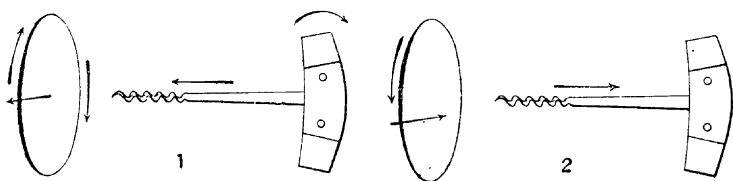


Fig. 46. — Application de la règle du tire-bouchon de Maxwell.

des lignes de force fermées produites par le courant dans le champ galvanique (fig. 46). L'application de cette règle est très simple et très rapide.

146. Galvanoscopes sensibles. Multiplicateur. Aimant compensateur. Système astatique. — Un galvanoscope est donc, d'après ce que nous venons de voir, un système dans lequel une aiguille aimantée est soumise à l'action de deux champs : l'un *magnétique*, le champ terrestre lorsqu'il n'y a pas d'aimant dans le voisinage, l'autre *galvanique* produit par le courant. On peut donc augmenter la sensibilité du système en augmentant l'action du courant, comme l'a fait *Schweigger*

(1823) à l'aide de son cadre multiplicateur. On peut obtenir un résultat analogue en réduisant l'action du champ directeur, soit à l'aide d'un *aimant compensateur* produisant un champ inverse à celui du magnétisme terrestre et l'affaiblissant, soit à l'aide d'un *système astatique*, comme l'a fait Nobili (1826). Cette question sera traitée plus complètement à propos des galvanomètres et de l'étude du champ galvanique.

147. Intensité du champ galvanique. — Un champ galvanique est identique, par sa nature et ses propriétés, à un champ magnétique (62); il se mesure avec les mêmes unités (¹), et s'indique par la même lettre H. L'intensité d'un champ galvanique est donc le rapport de la force exercée par le champ sur un pôle magnétique placé en un point du champ, à l'intensité de ce pôle :

$$H = \frac{f}{m}.$$

Un champ est déterminé lorsqu'on connaît en chaque point sa direction, son sens et son intensité.

Une petite aiguille aimantée placée en chaque point du champ donne sa direction et son sens. L'intensité peut se mesurer par les mêmes méthodes que celles employées pour le champ magnétique. Dans certains cas, on peut calculer ce champ en faisant l'intégrale des actions élémentaires produites par un élément du courant sur un pôle magnétique, en partant de la formule exprimée par une loi connue sous le nom de *Loi de Laplace*, et dont on a déduit la définition de l'unité d'intensité de courant. On admet alors implicitement que les intensités des courants sont proportionnelles aux actions magnétiques que ces courants exercent.

Le système basé sur cette hypothèse fondamentale constitue le *système électromagnétique* (152).

(¹) Quelques auteurs ont adopté comme unité pratique de champ magnétique ou galvanique un multiple de l'unité C.G.S., auquel ils donnent le nom de *Gauss*.

1 gauss = 10⁸ unités magnétiques C.G.S. d'intensité de champ.

Cette unité pratique est peu employée et n'a pas été sanctionnée par le Congrès de 1881.

148. Action élémentaire d'un courant sur un pôle magnétique. — C'est *Ampère* qui a cherché, d'une manière générale, à déterminer les actions réciproques des aimants et des courants en considérant ces actions comme la résultante des actions dues à chacun des éléments de longueur dans lesquels on peut décomposer le courant, et cherché à déduire de l'expérience la loi de ces actions élémentaires. Comme le font remarquer avec raison MM. Mascart et Joubert ⁽¹⁾, bien que la recherche d'une loi élémentaire ainsi comprise ne réponde qu'à une conception purement mathématique, la méthode n'en est pas moins légitime tant qu'on se propose seulement de déterminer l'action résultante du circuit tout entier. La seule condition nécessaire est que la loi élémentaire intégrée donne, dans tous les cas, un résultat conforme à l'expérience, plusieurs lois élémentaires pouvant d'ailleurs satisfaire à cette condition fondamentale. C'est ainsi qu'en s'appuyant sur certains principes fondamentaux, les uns évidents, les autres résultant de l'expérience, on arrive à formuler une loi, connue sous le nom de *Loi de Biot et Savart*, ou *Loi de Laplace*, ces trois savants ayant concouru à l'établir par leurs travaux.

Nous renvoyons, pour la démonstration de cette loi élémentaire, à l'ouvrage de MM. Mascart et Joubert.

149. Loi élémentaire de Laplace. — Un conducteur rectiligne de longueur dl , traversé par un courant d'intensité I , exerce sur un pôle magnétique d'intensité m placé à une distance b une force élémentaire df donnée par la formule

$$df = \frac{kmI dl \sin \alpha}{b^2}$$

α étant l'angle formé par l'élément de courant dl avec la droite qui joint son milieu au pôle m , et k une constante dépendant du milieu dans lequel s'exercent les actions magnétiques, constante égale à l'unité dans le système électromagnétique C.G.S.

Direction de la force. — La force est perpendiculaire au plan passant par le pôle m et l'élément de courant dl . *Ampère* appelle ce plan le *plan directeur*.

(1) *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. I, p. 502.

Sens de la force. — Si l'on suppose un observateur couché sur l'élément, le courant lui entrant par les pieds, et regardant le pôle m , ce pôle qui est un pôle nord par définition (62) sera poussé de la droite vers la gauche, de m vers df (fig. 47).

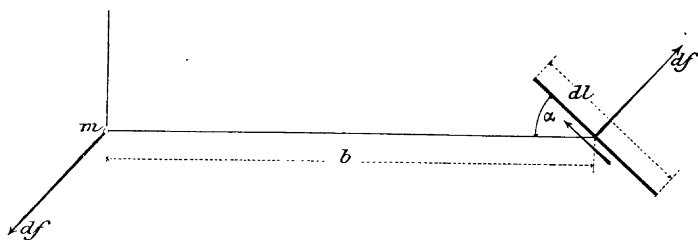


Fig. 47. — Force exercée sur un pôle par un élément de courant.

En vertu du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, la force exercée par le pôle sur le conducteur élémentaire aura la même valeur numérique, elle sera perpendiculaire au plan déterminé par le pôle et le conducteur et dirigée vers la gauche d'un observateur couché dans le courant et regardant dans la direction de la ligne de force émanant du pôle m et passant par le milieu de dl (fig. 47).

150. Action d'un champ magnétique sur un élément de courant. — A une distance r d'un pôle, le champ a , par définition, une intensité égale $H = \frac{m}{r^2}$.

Il en résulte que l'action d'un champ sur un conducteur placé dans ce champ sera une force égale à

$$df = HI \, dl \sin \alpha.$$

Cette force est normale au plan passant par l'élément de courant et la direction du champ au point où est l'élément, elle est dirigée vers la gauche du courant. La formule montre, par exemple, que la force est nulle si le conducteur est parallèle à la direction du champ, et qu'elle est maxima lorsque le conducteur élémentaire est perpendiculaire aux lignes de force du champ.

151. Intensité du champ produit par un élément de courant. — En appliquant la loi de Laplace à la détermination de l'intensité élémentaire dH du champ produit par un élément de courant, nous avons

$$dH = \frac{df}{m} = \frac{I dl \sin \alpha}{b^2}.$$

Pour avoir l'intensité du champ produit par un circuit entier, il suffit d'intégrer les actions élémentaires pour tout le circuit, opération assez facile lorsque les circuits ont des formes géométriques simples.

Nous donnerons plusieurs exemples à propos de l'étude des champs galvaniques.

SYSTÈME ÉLECTROMAGNÉTIQUE C.G.S.

Nous avons vu (149) que la loi élémentaire de Laplace fait intervenir dans le calcul de l'action élémentaire d'un courant une constante k dépendant du milieu dans lequel s'exercent les actions électromagnétiques. C'est là une constante du même ordre que celle que nous avons rencontrée à propos de la loi de Coulomb (57).

152. Système électromagnétique. — Le *système électromagnétique* est basé sur la loi de Laplace en faisant comme hypothèse fondamentale $k=1$.

Toutes les quantités, grandeurs et unités dérivées de ce système forment les quantités, grandeurs et unités du système électromagnétique C.G.S.

Les deux hypothèses fondamentales ($k'=1$ dans la loi de Coulomb et $k=1$ dans la formule de Laplace) créent une anomalie caractérisée par ce fait que deux quantités physiques de même nature ont des dimensions différentes dans les deux systèmes. Il y a lieu d'espérer qu'une connaissance plus complète de la vraie nature physique des coefficients k fera disparaître avant peu cette anomalie.

Nous dirons plus loin comment il est possible de passer d'un système à l'autre sans porter atteinte à l'homogénéité des formules, dans chacun des systèmes en particulier, en attendant que les deux systèmes se trouvent réduits à un seul, par la connaissance exacte des constantes k et k' .

La formule élémentaire de Laplace va nous permettre de définir toutes les quantités et unités du système électromagné-

tique en partant de l'intensité du courant qui s'en déduit directement.

153. Intensité de courant (I). — La formule de Laplace appliquée à un courant circulaire et à un pôle m placé dans son plan et en son centre montre que l'intensité du courant I est proportionnelle à la force f qu'il exerce sur le pôle m , au carré du rayon r du circuit, inversement proportionnelle à l'intensité du pôle m et à la longueur du circuit l

$$I = \frac{f r^2}{l m}.$$

Les dimensions de l'intensité du courant sont donc

$$I = \frac{L T^{-2} M \cdot L^2}{L \cdot L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}} = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

Un courant a une intensité égale à 1 *unité électromagnétique C.G.S. d'intensité* lorsque, roulé sous forme d'un arc de cercle de 1 centimètre de rayon et de 1 centimètre de longueur, il exerce une force de 1 dyne sur un pôle de 1 unité C.G.S. d'intensité placé en son centre. Cette unité n'a pas reçu de nom spécial.

154. Intensité du champ galvanique produit par un cadre circulaire. — Considérons (fig. 48) un circuit circu-

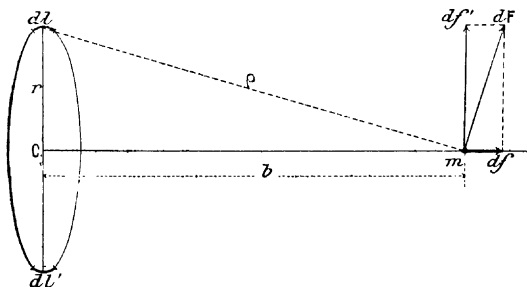


Fig. 48. — Champ galvanique produit par un courant électrique.

laire plan de rayon r , et un pôle d'intensité m placé sur la droite perpendiculaire au plan du courant passant par son centre à une distance b . Un élément de courant dl exerce une force élémentaire dF qui a pour valeur

$$dF = \frac{mI dl}{\rho^2} = \frac{mI dl}{r^2 + b^2}.$$

Cette force peut se décomposer en deux : l'une df' perpendiculaire à Om , l'autre df dans le prolongement. On a, par les triangles semblables :

$$\frac{df}{dF} = \frac{r}{\rho}; \quad df = dF \frac{r}{\rho}; \quad \rho = \sqrt{r^2 + b^2}$$

d'où

$$df = \frac{mI r dl}{(r^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

La force verticale df'' due à l'élément dl est annulée par la force verticale due à l'élément symétrique dl' .

Pour le cercle entier, la force totale f' a pour valeur :

$$f' = \frac{mI 2\pi r^2}{(r^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{2\pi r^2 I}{\rho^3} m.$$

Et l'intensité du champ au centre :

$$H = \frac{f'}{m} = \frac{2\pi r^2 I}{\rho^3}.$$

Telle est la valeur de l'intensité du champ produit sur l'axe par un cadre circulaire de 1 tour de fil. Si le cadre renferme N tours de fil très rapprochés, et que le rayon moyen du cadre soit r , la valeur de H est alors

$$H = \frac{2\pi N r^2 I}{\rho^3}.$$

Ces formules vont nous permettre d'établir la théorie des galvanomètres.

155. Principe des galvanomètres. — Tout appareil permettant de mesurer l'intensité d'un courant est un *galvanomètre*. Les uns sont empiriques et ne font connaître les intensités en fonction des déviations qu'après les avoir préalablement *étalonnés*. D'autres, au contraire, suivent une loi de déviation parfaitement connue, et permettent de calculer *directement* l'intensité du courant qui les traverse.

Le principe appliqué dans le plus grand nombre des galvanomètres consiste à soumettre une aiguille aimantée à l'action de deux champs, l'un fixe et permanent produit par la terre ou un aimant, l'autre produit par le courant et proportionnel à son intensité. Sous l'action de ces deux forces, l'aiguille prend une position d'équilibre d'où l'on déduit l'intensité du courant.

Nous nous contenterons d'examiner le galvanomètre des tangentes, de beaucoup le plus important, puisque sa théorie nous permettra de l'utiliser à la mesure des intensités de courant en unités C.G.S., jusqu'à ce que nous ayons décrit les formes pratiques de ces appareils.

156. Galvanomètre des tangentes. — On ne sait pas construire un galvanomètre dont les déviations (mesurées en

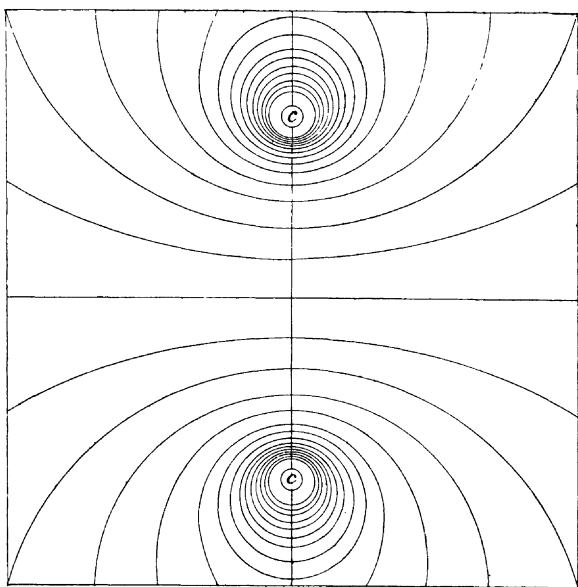


Fig. 49. — Champ galvanique produit par une bobine circulaire.

degrés d'arc de cercle ou en radians) soient proportionnelles aux intensités du courant qui le traverse, mais il est facile de construire un galvanomètre dans lequel les tangentes des angles de déviation soit très exactement proportionnelles aux intensités.

Le principe consiste à employer un conducteur roulé en cercle formant un ou plusieurs tours, et présentant de très grandes dimensions par rapport à celles de l'aiguille (diamètre du cadre 10 à 15 fois plus grand que la longueur de l'aiguille).

Le plan du cercle est dans le plan de l'aiguille. Dans ces conditions, le champ magnétique dû au courant est très sensiblement uniforme au centre du cercle et les lignes de force sont exactement normales au plan de la bobine. Comme cette régularité ne se rencontre qu'*au centre même*, ainsi que le montre la figure 49 il faut donner à l'aiguille de très petites dimensions pour l'empêcher de s'éloigner beaucoup de ce centre, et pouvoir appliquer les formules en toute rigueur.

157. Théorie du galvanomètre des tangentes à un seul tour de fil. — Nous avons établi que l'intensité du champ galvanique H_g produit par un cadre circulaire en un point de la perpendiculaire à son plan passant par son centre a pour valeur (154)

$$H_g = \frac{2\pi r^2 I}{\rho^3}.$$

On peut considérer ce champ comme uniforme dans la petite région occupée par l'aiguille. En plaçant en ce point une ai-

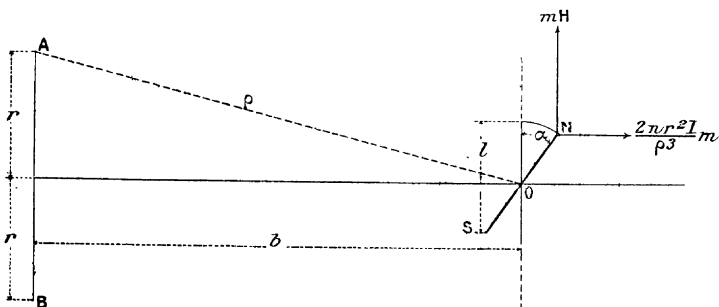


Fig. 50. — Théorie du galvanomètre des tangentes.

guille très courte, chacun de ses pôles sera soumis à une force produisant un couple tendant à faire tourner l'aiguille dans le sens des aiguilles d'une montre, par exemple (fig. 50). Disposons le cadre circulaire verticalement et parallèlement aux

lignes de force d'un champ magnétique d'intensité uniforme. Ce champ H_m exerce sur l'aiguille un couple tendant à la maintenir dans une direction parallèle au plan du cadre. L'aiguille tournera d'un angle α tel que les deux couples se fassent équilibre.

On aura alors, en appelant l la longueur de la petite aiguille et m son intensité de pôle

$$\frac{2\pi r^2 I}{\rho^3} m l \cos \alpha = H m l \sin \alpha; \quad \frac{2\pi r^2 I}{\rho^3} = H \tan \alpha$$

d'où

$$I = \frac{\rho^3}{2\pi r^2} H \tan \alpha.$$

La déviation α est indépendante de l'intensité d'aimantation de l'aiguille, ainsi que de sa longueur, pourvu que celle-ci soit assez courte pour qu'on puisse considérer le champ galvanique comme uniforme dans la région où elle dévie.

158. Galvanomètre des tangentes de Gaugain. — L'expérience a démontré à Gaugain qu'en faisant $r=2b$, l'influence de la longueur de l'aiguille était la plus petite possible.

Dans le cas d'un galvanomètre à plusieurs tours de fil, toutes les spires doivent alors se trouver au sommet d'un cône droit dont le cercle de base a un rayon double de la hauteur. Dans ce cas,

$$\rho^2 = r^2 + b^2 = r^2 + \frac{r^2}{4} = \frac{5}{4} r^2$$

et

$$I = \frac{rH}{2\pi} \left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \tan \alpha = \frac{rH}{4,504} \tan \alpha.$$

L'angle φ au sommet de ce cône est tel que $\tan \frac{\varphi}{2} = 2$ et $\varphi = 126^\circ 56'$. Cet appareil est aujourd'hui peu employé.

159. Galvanomètre de Pouillet. — En plaçant l'aiguille dans le plan du cadre, comme l'a fait *Pouillet*, on a le *galvanomètre des tangentes ordinaire*, $b=0$; $\rho=r$, et la formule devient

$$I = \frac{r}{2\pi} H \tan \alpha.$$

Si le galvanomètre est formé de N tours de fil assez rapprochés, on a sensiblement, en appelant r le rayon du tour moyen, et L la longueur totale du fil

$$I = \frac{rH}{2\pi N} \operatorname{tang} \alpha = \frac{r^2 H}{L} \operatorname{tang} \alpha.$$

Connaissant l'unité électromagnétique C.G.S. de quantité et les appareils qui permettent de la mesurer, il nous est maintenant facile d'établir les autres quantités et unités dérivées du système électromagnétique C.G.S.

160. Quantité d'électricité (Q). — On arrive à la notion de quantité en considérant l'électricité comme un *flux* traversant le conducteur. La quantité d'électricité Q ainsi définie est proportionnelle à l'intensité du courant I et au temps t de passage. On a alors

$$Q = It.$$

La relation ainsi définie est connue sous le nom de *Loi de Faraday*. Elle est démontrée expérimentalement par les actions chimiques. La quantité d'électricité, ou simplement la *quantité*, a pour dimensions

$$Q = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}. \quad T = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}.$$

L'unité électromagnétique C.G.S. de quantité est la quantité qui traverse un circuit en 1 seconde lorsque l'intensité du courant est de 1 unité électromagnétique C.G.S. d'intensité.

161. — Densité de courant. — La densité du courant traversant un conducteur est le rapport de sa section s à l'intensité du courant I qui le traverse.

$$\text{Densité de courant} = \frac{\text{Intensité de courant}}{\text{Section}} = \frac{I}{s}.$$

Les dimensions de la densité de courant sont : $L^{-\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$

L'unité C.G.S. de densité de courant est la densité d'un courant de 1 unité C.G.S. d'intensité (10 ampères) (167) traversant un conducteur de 1 centimètre-carré de section. En pratique, on exprime les densités de courant en *ampères par millimètre carré* pour les conducteurs, et en *ampères par décimètre carré* pour les opérations électrochimiques.

162. Force électromotrice (E). Différence de potentiel (e). — Une quantité Q d'électricité agissant sous une différence de potentiel donnée peut produire une quantité de travail W proportionnelle, d'une part, à cette quantité d'électricité, et, d'autre part, à la différence de potentiel avec laquelle elle agit. Par analogie avec les phénomènes hydrauliques, la différence de potentiel est souvent appelée *différence de niveau électrique* ou *pression électrique*. Une source d'électricité ou générateur électrique ayant une force électromotrice E et débitant une quantité d'électricité Q produira une quantité d'énergie électrique W donnée par la relation

$$W = QE.$$

Cette relation, établie par *Joule*, est souvent désignée sous le nom de *Loi de Joule*.

La force électromotrice, considérée au point de vue de l'énergie électrique, est donc le rapport $\frac{W}{Q}$ d'un travail à une quantité d'électricité. Ses dimensions sont :

$$E = \frac{W}{Q} = \frac{L^2 M T^{-2}}{L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}} = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}.$$

L'unité électromagnétique C.G.S. de force électromotrice est celle qui fait produire un travail de 1 unité C.G.S. (1 erg) à 1 unité électromagnétique C.G.S. de quantité. Cette unité n'a pas reçu de nom spécial.

Les différences de potentiel se mesurent avec les mêmes unités que les forces électromotrices, mais il importe de remarquer qu'une différence de potentiel *n'est pas* une force électromotrice. Il a fallu une force électromotrice pour créer une différence de potentiel, mais cette différence de potentiel peut exister alors que la cause qui l'a fait naître a disparu. Un condensateur chargé en offre un exemple typique. Nous distinguerons toujours symboliquement une force électromotrice (E) d'une différence de potentiel (e).

163. Résistance (R). — La loi d'Ohm permet de définir la résistance R d'un conducteur comme le rapport de la différence de potentiel entre ses extrémités à l'intensité du cou-

rant qui le traverse. Les dimensions de la résistance sont

$$R = \frac{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}}{L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}} = LT^{-1}.$$

La résistance, dans le système électromagnétique, est donc *homogène* à une vitesse, mais on n'est pas autorisé à en conclure que la résistance *est* une vitesse, comme on le dit quelquefois. L'identité des dimensions entre la résistance et la vitesse provient des hypothèses fondamentales qui caractérisent les différents systèmes. Dans le système électrostatique, la résistance est homogène à l'*inverse* d'une vitesse.

L'*unité électromagnétique C.G.S. de résistance* est celle d'un conducteur dans lequel il passe un courant de 1 unité C.G.S. d'intensité lorsqu'il existe une différence de potentiel égale à 1 unité C.G.S. entre ses extrémités.

On peut, sans troubler l'homogénéité des formules, et sous les réserves formulées ci-dessus, dire que l'unité électromagnétique C.G.S. de résistance est le *centimètre par seconde*, et exprimer des résistances en centimètres par seconde.

164. Capacité (C). — La capacité dans le système électromagnétique est une quantité physique de même nature que la capacité électrostatique (114); elle se définit, de même, par le rapport d'une quantité d'électricité Q à une force électromotrice E. Les dimensions de la capacité C sont :

$$C = \frac{Q}{E} = \frac{L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}}{L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}} = L^{-1} T^2.$$

L'*unité électromagnétique C.G.S. de capacité* est la capacité d'un condensateur renfermant une quantité d'électricité égale à 1 unité C.G.S. sous une différence de potentiel égale à 1 unité C.G.S. de force électromotrice.

165. Énergie électrique (W). — L'énergie électrique est le produit d'une quantité d'électricité par une différence de potentiel. Les dimensions de l'énergie électrique sont :

$$W = QE = L^2 MT^{-2}.$$

L'énergie électrique est donc homogène à un travail.

L'unité électromagnétique C.G.S. d'énergie électrique est l'erg (26). L'erg est l'énergie produite par une unité C.G.S. de quantité sous une pression électrique ou différence de potentiel de 1 unité C.G.S.

En appliquant les lois d'Ohm et de Joule (162) à l'énergie électrique, il est facile de voir que son expression prend l'une des formes suivantes :

$$W = QE = EIt = RI^2t = \frac{E^2}{R} t.$$

166. Puissance électrique (P). — La puissance électrique est le rapport d'une quantité d'énergie électrique au temps mis à la produire ou à la dépenser. La puissance électrique a donc les mêmes dimensions que la puissance mécanique

$$P = \frac{W}{T} = L^2MT^{-3}.$$

L'unité C.G.S. de puissance électrique est l'erg par seconde.

En appliquant les lois d'Ohm et de Joule à la puissance électrique, il est facile de voir que son expression peut prendre les trois formes suivantes :

$$P = EI = RI^2 = \frac{E^2}{R}.$$

Ces formules donnent P en ergs par seconde si E, I et R sont exprimées en unités électromagnétiques C.G.S.

SYSTÈME ÉLECTROMAGNÉTIQUE C.G.S. PRATIQUE.

167. Unités électromagnétiques C.G.S. pratiques.

— Les unités électromagnétiques C.G.S. que nous venons de définir sont, tantôt trop grandes, tantôt trop petites pour les besoins de la pratique. On a donc choisi, *arbitrairement*, certains multiples ou sous-multiples décimaux des unités C.G.S. pour constituer les unités pratiques correspondantes, et, pour éviter toute confusion, le *Congrès international des Électriciens de 1881* a donné à chacune de ces unités pratiques un nom particulier rappelant celui d'un des savants qui ont illustré la science électrique.

Ohm. — *Unité pratique de résistance.*

1 ohm = 10^9 unités C.G.S. de résistance.

Pour les grandes résistances, on emploie le mégohm, et le microhm pour les petites.

1 mégohm = 10^6 ohms = 10^{13} unités C. G. S. de résistance.

1 microhm = 10^{-6} ohms = 10^3 unités C. G. S. de résistance.

Volt. — *Unité pratique de force électromotrice.*

1 volt = 10^8 unités C. G. S. de force électromotrice.

Ampère. — *Unité pratique d'intensité.*

C'est l'intensité du courant produit par une différence de potentiel de 1 volt aux extrémités d'une résistance de 1 ohm.

1 ampère = $\frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ohm}} = \frac{10^8}{10^9} = 10^{-1}$ unité C.G.S. d'intensité.

Coulomb. — **Ampère-heure.** — *Unités pratiques de quantité.*

L'unité pratique de quantité est la quantité qui traverse un conducteur pendant 1 seconde lorsque l'intensité du courant est de 1 ampère.

1 coulomb = 1 ampère. 1 seconde = 10^{-1} unité C.G. S. de quantité.

Dans l'industrie, où l'heure est l'unité ordinaire de temps, l'unité de quantité est l'*ampère-heure*. C'est la quantité d'électricité qui traverse un conducteur en 1 heure ou 3600 secondes lorsque l'intensité du courant est de 1 ampère.

1 ampère-heure = 1 ampère. 3600 secondes = 3600 coulombs.

Farad. — **Microfarad.** — *Unités pratiques de capacité.*

L'unité pratique de capacité est la capacité d'un condensateur renfermant 1 coulomb au potentiel de 1 volt. On l'appelle *Farad*.

1 farad = $\frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}} = \frac{10^{-1}}{10^8} = 10^{-9}$ unité C.G.S. de capacité.

En pratique, le farad est une unité encore trop grande, et l'on emploie le *microfarad*

1 microfarad = 10^{-6} farad.

1 microfarad = $10^{-9} \cdot 10^{-6} = 10^{-15}$ unité C.G.S. de capacité.

Volt-coulomb ou Joule ⁽¹⁾. — *Unité pratique d'énergie électrique.*

L'unité pratique d'énergie électrique est le travail produit par 1 coulomb sous une force électromotrice de 1 volt.

1 coulomb. 1 volt = 1 volt-coulomb ou Joule = $10^{-1} \cdot 10^8 = 10^7$ ergs.

$$1 \text{ volt-coulomb} = \frac{1}{9,81} \text{ kilogrammètre.}$$

Pratiquement, on divise par 10 le produit des volts par les coulombs pour avoir l'énergie électrique en kilogrammètres.

Volt-ampère ou Watt. — *Unité pratique de puissance électrique.*

On sait que la puissance est le rapport du travail au temps. L'unité pratique de puissance électrique sera donc

$$\frac{1 \text{ volt. } 1 \text{ coulomb}}{1 \text{ seconde}} = 1 \text{ volt. } 1 \text{ ampère} = 1 \text{ volt-ampère ou watt.}$$

$$1 \text{ watt} = 10^8 \cdot 10^{-1} = 10^7 \text{ ergs par seconde;}$$

$$1 \text{ watt} = \frac{1}{9,81} \text{ kilogrammètre par seconde;}$$

$$1 \text{ kilogrammètre par seconde} = 9,81 \text{ watts;}$$

$$1 \text{ cheval-vapeur} = 75 \text{ kgm par seconde} = 75 \cdot 9,81 = 736 \text{ watts;}$$

$$1 \text{ horse-power} = 75,9 \text{ kgm par seconde} = 746 \text{ watts.}$$

L'énergie électrique étant le produit de la puissance électrique par le temps, on a été conduit à créer récemment, pour les besoins de l'industrie, une unité d'énergie appelée *watt-heure* et son multiple le *kilowatt-heure*.

$$1 \text{ watt-heure} = 1 \text{ watt. } 3600 \text{ secondes} = 3600 \text{ joules.}$$

$$1 \text{ kilowatt-heure} = 1000 \text{ watts-heure.}$$

Nous ferons, dans tout le cours de cet ouvrage, systématiquement et exclusivement usage des unités C.G.S. et pratiques dont nous venons de terminer l'énumération à peu près complète.

(1) Les noms de *Joule* et de *Watt* pour désigner respectivement les unités pratiques d'énergie et de puissance électrique ont été proposés par sir William Siemens en 1882. Ils sont aujourd'hui très répandus et recevront certainement la sanction du *Congrès international des Électriciens* de 1889. Les Anglais désignent absurdement par le même nom d'*Unit* deux unités d'énergie différentes correspondant respectivement à 1 000 watts-heure et à 10 000 watts-heure. Nous nous garderons bien de les imiter.

CHAPITRE IV

RÉSISTANCES

Lorsqu'on maintient une différence de potentiel E aux deux extrémités d'un conducteur, l'intensité du courant qui la traverse est, d'après la loi d'Ohm (140), proportionnelle à la différence de potentiel E et inversement proportionnelle à un facteur R qui constitue sa *résistance électrique* ou simplement sa *résistance*.

Cette résistance peut donc aussi se définir comme le rapport de la différence de potentiel aux extrémités d'un conducteur à l'intensité du courant qui le traverse, et cette définition est souvent utilisée pour mesurer *indirectement* une résistance.

Suivant la nature des problèmes à résoudre et les grandeurs des résistances à évaluer, on adopte pour unité de résistance l'unité C.G.S., le microhm, l'ohm ou le mégohm.

Pour un conducteur homogène d'une nature donnée et d'une section uniforme, l'expérience et le raisonnement démontrent que la résistance est proportionnelle à la longueur, inversement proportionnelle à la section et proportionnelle à un certain facteur qui est la *résistance spécifique* du conducteur.

La résistance spécifique est une propriété inhérente à la matière qui compose le conducteur : elle dépend de la composition chimique du corps, de son état physique, de sa température, de la pression à laquelle le corps est soumis, etc.

En appelant l la longueur d'un conducteur de section uniforme s , α sa résistance spécifique, sa résistance R est donnée par la relation :

$$R = \alpha \frac{l}{s}$$

168. Résistance spécifique. — La formule ci-dessus nous donne pour expression de la résistance spécifique

$$\alpha = \frac{R_s}{l}.$$

La résistance spécifique est donc le produit d'une résistance par une surface divisé par une longueur. Ses dimensions sont :

$$\alpha = \frac{LT^{-1}L^2}{L} = L^2T^{-1},$$

c'est-à-dire le produit d'une résistance par une longueur. Les résistances spécifiques doivent donc s'exprimer, dans le système pratique, en *microhms-centimètre*, en *ohms-centimètre* ou en *mégohms-centimètre* ⁽¹⁾.

Dans le langage courant, on définit souvent la résistance spécifique d'un corps donné comme la résistance d'un centimètre-cube de ce corps entre deux faces opposées. On considère alors la résistance spécifique comme la résistance d'un conducteur de 1 centimètre carré de section et de 1 centimètre de longueur, et on l'exprime en microhms, ohms ou mégohms.

Nous croyons qu'il convient de rejeter cette définition absolument inexacte, dont le moindre inconvénient est de détruire l'homogénéité des formules.

169. Conductibilité. — La conductibilité d'un corps est, par définition, l'inverse de sa résistance. *Sir W. Thomson* a proposé (1883) d'exprimer les conductibilités en *mhos*, le *mho* étant l'inverse de l'ohm qui sert d'unité de mesure des résistances. Cette proposition n'a pas encore été généralement adoptée ⁽²⁾. Les dimensions de la conductibilité sont : $L^{-1}T$.

La *conductibilité spécifique* est, par définition, l'inverse de la résistance spécifique et a pour dimensions $L^{-2}T$. On en fait rarement usage dans les applications.

M. Olivier Heaviside a récemment proposé d'appeler *con-*

⁽¹⁾ Les résistances spécifiques pourraient être exprimées en toute rigueur, dans le système électro-magnétique C.G.S., en *centimètres carrés par seconde*.

⁽²⁾ Cela tient surtout à ce que l'on ne fait le plus souvent intervenir que les résistances dans les calculs. L'expression des conductibilités en mhos facilite les calculs numériques chaque fois qu'on a affaire à des résistances couplées en dérivation (173).

ductance l'inverse de la résistance d'un conducteur — quantité physique mesurée en *mhos* — et de réserver le nom de conductibilité (*conductibility*) à la conductibilité spécifique. Le mot conductibilité étant déjà pris dans un sens différent, il serait préférable, pour éviter toute confusion, d'adopter les mots *conductance* et *conductance spécifique*, inversement parallèles aux mots *résistance* et *résistance spécifique*.

Dans le langage courant, on désigne sous le nom de conductibilité d'un conducteur par le *rapport* de la résistance à celle d'un conducteur en cuivre de mêmes dimensions, les deux résistances étant ramenées à la température de la glace fondante. L'étalon ordinairement choisi est le *cuivre pur de Matthiessen* (écroui), dont la résistance spécifique à 0° C. est de

1,621 microhm-centimètre légal.

La conductibilité s'exprime alors en *tant pour cent du cuivre pur*. Il conviendrait, pour éviter toute confusion, d'appeler *conductibilité relative* le rapport ainsi défini.

Aujourd'hui les progrès de la métallurgie, et, en particulier, le raffinage électrolytique, ont permis d'obtenir des cuivres ayant jusqu'à 102 et 103 pour 100 de conductibilité. Il y a intérêt à abandonner les chiffres relatifs aux conductibilités relatives pour ne plus considérer que les résistances spécifiques, seules valeurs qui interviennent dans les calculs.

170. Unités pratiques de résistance. — Les déterminations de l'ohm faites depuis 1881 jusqu'à 1884 ont conduit la *Conférence internationale pour la détermination des unités électriques* à adopter, dans sa séance du 29 avril 1884, une *résistance étalon* représentant l'ohm théorique, à laquelle elle a donné le nom d'*Ohm légal* ⁽¹⁾ :

L'ohm légal est la résistance d'une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 106 centimètres de longueur à la température de la glace fondante.

(1) Les expériences faites depuis 1884 pour la détermination de l'ohm ont montré que l'ohm légal est lui-même trop petit, et que l'ohm théorique (10⁹ unités C.G.S. de résistance) serait plus exactement représenté par une colonne de mercure de 106,2 à 106,3 centimètres de longueur. Le jour où une nouvelle valeur de l'ohm sera adoptée, il faudra lui donner un nom spécial pour éviter toute confusion avec les unités antérieures dans les mesures de précision.

On emploie aussi quelquefois, à titre transitoire, l'unité Siemens et l'Ohm B. A.

L'unité Siemens U. S. est la résistance d'une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 100 centimètres de longueur, à la température de la glace fondante.

L'ohm B. A. est une certaine résistance étalon résultant de déterminations faites par l'Association Britannique en 1864 et qui a été, depuis, reconnu trop petit d'environ 1,1 pour 100. Voici des formules de transformation qui permettront d'effectuer facilement les réductions nécessaires.

$$\begin{aligned} 1 \text{ ohm légal} &= 1,0113 \text{ ohm B. A.} \\ 1 \text{ —} &= 1,06 \text{ unité Siemens (U. S.)} \\ 1 \text{ ohm B. A.} &= 0,9889 \text{ ohm légal.} \\ 1 \text{ unité Siemens} &= 0,9434 \text{ ohm légal.} \end{aligned}$$

171. Influence de la température sur la résistance des conducteurs. — La résistance électrique des conducteurs est fonction de la température et peut, en général, se représenter par une fonction empirique de la forme.

$$R_{\theta} = R_0(1 + a\theta + b\theta^2)$$

a et b étant des coefficients qui dépendent de la nature de la substance, de sa pureté, etc., et θ la température, a et b pouvant être positifs ou négatifs. On s'arrête souvent en pratique au premier terme, et la formule prend alors la forme

$$R_{\theta} = R_0(1 + a\theta).$$

Le facteur a prend le nom de *coefficient de température*, abréviation de coefficient de variation de résistance avec la température.

Certains alliages, tel que le maillechort, le platinoïde, la nickeline, l'alliage platine-argent ont un faible coefficient de température et sont choisis pour constituer des étalons de résistance et des rhéostats. Tous les métaux et alliages bons conducteurs ont un coefficient de température *positif*, c'est-à-dire qu'ils *augmentent* de résistance avec la température. Le charbon diminue de résistance avec la température, son coefficient de température est négatif.

Les corps isolants ou diélectriques diminuent considérable-

ment de résistance avec la température. On trouve dans les tables les coefficients de température et les formules relatives aux substances les plus ordinairement employées dans les applications. Les méthodes de mesure de ces résistances sont décrites plus loin.

172. Résistance des métaux et alliages. — La figure 51 empruntée à la thèse de M. René Benoît (1875) permet d'embrasser d'un seul coup d'œil les valeurs des résistances des principaux métaux et alliages depuis 0° jusqu'à 400° C. Les températures θ sont portées en abscisses et les résistances spécifiques α , en ordonnées. Les nombres lus sur la colonne verticale donnent également, en ohms, la résistance d'un conducteur de 100 mètres de longueur et de 1 millimètre carré de section.

Exemple. A la température de 150° C, la résistance spécifique du maillechort est de 28 microhms-centimètre, mais ce chiffre varie du simple au double avec la composition de l'alliage. Un fil de maillechort de 100 mètres de longueur et de 1 millimètre carré de section a une résistance de 28 ohms.

La figure 52 qui, pour les mêmes métaux et alliages, représente le coefficient de température ($1 + a\theta + b\theta^2$) permet de comparer facilement les métaux entre eux au point de vue des variations de résistance avec la température.

Le *platinoïde*, nouvel alliage de maillechort renfermant 1 à 2 pour 100 de tungstène, a un coefficient de température encore plus faible que tous les corps indiqués sur le diagramme (fig. 52), car son accroissement de résistance entre 0° et 100° C, n'est que de 2,2 pour 100.

Aux basses températures, il résulte des expériences de MM. Cailletet et Bouty ⁽¹⁾ que la résistance électrique spécifique, de la plupart des métaux purs décroît régulièrement quand la température s'abaisse de 0° à — 123° C. et que le coefficient de variation est sensiblement le même pour tous. Ces expériences et celles de Wroblewski ⁽²⁾ sur le cuivre, semblent confirmer la remarque faite en 1856 par Clausius que si l'on pouvait abaisser la température d'un conducteur métallique jusqu'au zéro absolu, sa résistance spécifique deviendrait nulle.

(1) *Académie des sciences*, séance du 11 mai 1885.

(2) *Académie des sciences*, séance du 13 juillet 1885.

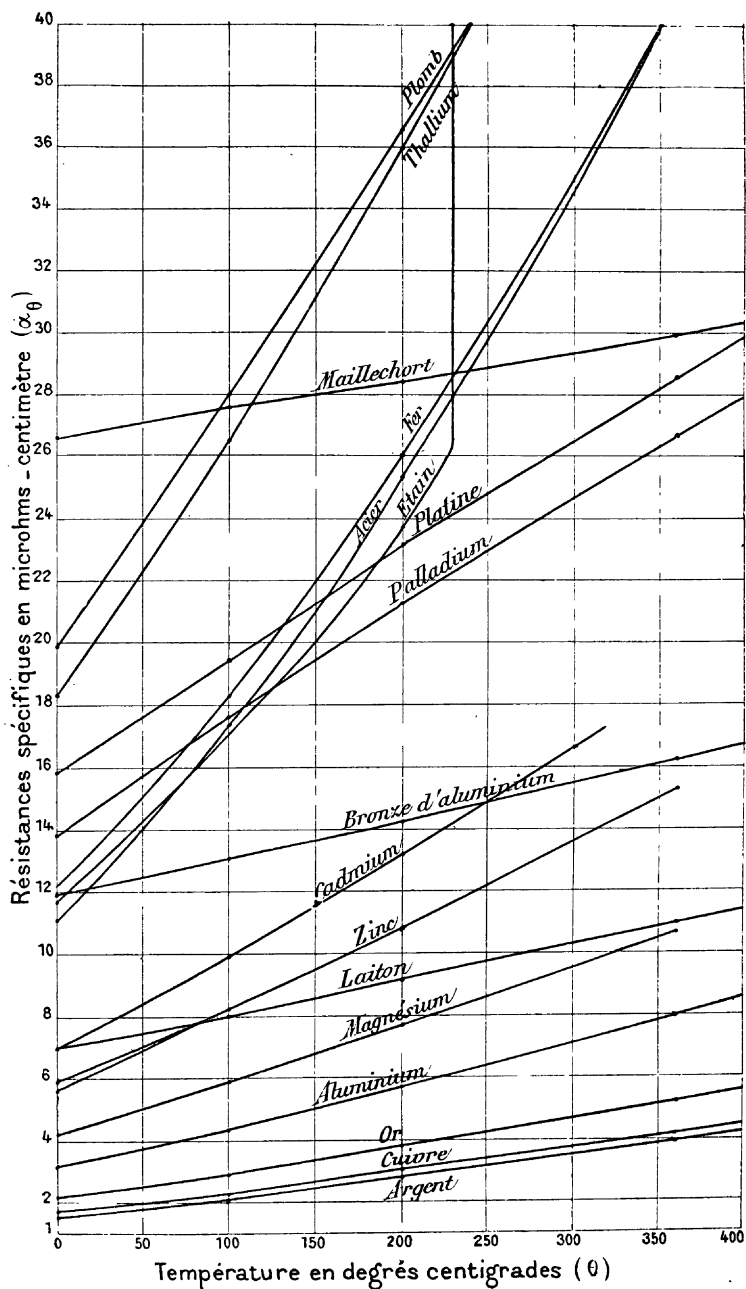


Fig. 51. — Résistances spécifiques des principaux métaux et alliages en fonction de la température.

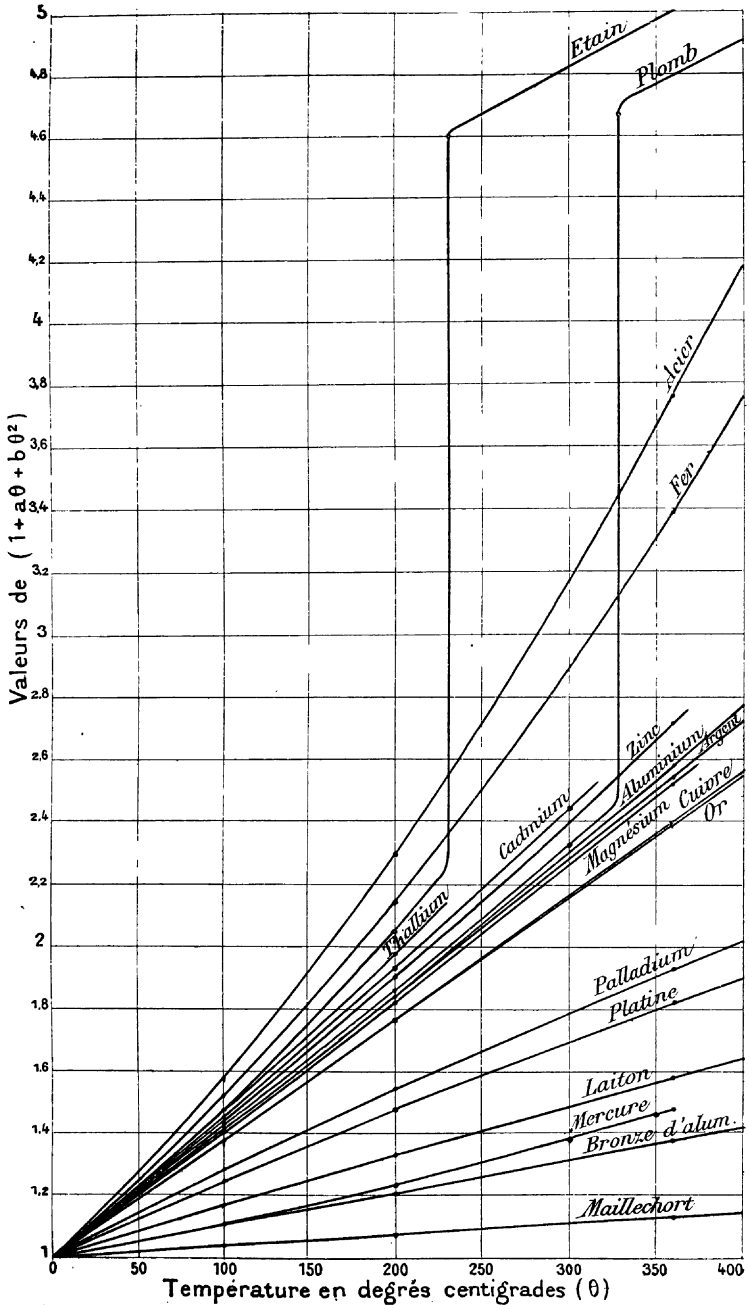


Fig. 52. — Valeurs de $(1 + a\theta + b\theta^2)$ des principaux métaux et alliages.

A l'inverse des corps conducteurs, les diélectriques ont une résistance spécifique qui diminue considérablement avec la température, comme le montre la figure 53 relative à la gutta-percha ordinaire entre 16° et 30° C.

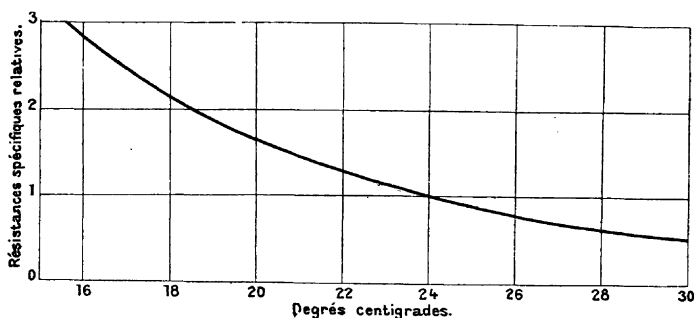


Fig. 53. — Variation de la résistance spécifique de la gutta-percha ordinaire en fonction de la température.

Les résistances des liquides seront étudiées plus loin.

Le *sélénium* diminue de résistance lorsqu'il est exposé à la lumière; le bismuth augmente de résistance lorsqu'il est placé dans un champ magnétique, etc.

173. Couplage des résistances. Résistance réduite.

— Lorsqu'on monte plusieurs résistances *en tension* ou *en série*, c'est-à-dire l'une à la suite de l'autre, la résistance totale R des conducteurs ainsi accouplés est évidemment égale à la somme des résistances partielles.

$$R = r + r' + r'' + \dots$$

Si on monte ces résistances parallèlement entre deux points donnés A et B, *en dérivation*, la résistance formée par l'ensemble de ces résistances est toujours *plus petite* que la plus petite des résistances montées en dérivation. On appelle *résistance réduite* de deux ou plusieurs dérivation, la résistance unique équivalente à celle des résistances ainsi couplées.

Prenons, par exemple, le cas de deux dérivation r et r' , branchées entre deux points d'un circuit traversé par un courant d'intensité totale I . Le courant I , arrivé en A, se partage en deux dérivation et forme deux *courants dérivés* dont les intensités sont i dans la résistance r , et i' dans la résistance r' .

L'intensité totale est évidemment égale à la somme des intensités partielles, d'où la relation :

$$I = i + i'.$$

En appelant e la différence de potentiel entre les points A et B, on a aussi, par application de la loi de Ohm :

$$e = ri - r'i'$$

d'où l'on tire :

$$\frac{i}{i'} = \frac{r'}{r}.$$

Les intensités dans les dérivation sont en raison inverse de leurs résistances.

Mais

$$i = \frac{e}{r} \quad i' = \frac{e}{r'}$$

$$I = i + i' = \frac{e}{r} + \frac{e}{r'} = \frac{e}{R}$$

en appelant R la résistance réduite. En divisant par e

$$\frac{I}{R} = \frac{I}{r} + \frac{I}{r'}$$

d'où

$$R = \frac{rr'}{r + r'}.$$

La résistance réduite de deux dérivation est égale à leur produit divisé par leur somme.

On démontre de même que pour 3, 4, ... n dérivation, dont les résistances sont $r, r', r'', \dots r_n$, on a :

$$\frac{I}{R} = \frac{I}{r} + \frac{I}{r'} + \frac{I}{r''} + \dots + \frac{I}{r_n}$$

d'où :

$$R = \frac{I}{\frac{I}{r} + \frac{I}{r'} + \frac{I}{r''} + \dots + \frac{I}{r_n}}.$$

La résistance réduite de n dérivation est égale à la réciproque de la somme de leurs réciproques.

Dans le cas de n dérivations égales, $r = r' = r'' = \dots = r_n$ la formule se simplifie et devient :

$$R = \frac{r}{n}.$$

DÉTERMINATION DES RÉSISTANCES.

Connaissant la résistance spécifique d'un conducteur homogène ainsi que ses formes et ses dimensions, on pourrait *calculer* sa résistance, mais, sauf le cas de conducteurs cylindriques, il est, en général, plus facile, plus commode et plus rapide de *mesurer* cette résistance à l'aide d'opérations et d'appareils qui présentent certaines analogies avec les pesées, les poids et les balances servant à déterminer les masses des corps.

La mesure des résistances comporte donc des *étalons* de résistance, des appareils de comparaison et certains appareils accessoires qu'il nous faut décrire avant de parler des *méthodes* elles-mêmes.

174. Étalons prototypes de résistance. — Pour réaliser l'étalon de résistance ou *Ohm légal* défini par la Confé-



Fig. 54. — Copie d'un étalon prototype en mercure.

rence internationale (170), il a fallu construire des étalons *fondamentaux* ou *prototypes* représentés par des tubes en verre droits remplis de mercure. Ce travail difficile a été fait par M. René Benoît, au Bureau international des poids et mesures, au pavillon de Breteuil. Les quatre étalons prototypes ainsi construits en 1884 ne diffèrent pas entre eux de $\frac{2}{100\,000}$, et leur résistance moyenne est celle de l'ohm légal à $\frac{1}{100\,000}$ près.

La figure 54 représente la copie de l'un de ces prototypes.

175. Étalons secondaires. — Les étalons prototypes sont incommodes et très fragiles, aussi a-t-on établi un certain nombre d'étalons *secondaires*, copies de l'étalon prototype, formés d'un tube de verre (fig. 55) en double spirale. Ce tube est rempli de mercure et ses extrémités communiquent avec des réservoirs de grand diamètre dans lesquels plongent des fils

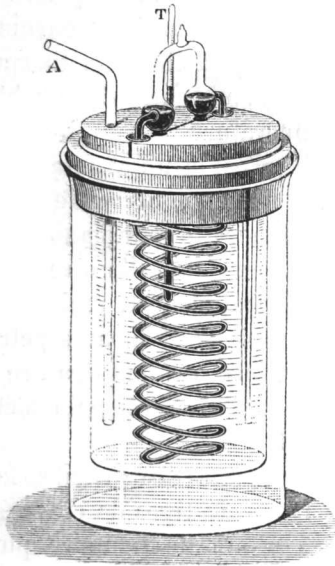


Fig. 55. — Étalon secondaire en mercure.

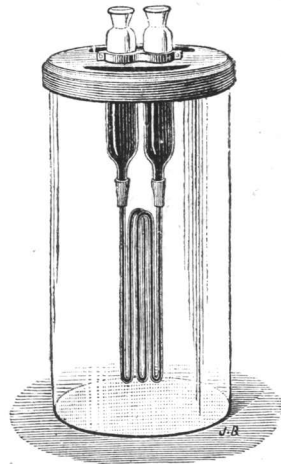


Fig. 56. — Nouvelle forme de l'étalon secondaire en mercure.

de platine. Le tube est immergé dans un bain dont la température est connue par un thermomètre T, un tube latéral A permet d'agiter le liquide par un courant d'air. La correction est déterminée, pour chaque étalon secondaire, soit par le facteur par lequel il faut multiplier sa résistance à la température de la glace fondante, soit par l'indication de la température à laquelle l'étalon secondaire vaut 1 ohm légal.

Dans une forme plus nouvelle adoptée par M. Benoît (fig. 56), les extrémités du tube replié en zigzag se terminent par des tubes plus gros ouverts à l'air libre, pour pouvoir renouveler plus souvent le mercure, le platine pouvant s'y dissoudre avec le temps et modifier la résistance de l'étalon.

176. Étalons pratiques. — Pour les mesures courantes, on abandonne les étalons en mercure et l'on emploie de préférence des étalons pratiques formés d'un alliage ayant un faible coefficient de température (171) tel que le maillechort, l'alliage platine-argent à 1 tiers de platine, le platinoïde ou la nickeline.

Les étalons pratiques construits par M. J. Carpentier, en 1885, sont constitués par une bobine de gros fil suspendue à l'intérieur d'une boîte métallique dont la paroi est garnie à l'intérieur d'une couche très épaisse de paraffine. Un thermomètre pénètre par un trou dans la boîte, au centre de la bobine roulée en double et mesure la température de l'air intérieur certainement identique à celle du fil : c'est là un avantage sur les anciens étalons dont le fil, plongé dans une masse de paraffine et protégé des variations de la température ambiante, était souvent à une température très différente de celle du milieu. Ces étalons sont formés de gros fil de maillechort, moins sensible que le fil fin aux petites variations de température et plus facile à régler exactement.

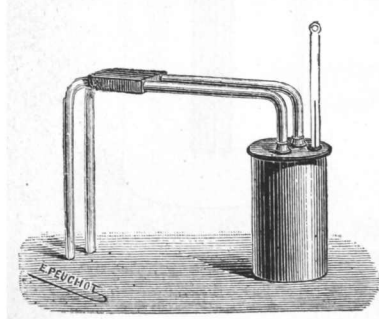


Fig. 57. — Forme de l'étalon pratique.

Les prises de courant se font à l'aide de tiges de cuivre de 6 à 8 mm de diamètre plongeant dans des godets de mercure, ce qui assure un contact parfait sans résistance appréciable. La figure 57 représente la forme ordinaire donnée à

l'ohm étalon qui peut être plongé dans l'eau ou la glace. Un trou central permet d'y placer un thermomètre pour déterminer la température.

177. Boîtes ou caisses de résistances. — L'échelle des résistances à mesurer étant très grande, car elle s'étend depuis une fraction de microhm jusqu'à plusieurs milliers de mégohms, il ne suffit pas d'avoir un étalon de résistance représentant l'ohm légal : il faut encore disposer de fractions et de multiples décimaux de cet étalon réunis dans une caisse ou boîte de résistances qui correspond, pour la mesure des résistances,

aux boîtes de masses ou poids marqués qui servent, avec la balance, à la mesure des masses.

Les bobines qui composent les boîtes sont généralement en fil de maillechort, recouvert d'une double couche de soie : le fil est roulé en double, pour éviter les effets d'induction (voyez ce mot), sur une bobine en ébonite ou en buis paraffiné. Lorsque la bobine est terminée et ajustée, on la noie dans de la paraffine, qui garantit l'isolement et s'oppose à l'action de l'humidité qui aurait pour effet d'établir des dérivations et de diminuer sa résistance.

La *grosseur* du fil qui les compose n'a aucune importance spéciale; elle dépend seulement de la nature des courants qui doivent traverser les bobines, qui ne doivent chauffer dans aucun cas. L'ajustement de la bobine est d'autant plus facile que le fil est plus gros. La résistance spécifique des fils varie avec la quantité de nickel que l'alliage renferme; le fil doit être très doux, la mesure ne doit être prise qu'après l'enroulement, car la tension et la torsion font varier sa résistance.

Il convient de ne jamais faire passer un courant dépassant 20 à 25 milli ampères dans les boîtes de mesure ordinaires. Certains appareils industriels supportent cependant un courant de 0,1 ampère.

L'intensité maxima que peut supporter une boîte de résistances devrait toujours être indiquée par le constructeur.

Dans les boîtes *ordinaires*, les bobines sont reliées entre elles en tension par des *plots* que l'on peut faire communiquer, électriquement entre eux par des clefs.

En enlevant une clef, la bobine correspondante est intercalée dans le circuit (fig. 58). En remettant la clef, la bobine correspondante est mise en *court-circuit* et la résistance correspondante se trouve alors supprimée.

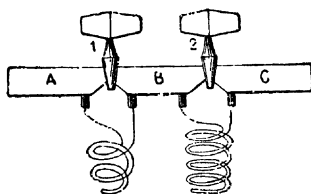


Fig. 58. — Disposition des plots et des clefs des boîtes de résistance.

La combinaison des bobines des boîtes ordinaires est choisie de façon à permettre la réalisation de toutes les résistances de 1 à 10 000 ohms, unité par unité, avec le minimum de bobines.

On emploie seize bobines et l'un des deux groupements suivants :

1	2	3	4	10	20	30	40	100	200	300	400	1000	2000	3000	4000
1	2	2	5	10	20	20	50	100	200	200	500	1000	2000	2000	5000

La deuxième combinaison doit être préférée parce qu'elle correspond à la division 1 2 5 adoptée dans les mesures métriques et ne demande que douze bobines différentes, au lieu de seize que nécessite la première combinaison. La figure 59 représente une boîte de résistance à seize bobines.

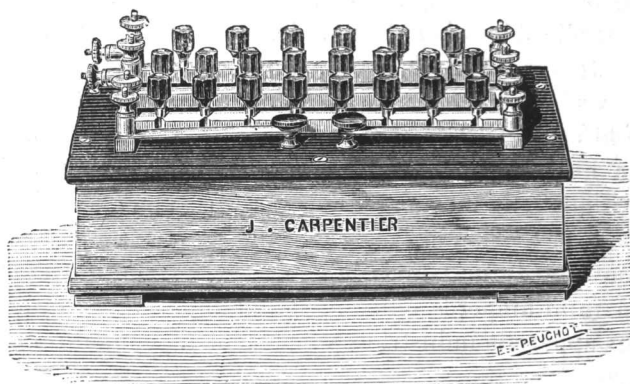


Fig. 59. — Boîte de résistances avec bras de pont.

Ajustement des résistances. — Un moyen précis, commode et rapide, surtout pour les petites résistances, consiste à faire les bobines un peu trop résistantes et à les ajuster avec une seconde bobine montée en dérivation et calculée par la loi des courants dérivés pour parfaire l'ajustement. Pour les grandes résistances, on peut faire la bobine à ajuster *trop peu* résistante, et parfaire l'ajustement par une bobine auxiliaire montée en circuit avec la première.

Emploi des boîtes de résistances. — Les clefs et les barres doivent être entretenues dans un grand état de propreté. Il est bon, avant de commencer une série de mesures, de frotter les clefs avec une lime douce ou du papier émeri, en prenant bien soin qu'aucun grain d'émeri ne reste attaché au métal. En insérant une clef, il faut lui imprimer un léger mouvement de rotation

pour assurer un bon contact, sans cependant agir avec trop de force pour ne pas abîmer l'ébonite ; il ne faut pas ébranler les clefs voisines en insérant ou en retirant une clef. Avant de commencer, on doit s'assurer du bon contact de toutes les clefs et éviter de les graisser en les touchant avec les doigts.

178. Boîtes à décades et à cadrans. — Dans les boîtes

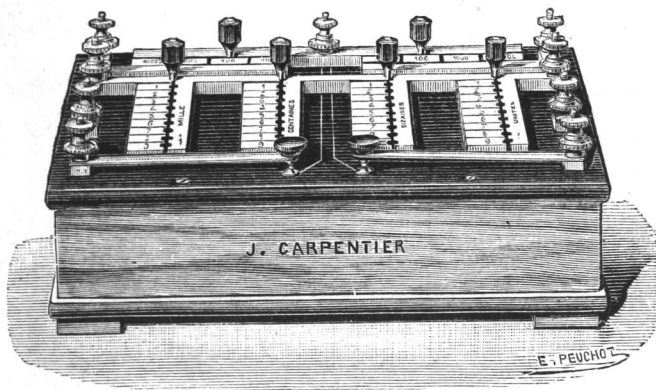


Fig. 60. — Boîte à décades. Vue d'ensemble.

à décades (fig. 60 et 61), les résistances sont disposées en colonnes, et il n'y a jamais que quatre clefs à manipuler pour

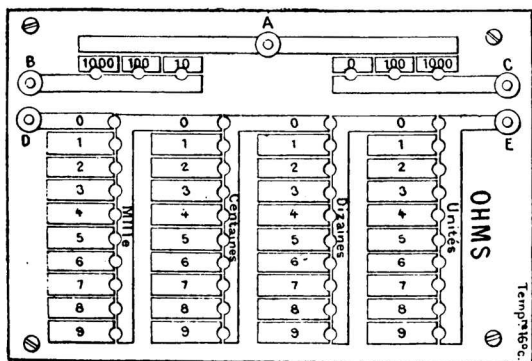


Fig. 61. — Boîte à décades avec bras de pont. Plan.

introduire dans le circuit, ohm par ohm, depuis 0 jusqu'à 9999 ohms. C'est la combinaison qui réclame le plus grand

nombre de bobines, puisqu'une boîte de 9999 ohms en renferme 36, mais elle n'introduit que le minimum de clefs dans le circuit et réduit les erreurs qui peuvent provenir de ces mauvais contacts.

Les boîtes à *cadrons* ne diffèrent des boîtes à décades que par la disposition circulaire des plots servant à établir les communications (fig. 62).

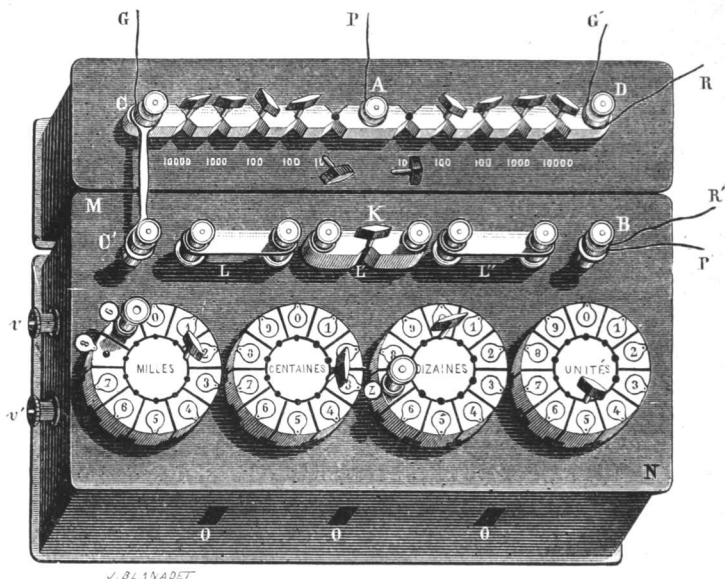


Fig. 62. — Boîte à cadrans avec bras de pont.

Les bras de pont sont ordinairement disposés dans une boîte complémentaire qui se rajoute à la boîte à cadrans lorsqu'on doit mesurer des résistances.

179. Pont de Wheatstone. — C'est *Christie* qui a appliqué le premier, en 1833, à la mesure des résistances la disposition connue sous le nom de *pont de Wheatstone*, et décrite dans la *Backerian lecture* de 1843.

La disposition générale consiste en un quadrilatère (fig. 63) formé de quatre résistances ou *bras*, a , b , c , x . Entre deux des sommets opposés on intercale une pile E et entre les deux autres sommets un galvanoscope sensible G . On ajuste les quatre bras a , b , c , x , pour que le galvanoscope ne soit plus

traversé par aucun courant, c'est-à-dire que les points C et D soient au même potentiel. Lorsque cette condition est réalisée, on a simplement :

$$ac = bx.$$

d'où l'on tire ⁽¹⁾ :

$$x = \frac{a}{b} c.$$

En effet, si l'on appelle i l'intensité dans les bras a et x ; i' l'intensité dans les bras b et c ; e la différence de potentiel entre A

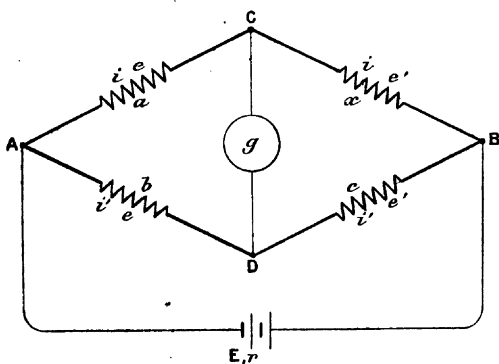


Fig. 63. — Principe du pont de Wheatstone.

et C égale à la différence de potentiel entre A et D; e' la différence de potentiel entre C et B égale à la différence de potentiel entre B et D, on a, en appliquant la loi d'Ohm :

$$i = \frac{e}{a} = \frac{e'}{x}; \quad i' = \frac{e}{b} = \frac{e'}{c}$$

d'où :

$$\frac{b}{a} = \frac{c}{x}, \quad \text{et} \quad ac = bx.$$

Le mode d'emploi du pont de Wheatstone conduit à deux séries d'appareils distincts, suivant les facteurs sur lesquels on agit pour établir l'équilibre du galvanoscope. Dans le *pont à bobines*, on laisse le rapport $\frac{a}{b}$ constant et l'on fait varier x ;

⁽¹⁾ *Mnémotechnie* : Dans le pont de Wheatstone, les produits des bras opposés sont égaux.

dans le *pont à fil divisé*, on fait varier $\frac{a}{b}$, tout en laissant la somme $(a + b)$ constante.

180. Pont à bobines: — Le modèle de pont à bobines le plus courant, représenté en principe fig. 64, comporte une boîte

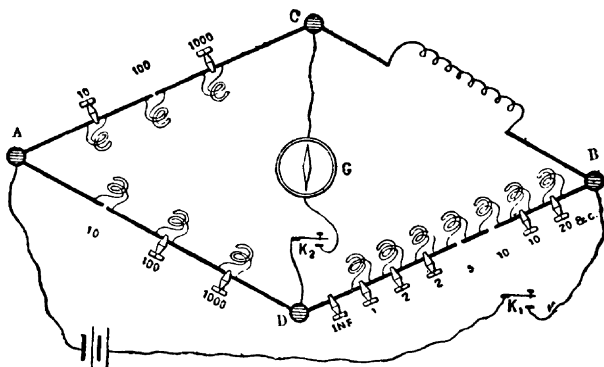


Fig. 64. — Principe du pont à bobines, bras de pont et clefs.

de résistances de 10 000 ohms, deux bras de proportion de 10, 100 et 1000 ohms, et deux clefs, l'une, K_1 , pour fermer le circuit de la pile, l'autre, K_2 , celui du galvanomètre. On peut ainsi mesurer des résistances variant entre 1 et 10 000 ohms avec une approximation de $\frac{1}{100}$.

Lorsque les résistances à mesurer sont en dehors de ces limites, il faut employer des méthodes spéciales. Certains modèles de pont à bobines ont quatre bobines dans les deux bras de proportion, ce qui permet de mesurer depuis 0,1 ohm jusqu'à 100 000 ohms.

Si l'on dispose d'un galvanomètre sensible donnant des déviations assez grandes de part et d'autre du zéro pour une variation de résistance dans la boîte égale à 1 ohm, il est facile d'obtenir une décimale de plus dans l'approximation. Soit α la déviation produite d'un côté du zéro par la résistance R et α' la déviation de l'autre côté du zéro par la résistance $R + 1$, un raisonnement très simple montre qu'il faut ajouter à la valeur de R la fraction $\frac{\alpha}{\alpha + \alpha'}$ pour avoir une valeur de R plus approchée.

Choix du galvanomètre. — Pour obtenir le plus de sensibilité, M. Olivier Heaviside a démontré ⁽¹⁾ que l'on doit établir entre les bras a , b et la résistance variable c les relations suivantes, en appelant r la résistance de la pile et g celle du galvanomètre.

$$b = \sqrt{gr}; \quad c = \sqrt{xr \frac{x+g}{x+r}}; \quad a = \sqrt{xg \frac{x+r}{x+g}}.$$

Si l'on peut varier à volonté la pile et le galvanomètre, la combinaison donnant la plus grande sensibilité est celle pour laquelle les résistances des quatre bras du pont, de la pile et du galvanomètre sont égales.

Si la pile et le galvanomètre ont des résistances inégales, celui des deux appareils qui a la plus grande résistance doit être établi entre les deux plus grandes résistances des bras et les deux plus petites.

Lorsqu'on peut faire varier la résistance du galvanomètre, celle qui correspond au maximum de sensibilité est

$$g = \frac{(a+b)(c+x)}{a+b+c+x}.$$

Pour éviter des phénomènes de *self-induction* (voyez ce mot) il est nécessaire de fermer d'abord le circuit de la pile et, un instant après, le circuit du galvanomètre. Dans les boîtes de pont complètes, l'appareil porte deux clefs et la manœuvre ne présente aucune difficulté. On emploie quelquefois, pour effectuer automatiquement cette opération, une *clef à double contact*, formée de trois lames parallèles superposées. En appuyant sur un bouton placé sur la première lame, celle-ci établit un premier contact qui ferme le circuit de la pile, et, un instant après, elle amène la seconde lame en contact avec la troisième, ce qui ferme le circuit du galvanomètre.

181. Pont à fil divisé. — Cette modification du pont de Wheatstone est due à *Kirchhoff* (1857). Le pont à fil divisé est surtout employé pour la mesure des résistances inférieures à 1 ohm, pour lesquelles le pont à bobines donnerait une approximation insuffisante, ainsi que pour les comparaisons des étalons.

⁽¹⁾ *Philosophical Magazine*, vol. XLV, p. 114, 1873.

L'appareil se compose d'un fil de 1 mètre de longueur et de 1 à 2 millimètres de diamètre, en maillechort, laiton, platine ou platine iridié, tendu contre une règle divisée en bois ou en cuivre. Le long de la règle glisse un contact à arête mousse s'appuyant légèrement sur le fil. Ce contact est porté par un chariot qui sert à lire la position du point de contact sur la règle divisée. Les communications étant établies comme l'indique la figure 65, on fait glisser le contact sur le fil jusqu'à ce que

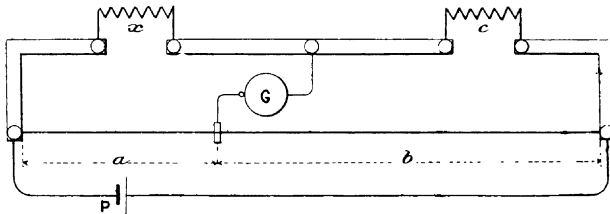


Fig. 65. — Principe du pont à fil divisé.

le galvanoscope reste au zéro. La résistance inconnue se déduit du rapport des longueurs des bras, rapport qui est égal à celui de leurs résistances, si le fil est bien homogène et bien cylindrique.

La sensibilité du pont étant la plus grande lorsque le contact est au milieu du fil, il y a lieu de modifier les résistances de comparaison de façon à satisfaire à cette condition. Pour que les étincelles de rupture du circuit n'altèrent pas la surface du fil, il faut *toujours* mettre le galvanomètre en communication avec le contact glissant.

182. Mesureur de résistance de C. W. Siemens (1867). — Cet appareil avait été combiné dans le but d'obtenir la valeur des résistances par une *lecture directe* sur une seule ligne droite divisée en parties égales représentant des résistances égales, à l'aide d'une résistance de comparaison unique et invariable.

Deux bobines égales et parallèles h, h' , sont fixées sur un guide commun s, s' , qui peut se mouvoir longitudinalement par l'intermédiaire d'un butoir en agate s' , d'une courbe métallique cc' sur laquelle il vient buter, et d'un bouton i qui permet de déplacer la courbe verticalement à l'aide d'une cré-

maillère; r est la résistance fixe étalon, x la résistance à mesurer, ns une aiguille aimantée qu'on ramène au zéro dans chaque mesure. Si $x=r$, et que les actions magnétiques des deux bobines soient rigoureusement égales et de sens con-

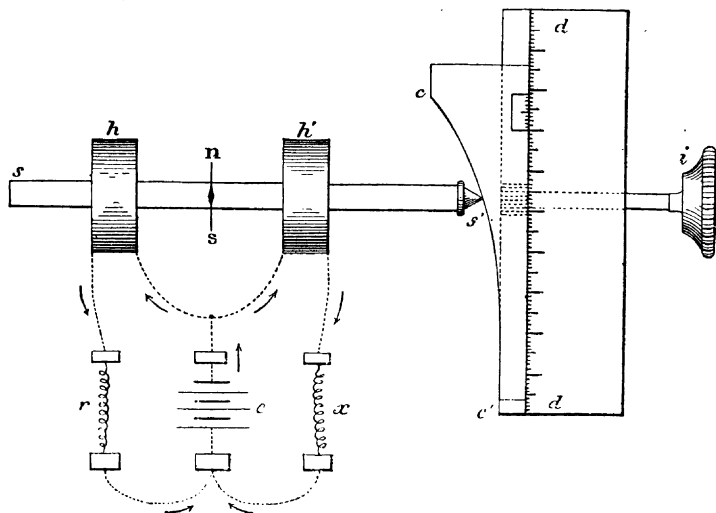


Fig. 66. — Mesureur de résistance de W. Siemens.

traire, l'aiguille sera au zéro lorsqu'elle occupera le milieu de l'intervalle qui les sépare. Mais si x est plus grand ou plus petit que r , l'équilibre sera rompu et, pour le rétablir, il faudra déplacer les bobines et rapprocher celle dans laquelle le courant est le plus faible, en éloignant celle dans laquelle il est le plus intense.

183. Microhmmètre de M. L. Maiche (1885). — Dans cet appareil (fig. 67), identique, en principe, à celui de Siemens, les deux bobines ne sont pas solidaires dans leurs mouvements, mais elles peuvent se déplacer indépendamment l'une de l'autre, et la résistance fixe r est supprimée, ainsi que la courbe de guidage.

Les hélices mobiles sont montées sur des vis micrométriques, dont chaque tour correspond à un déplacement de 1 millimètre. Un tambour divisé en 100 degrés et solidaire de la vis tourne avec lui devant un vernier dont le zéro sert de point de

repère. L'appareil accuse le $\frac{1}{2000}$ d'ohm, et devrait s'appeler plus exactement *milliohmètre*.

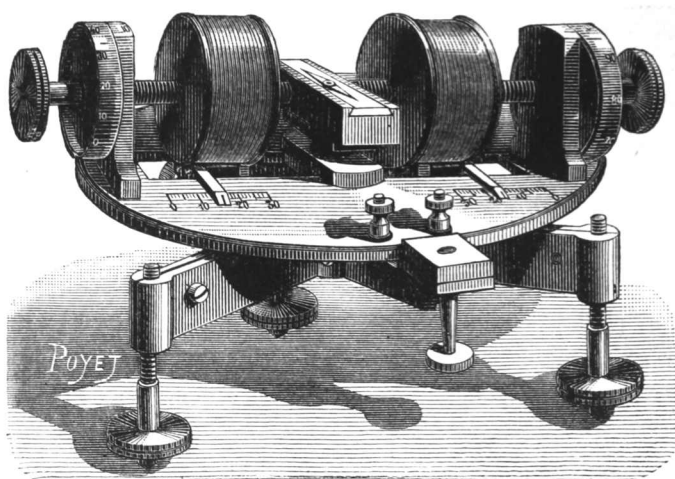


Fig. 67. — Microohmmètre de M. L. Maiche.

184. Ohmmètre de MM. Ayrton et Perry (1884).

— Cet appareil a pour but de mesurer la résistance d'un cir-

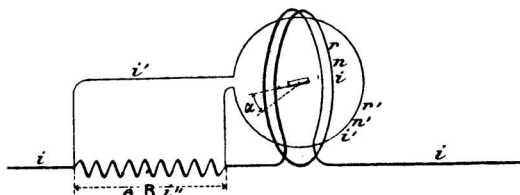


Fig. 68. — Principe de l'Ohmmètre de MM. Ayrton et Perry.

cuit lorsqu'il est traversé par un courant continu intense et permet, par suite, de déterminer des résistances à *chaud*. Il se compose de deux bobines placées à angle droit et agissant sur une aiguille de fer doux placée à leur centre commun. L'une des bobines est composée d'un petit nombre de tours de gros fil et est montée en circuit avec la résistance à mesurer R (fig. 68) ; l'autre bobine est formée d'un grand nombre de tours de fil fin et établie en dérivation aux bornes de cette résistance.

Sous l'action des deux champs galvaniques produits par les deux bobines, l'aiguille prend une position d'équilibre qui ne dépend que de la résistance R et non pas de l'intensité du courant.

Soit i l'intensité du courant traversant la bobine à gros fil faisant n tours de rayon a et produisant en son centre un champ d'intensité H , perpendiculaire à son plan. La bobine à fil fin faisant n' tours de rayon a' produira un champ d'intensité H' . Une aiguille de moment ml placée au centre commun prendra une position d'équilibre telle que

$$mlH \sin \alpha = mlH' \cos \alpha$$

d'où

$$H \operatorname{tg} \alpha = H'.$$

Mais

$$H = \frac{2\pi ni}{a} \quad \text{et} \quad H' = \frac{2\pi n' i'}{a'}$$

$$\frac{ni}{a} \operatorname{tg} \alpha = \frac{n' i'}{a'}.$$

Mais

$$i' = \frac{e}{r'}; \quad i'' = \frac{e}{R}; \quad i = i' + i'' = \frac{e}{r'} + \frac{e}{R}.$$

En remplaçant et simplifiant, on trouve :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{an'}{a'n} \cdot \frac{R}{R+r'}.$$

Si r' est très grand devant R , on voit que les résistances sont sensiblement proportionnelles aux tangentes des déviations.

185. Comparaison des étalons. — Parmi les nombreuses méthodes employées pour effectuer cette comparaison avec précision, nous indiquerons celle dont fait usage M. de Nerville au *Laboratoire central d'électricité*. Cette méthode, déjà indiquée par Fleeming-Jenkin, est analogue à la double pesée employée pour la comparaison des poids.

La figure 69 est un diagramme montrant le principe, la figure 70 un plan de l'appareil servant à effectuer la mesure, et la figure 71, une vue d'ensemble de la méthode montée pour

comparer un étalon pratique en maillechort à un étalon secondaire en mercure.

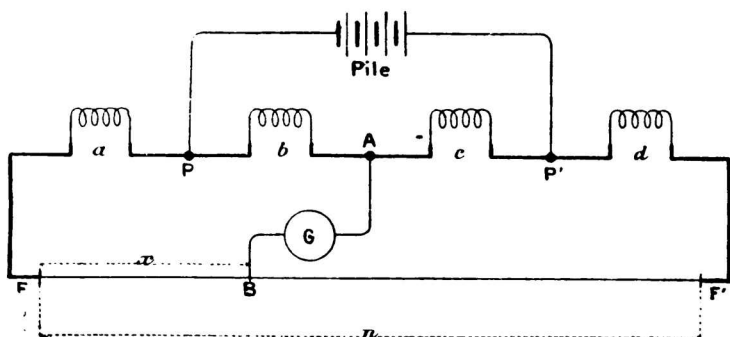


Fig. 69. — Diagramme du pont pour la comparaison des étalons.

Soient a, b, c, d (fig. 69) les quatre branches du pont, FF' le fil divisé, P et P' les points d'attache de la pile, A le point fixe

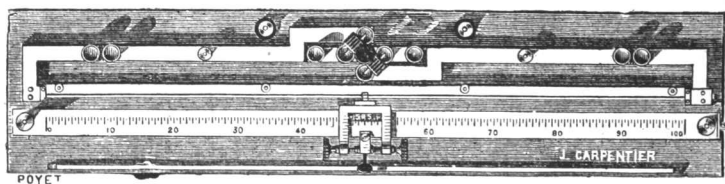


Fig. 70. — Plan du pont de comparaison des étalons.

et B le contact glissant sur le fil entre lesquels le galvanomètre est branché, x le nombre de divisions du fil comptées de F en B , n le nombre total de divisions du fil entre F et F' , r la résistance d'une division du fil. On place en b, c, d , trois résistances *invariables* telles que le rapport $\frac{b}{c}$ soit très voisin de 1 et que la résistance d ait une valeur voisine de celle des étalons à comparer. Lorsque l'équilibre est établi avec la résistance a , on a la relation :

$$\frac{b}{c} = \frac{a + rx}{d + (n - x)r}. \quad (1)$$

En substituant la résistance a' à la résistance a et appelant x' la nouvelle lecture, on a :

$$\frac{b}{c} = \frac{a' + rx'}{d + (n - x')r}. \quad (2)$$

En combinant les deux équations (1) et (2), on tire :

$$\frac{b}{c} = \frac{(a - a') - r(x' - x)}{r(x' - x)}, \quad (3)$$

d'où

$$a - a' = r(x' - x) \left(\frac{b}{c} + 1 \right). \quad (4)$$

Expression qui donne la différence des deux étalons à comparer, a et a' en fonction des deux lectures x' et x et du rapport des deux bras b et c .

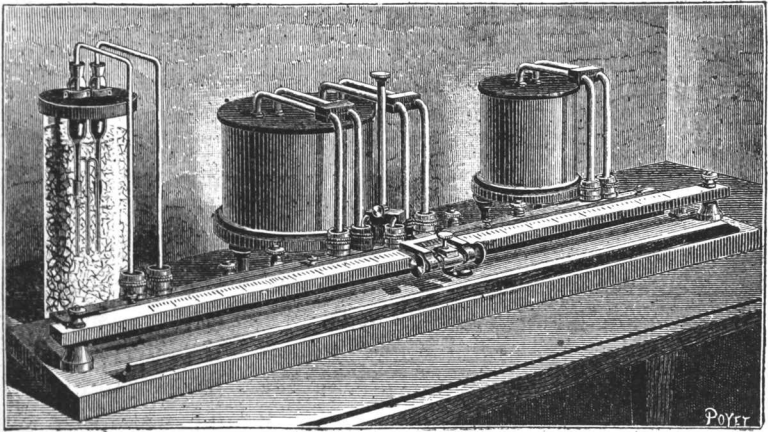


Fig. 71. — Méthode de M. de Neville, appliquée à la comparaison d'un étalon secondaire et d'un étalon pratique de résistance.

Comme ce rapport pourrait être difficile à mesurer, on le fait disparaître en permutant les deux branches b et c à l'aide d'un commutateur convenablement disposé.

En permutant les deux branches b et c , on obtiendra évidemment, en appelant y et y' les lectures respectives faites avec a et a' :

$$\frac{c}{b} = \frac{(a - a') - r(y' - y)}{r(y' - y)}. \quad (5)$$

En multipliant membre à membre les équations (3) et (5), il vient :

$$a - a' = r[(x' - x) + (\gamma' - \gamma)]. \quad (6)$$

Avec un pont dont la résistance du fil ne dépasse pas 100 microhms par millimètre, on peut comparer deux étalons de 1 ohm avec une erreur moindre que 1 cent-millième. On évite les erreurs dues aux forces électromotrices parasites en renversant le courant de la pile pour chaque lecture et en prenant la moyenne des deux expériences.

Le constructeur, M. J. Carpentier, a adopté d'ingénieuses dispositions pratiques, pour satisfaire aux conditions multiples exigées par cette mesure de précision. Ainsi, par exemple, les bras b et c , dont le rapport doit rester constant, ont été disposés dans une même boîte; ils sont constitués par deux gros fils de maillechort d'environ 3 millimètres de diamètre, suspendus dans un énorme cylindre de laiton et noyés dans plusieurs kilogrammes de paraffine, de manière à éprouver simultanément les mêmes variations de température. Leurs extrémités aboutissent à des tiges de cuivre de 13 millimètres de diamètre plongeant dans les godets du commutateur. L'étalon secondaire de comparaison est dans la glace fondante, les étalons à comparer sont, autant que possible, maintenus dans une même auge contenant une masse d'eau assez considérable qu'il est utile d'agiter fréquemment pour maintenir l'équilibre de température. Malgré ces précautions, il se produit une petite marche de température qu'on élimine en faisant des séries de mesures en nombre impair, de telle sorte que le même étalon soit mesuré le premier et le dernier. Une comparaison complète comprend donc cinq séries de quatre lectures chacune : a, a', a, a', a . Chaque série, avec a ou a' , comprend les quatre lectures suivantes :

1 ^o	Première position du commutateur, courant direct.			
2 ^o	—	—	—	inverse.
3 ^o	Deuxième position	—	—	direct.
4 ^o	—	—	—	inverse.

La comparaison des deux étalons est donc le résultat de vingt lectures différentes qui assurent ainsi un grand degré de précision.

186. Mesure des très faibles résistances. — Lorsqu'on a de très faibles résistances à déterminer, les contacts peuvent introduire des erreurs du même ordre de grandeur que la quantité à mesurer, il faut alors employer des méthodes spéciales, telles que le pont double de Thomson, la méthode d'Hockin et Matthiessen, ou le galvanomètre différentiel.

Pont double de Thomson (1). — La disposition a pour but d'éliminer l'influence des résistances de contact en permettant de les négliger. La méthode consiste à réaliser le diagramme de la figure 72, x étant la résistance inconnue, R la résistance

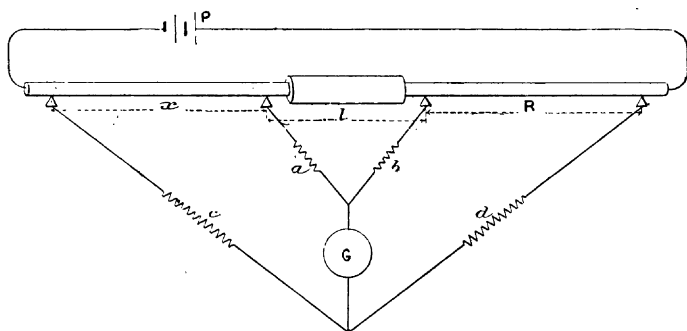


Fig. 72. — Principe du pont de Thomson pour la mesure des très faibles résistances.

de comparaison, a, b, c, d , quatre résistances variables, et l une résistance intermédiaire. Lorsque le galvanoscope est au zéro, il est facile de démontrer qu'on a la relation générale

$$\frac{R}{d} - \frac{x}{c} + \left(\frac{b}{d} - \frac{a}{c} \right) \frac{l}{a + b + l} = 0.$$

On rend le troisième terme nul ou négligeable en faisant l très petit et en faisant varier les bras a, b, c, d , pour rendre nul le terme entre parenthèses.

L'équation du pont devient alors

$$\frac{R}{d} = \frac{x}{c}.$$

La modification apportée au pont de Thomson par Hockin

(1) Clerk-Maxwell, *Electricity and magnetism*, t. I, § 351.

et *Matthiessen* ⁽¹⁾ consiste à introduire les résistances de contact dans le circuit du galvanoscope, ces résistances de contact n'introduisent plus alors aucune cause d'erreur. La méthode de galvanomètre différentiel sera indiquée plus loin.

187. Résistance des liquides. — Les phénomènes d'électrolyse compliquent la mesure de la résistance des liquides; ils se traduisent par un accroissement *apparent* de résistance provenant, d'une part, de la force électromotrice de polarisation due à la décomposition du liquide, et d'une modification de la surface des électrodes, dépôts non conducteurs, bulles de gaz, etc., qui créent une résistance au passage du courant. On est donc obligé d'avoir recours à des méthodes spéciales éliminant plus ou moins complètement ces causes d'erreur.

Méthode de Wheatstone (1843). — On emploie des colonnes de liquides de même section de longueurs différentes en maintenant le courant constant à l'aide de résistances introduites dans le circuit à l'aide d'un rhéostat convenablement étalonné. C'est donc une méthode de substitution.

Méthode de Pouillet (1837). — En employant des électrodes formées du métal même de la solution à étudier, on élimine presque complètement la polarisation, et les colonnes liquides peuvent alors être traitées comme des résistances ordinaires.

Méthode de Paalzow (1869). — Le liquide est renfermé dans un tube en forme de siphon dont les branches plongent dans des vases poreux remplis du même liquide et placés eux-mêmes dans des vases plus larges contenant une dissolution de sulfate de zinc et deux électrodes en zinc amalgamé.

Pour comparer deux liquides, on remplit successivement avec ces liquides les vases poreux et le siphon et on mesure les résistances au pont de Wheatstone. La polarisation des électrodes disparaît, mais on n'évite pas complètement les variations de force électromotrice qui peuvent se produire aux surfaces de contact avec le sulfate de zinc à travers le vase poreux.

Méthode de Kohlraush (1880). — Cette méthode consiste à former un pont de Wheatstone dont la résistance liquide à mesurer occupe un des bras : un générateur à courants périodiques alternatifs remplace la pile et un téléphone sensible le

(1) *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, Mascart et Joubert, t. I, p. 425.

galvanomètre. D'après les expériences de MM. Bouty et Fousereau (1) cette méthode ne peut être appliquée qu'en excluant du circuit toute résistance métallique non rectiligne, et en n'employant que des électrodes à large surface. Il faut aussi ne l'appliquer qu'aux liquides peu résistants. Si l'on fait croître la résistance des liquides étudiés, la détermination du point silencieux devient de plus en plus incertaine, et les mesures rapidement illusoires. C'est le cas pour les dissolutions salines très étendues, l'eau distillée et les autres liquides très isolants. Nous reparlerons de cette méthode à propos des *courants alternatifs*.

Méthode de Lippmann (1873). — Cette méthode sera décrite comme application de l'électromètre.

188. Résistance d'isolement. — On appelle *résistance d'isolement*, par opposition à la résistance de conductibilité R , la résistance d'un diélectrique ou isolant interposé entre un conducteur et le milieu conducteur qui l'entourne.

On cherche, en général, à augmenter le plus possible la résistance d'isolement tandis qu'on s'efforce au contraire, de diminuer la résistance de conductibilité. La résistance d'isolement se mesure par les méthodes employées pour la détermination des *grandes résistances*.

Dans certains cas, on peut la *calculer* connaissant la forme et les dimensions du système considéré ainsi que la résistance spécifique du diélectrique. En voici un exemple :

Résistance d'isolement entre deux cylindres conducteurs concentriques indéfinis. — Soient α la résistance spécifique du milieu interposé, l la longueur des deux cylindres, r et R leurs rayons.

Décomposons le milieu en couches concentriques infiniment minces d'épaisseur dr . La résistance d'isolement $d\rho$ de chaque couche élémentaire sera évidemment

$$d\rho = \frac{\alpha dr}{2\pi r l}$$

Pour avoir la résistance totale ρ , il suffit d'intégrer cette expression entre les deux limites r et R .

$$\rho = \int_r^R \frac{\alpha dr}{2\pi r l} = \frac{\alpha}{2\pi l} \int_r^R \frac{dr}{r}$$

(1) Académie des sciences, séance du 3 août 1885.

d'où

$$\rho = \frac{\alpha}{2\pi l} \log_e \frac{R}{r}.$$

Cette formule est d'une application fréquente dans l'étude des câbles souterrains et sous-marins.

APPLICATIONS DES LOIS DES RÉSISTANCES.

189. Shuntage des galvanomètres. — On appelle *shunt* d'un galvanomètre une dérivation établie entre ses bornes dans le but d'en réduire les indications dans un certain rapport. Le shunt est donc un *réducteur*. Si nous voulons réduire le courant qui traverse le galvanomètre au $\frac{1}{n}$ de sa valeur, il faudra faire passer 1 partie de ce courant dans le galvanomètre de résistance G , et $(n - 1)$ parties dans le shunt de résistance S . On aura alors, d'après les lois des courants dérivés (**173**) :

$$\frac{S}{G} = \frac{1}{n-1} \quad \text{d'où} \quad S = \frac{G}{n-1}.$$

Ordinairement, les shunts d'un galvanomètre sont établis pour réduire au $\frac{1}{10}$ au $\frac{1}{100}$ et au $\frac{1}{1000}$, et les valeurs correspondantes des shunts sont :

$$\frac{G}{9}; \quad \frac{G}{99}; \quad \frac{G}{999}.$$

La résistance du *galvanomètre shunté* G_s a pour valeur

$$G_s = \frac{GS}{G+S}.$$

Le *pouvoir multiplicateur du shunt* m est le facteur par lequel on doit multiplier les indications du galvanomètre shunté pour avoir l'intensité du courant total

$$m = \frac{G+S}{S}.$$

La *résistance de compensation* R_c est la résistance qu'il faut ajouter dans le circuit d'un galvanomètre shunté pour que la résistance totale du circuit ne soit pas altérée par l'introduction du shunt. On a évidemment

$$R_c = G - G_s = G \frac{n-1}{n} = \frac{G^2}{G+S}.$$

Un galvanomètre de résistance G muni de son shunt et de sa résistance de compensation peut être considéré comme un galvanomètre de même résistance, mais de moindre sensibilité.

Il faut que le shunt d'un galvanomètre soit *de même métal* que le galvanomètre lui-même, afin que les variations de résistance dues à la température n'altèrent pas le rapport $\frac{G}{S}$. Dans le cas contraire, il y a lieu de faire intervenir une correction facile à calculer et fonction de la température.

190. Ajustement des faibles résistances. — Les lois des courants dérivés permettent de réaliser facilement une résistance très exacte à l'aide de deux ajustements relativement grossiers, surtout pour les faibles résistances.

Supposons qu'il s'agisse de réaliser une résistance exactement égale à 1 ohm légal. On calcule la longueur de fil nécessaire pour obtenir cet ohm légal, et on construit la bobine en employant un fil un peu trop long. On mesure sa résistance avec soin et, par les lois des courants dérivés (173), on détermine la valeur de la résistance qu'il faut monter en dérivation avec la première pour obtenir l'ohm légal. Cette résistance réalisée même avec une approximation grossière, à 1 pour 100 près par exemple, permet d'obtenir néanmoins un ohm légal très exact. On obtient un égal degré d'exactitude en constituant 1 ohm légal avec 10 résistances de 10 ohms chacune montées en dérivation, sans prendre un très grand soin dans l'ajustement individuel de ces 10 résistances dont les erreurs se compensent par le couplage en dérivation.

191. Détermination des températures. — Les variations de résistance électrique des conducteurs avec la température ont été souvent utilisées pour la détermination des températures. La méthode qui a été appliquée avec succès par

Siemens pour la détermination des températures au fond de la mer ne convient pas à la construction des pyromètres, à cause des modifications moléculaires que les températures élevées apportent aux métaux soumis à ces températures élevées, et aux changements que subit la constante de l'appareil.

Quelques auteurs ont cependant utilisé les variations de résistance spécifique du cuivre pour déterminer des températures ne dépassant pas 700 à 800° C.

M. W. *Shaw* ⁽¹⁾ a constitué un pont de Wheatstone dont deux bras sont formés de fil de platine et les deux autres d'un alliage de platine-argent. Ces résistances s'équilibrent pour une température d'environ 15°C. En mesurant le shunt qu'il faut introduire dans l'un des bras pour rétablir l'équilibre, on obtient la valeur de la température correspondante après avoir fait un étalonnage préalable de l'appareil. Avec un galvanoscope sensible, l'appareil permet de déterminer le $\frac{1}{500}$ de degré C.

192. Rhéostats. — On désigne sous le nom de *rhéostat* tout appareil permettant de faire varier la résistance d'un circuit d'une manière *continue* ou sensiblement telle.

Dans le rhéostat à corde ou *rhéocorde* de *Pouillet* (1837) deux fils de platine sont tendus parallèlement : un contact glissant établit la communication entre les deux fils, et permet de faire varier la longueur intercalée dans le circuit. Dans le rhéostat de M. *Crova* (1874) les fils sont disposés verticalement et plongent dans deux éprouvettes verticales qu'on remplit plus ou moins de mercure. Le rhéostat de *Wheatstone* (1843) est constitué par un fil s'enroulant et se déroulant sur deux cylindres l'un métallique, l'autre isolant. La résistance intercalée dans le circuit varie avec la longueur du fil enroulé sur le cylindre isolant. Le fil ainsi roulé et déroulé se déforme, s'aigrit et modifie sa résistance. *Jacobi* a modifié avantageusement le rhéostat de *Wheatstone* (1843) en roulant le fil sur un cylindre isolant et en disposant un contact glissant à sa surface.

M. *Varley* forme un rhéostat continu en empilant un certain nombre de disques de toile carbonisée dans le vide à une très

(1) *British Association. Meeting de Bath., 1838.*

haute température, ce qui laisse à la toile sa flexibilité et son élasticité. En exerçant une pression variable sur les disques, on peut faire varier leur résistance dans le rapport de 1 à 15.

Dans les applications industrielles, il n'est pas nécessaire de faire varier les résistances d'une manière continue; il suffit d'employer des rhéostats *discontinus* composés de résistances en fil de fer, en maillechort, en ferro-manganèse, en charbon, ou formés de toiles métalliques ou de lames minces mises en circuit à l'aide de plots et de clefs ou d'un commutateur glissant sur une série de boutons de contact. La figure 73 représente un de ces commutateurs disposé pour shunter un galvanomètre et permettant de faire varier la résistance du shunt, ohm par ohm, depuis 0 jusqu'à 310 ohms.

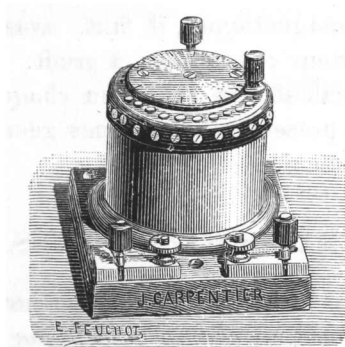


Fig. 73. — Rhéostat à manettes pour le shuntage d'un galvanomètre.

Les sections et les surfaces des fils ou lames constituant les rhéostats doivent être calculées de façon à faciliter le refroidissement et à ne pas permettre de trop grandes élévations de température. Dans certains cas, les fils du rhéostat sont plongés dans une cuve renfermant une grande quantité de pétrole, ce qui facilite le refroidissement sans créer de dériva-tions nuisibles.

CHAPITRE V

INTENSITÉS. — GALVANOMÉTRIE

La mesure des intensités des courants étant fondée sur les actions électromagnétiques, il faut, avant de décrire les appareils qui mettent ces actions à profit, étudier le champ galvanique et en calculer la valeur en chaque point dans les cas où les circuits présentent des formes géométriques simples et accessibles au calcul.

CHAMPS GALVANIQUES.

Lorsqu'un courant traverse un conducteur, il produit dans l'espace qui l'entoure un *champ galvanique* dont nous avons appris à mesurer l'intensité en chaque point par l'action que ce courant exerce sur un pôle d'intensité m placé dans le champ galvanique produit par ce conducteur.

193. Champ galvanique produit par un élément de courant. — La loi élémentaire de Laplace donne pour valeur de la force élémentaire df exercée par un courant d'intensité I et de longueur dl sur un pôle d'intensité m placé à une distance d , la relation

$$df = \frac{mI \, dl \, \sin \alpha}{d^2}$$

α étant l'angle formé par l'élément de courant avec la droite qui joint le milieu du conducteur dl au pôle m .

En considérant un circuit quelconque comme formé par une infinité de courants élémentaires, on peut en déduire la force

exercée en un point quelconque sur un pôle m et, par suite, l'intensité du champ H , rapport de la force intégrale F à l'intensité du pôle m . Cette intégration n'est pas toujours facile, ni même possible, excepté dans le cas de circuits présentant des formes géométriques simples.

194. Champs galvaniques produits par des circuits de formes géométriques simples. — Les résultats indiqués ci-dessous pour des circuits de formes géométriques simples le plus ordinairement employés dans les applications s'obtiennent en intégrant la formule de Laplace (149) pour chacun de ces circuits. Les démonstrations de ces formules constituent donc de simples exercices de calcul intégral. Les formules donnent H en unités C.G.S, à la condition d'exprimer I en unités C.G.S et les dimensions géométriques des circuits en centimètres.

Droite illimitée. — En appelant d la distance du point considéré à la droite de longueur illimitée :

$$H = \frac{2I}{d}.$$

Droite limitée. — En appelant $2a$ la longueur de la droite et d la distance du point considéré à cette droite :

$$H = \frac{2I}{d} \frac{a}{\sqrt{d^2 + a^2}}.$$

Cadre rectangulaire. — Si les côtés ont respectivement pour longueur $2a$ et $2b$, l'intensité du champ au centre de figure et dans le plan du cadre est :

$$H = 4I \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{ab}.$$

Solénoïde. — Un système de courants circulaires égaux infiniment petits et rapprochés, normaux à une courbe *directrice* passant par leurs centres, constitue un solénoïde. La figure 74 montre la distribution et la direction générale des lignes de force à l'intérieur d'un solénoïde.

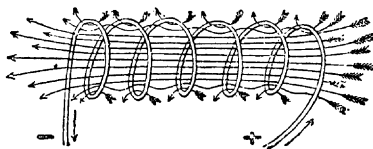


Fig. 74. — Lignes de force d'un solénoïde.

Bobine cylindrique. — Lorsqu'on considère une directrice droite et des cercles équidistants, le solénoïde devient une bobine cylindrique dont on peut calculer le champ sur l'axe. Considérons une bobine cylindrique formée de N cercles de rayon r et de surface S , en appelant L la longueur totale du fil, si le pas est très petit par rapport au rayon, on a sensiblement

$$L = 2\pi r N; \quad S = \pi r^2 = \frac{L^2}{4\pi N^2}.$$

En posant (fig. 75) $MO = a$; $OB = r$; $AB = 2l$, en appliquant la formule de Laplace (193) et en intégrant pour les N spires, on trouve les valeurs suivantes :

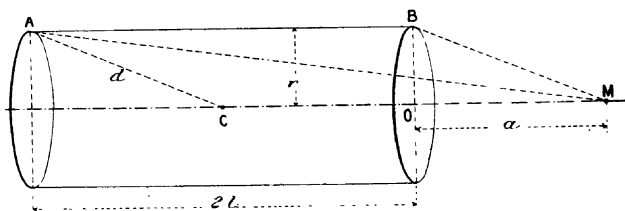


Fig. 75. — Champ produit par une bobine cylindrique.

Intensité du champ sur l'axe de la bobine, en M :

$$H_M = \frac{\pi NI}{l} \left(\frac{a + 2l}{\sqrt{r^2 + (a + 2l)^2}} - \frac{a}{\sqrt{r^2 + a^2}} \right).$$

En posant : angle $AMO = \varphi$; angle $BMO = \varphi'$, la relation devient

$$H_M = \frac{\pi NI}{l} (\cos \varphi - \cos \varphi').$$

Intensité du champ au centre H_c . — En posant $CA = d$:

$$H_c = \frac{2\pi NI}{\sqrt{r^2 + l^2}} = \frac{2\pi NI}{d}.$$

Lorsque la bobine a une longueur égale à 40 fois son diamètre, l'intensité du champ sur l'axe ne varie pas de 1 pour 100 dans les $\frac{7}{8}$ de la longueur de la bobine.

Bobine cylindrique de longueur indéfinie. — Une bobine cylindrique peut être assimilée, surtout si elle est formée d'un nombre pair de couches dont les inclinaisons des spires sont alternativement de sens contraire, à une série de courants circulaires normaux à son axe.

En donnant à la bobine une longueur assez grande par rapport à son diamètre pour qu'on puisse négliger l'action des bases, on obtient, à l'intérieur, un champ magnétique uniforme dont les lignes de forces sont parallèles à l'axe du cylindre.

En appelant l la longueur *totale* de la bobine, N le nombre total de tours de fil ou spires et I l'intensité du courant, on a

$$H = \frac{4\pi NI}{l}$$

ou, en appelant n_1 le nombre de spires par unité de longueur

$$H = 4\pi n_1 I.$$

Bobine sphérique. — Une telle bobine formée de N circuits circulaires plans équidistants roulés sur une sphère de diamètre d produit à l'intérieur un champ uniforme

$$H = \frac{8}{3} \pi \frac{NI}{d}.$$

L'avantage théorique d'une bobine sphérique, lorsqu'on l'utilise dans un galvanomètre ou tout autre appareil de mesure, est de permettre de négliger la longueur de l'aiguille qui se trouve dans un champ uniforme, et de pouvoir ainsi faire usage d'aiguilles longues.

Cadre circulaire. — Le champ produit au centre d'un cadre circulaire de 1 seul tour de fil de longueur L et de rayon r a pour valeur (154)

$$H = \frac{2\pi I}{r} = \frac{LI}{r^2}.$$

Si le cadre renferme N tours de fil assez rapprochés pour que la section du cadre soit négligeable devant ses dimensions,

$$H = \frac{2\pi NI}{r} = \frac{LI}{r^2}.$$

Cadre circulaire de section rectangulaire. — Lorsque les dimensions de la section du cadre ne sont pas négligeables devant son diamètre, il n'est pas légitime de déterminer la valeur du champ au centre en prenant le *rayon moyen* r du cadre, mais il faut déterminer le rayon de la spire d'action moyenne et l'introduire alors dans les formules ci-dessus.

Si r est le rayon moyen, ou distance du centre de gravité de la section du cadre à son centre, $2b$ la longueur de l'enroulement suivant l'axe et $2c$ l'épaisseur ⁽¹⁾, on a pour valeur du rayon d'action moyenne $r_{a. moy.}$

$$r_{a. moy.} = r \left[1 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{b^2}{2} - \frac{c^2}{3} \right) \right].$$

195. Bobine de champ galvanique maximum. — En se donnant un fil de section uniforme et de longueur déterminée, on peut rechercher la forme

de l'enroulement et les dimensions de la section rectangulaire donnant le champ maximum au centre pour un enroulement uniforme. Ce problème a été résolu en 1860 par *W. Weber*.

Le champ magnétique produit par une spire donnée étant en raison inverse de son rayon, il y a intérêt à multiplier les spires du plus petit rayon dont l'effet est prédominant, tout en ménageant cependant le vide intérieur nécessaire à la carcasse qui doit supporter le fil et au mouvement de l'aimant.

La courbe qui limite la section méridienne de l'enroulement est un cercle écrasé suivant le diamètre vertical (fig. 76) dont l'équation en coordonnées polaires est

$$u^2 = c^2 \sin \theta$$

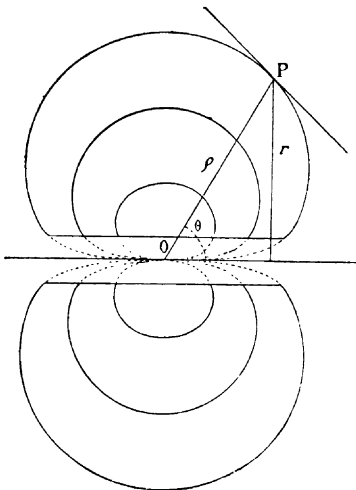


Fig. 76. — Bobine de champ galvanique maximum.

La courbe qui limite la section méridienne de l'enroulement est un cercle écrasé suivant le diamètre vertical (fig. 76) dont l'équation en coordonnées polaires est

(1) Voy. pour la démonstration *Muscart et Joubert*, t. II, p. 89.

u étant le rayon vecteur OP du point P , θ l'angle de ce rayon avec l'axe, et c une constante. La figure 76 donne les courbes successives pour des valeurs de c croissant en progression arithmétique, les parties pointillées correspondent au vide central.

On peut encore, avec un plus grand avantage théorique, en conservant la même gorge et la même résistance, diminuer le diamètre du fil dans les premières couches et l'augmenter progressivement dans les autres pour multiplier surtout le nombre de spires efficaces et réduire le nombre des spires les plus éloignées qui le sont moins. C'est cette disposition qui constitue le *galvanomètre gradué* de sir W. Thomson, mais elle n'est pas employée en pratique, à cause des complications de construction.

196. Aimants et courants équivalents. — Un aimant et un courant peuvent, au point de vue de leurs actions magnétiques, se remplacer l'un par l'autre et produire, dans certaines conditions, à une distance donnée, par exemple, un champ égal en grandeur et en direction. On dit que l'aimant et le courant sont *équivalents*.

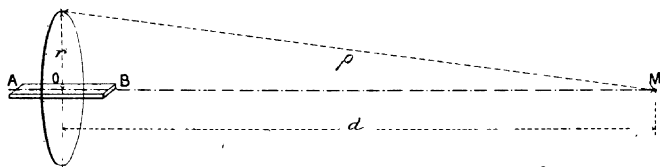


Fig. 77. — Aimants et courants équivalents.

Un courant circulaire de rayon r et de surface $S = \pi r^2$ produit en M sur un axe perpendiculaire à son plan (fig. 77) un champ galvanique d'intensité H donné par la formule

$$H = \frac{2\pi r^2 I}{\rho^3} = \frac{2SI}{\rho^3}$$

si la distance d devient très grande par rapport aux dimensions

$$H = \frac{2SI}{d^3}.$$

En plaçant au point considéré M un petit aimant de moment $2ml$, parallèlement au plan du courant circulaire, le couple W_c exercé par le courant sur l'aimant a pour valeur

$$W_c = \frac{2SI_2ml}{d^3}. \quad (1)$$

Si nous substituons au courant un barreau aimanté de moment \mathfrak{M} , il sera dans la première position des aimants de Gauss (81) et exercera un couple W_a

$$W_a = \frac{2\mathfrak{M}.2ml}{d^3}. \quad (2)$$

Si le couple (1) et (2) sont égaux, l'aimant et le courant seront équivalents.

Un courant fermé infiniment petit peut donc être remplacé, au point de vue de ses actions magnétiques, par un aimant infiniment petit normal à son plan et dont le moment magnétique a pour valeur

$$\mathfrak{M} = SI.$$

Nous trouverons l'application de toutes les formules établies ci-dessus dans l'étude des galvanomètres.

GALVANOMÈTRES.

197. Définitions. Classification. — Tout instrument permettant de mesurer l'intensité d'un courant est, théoriquement, un *galvanomètre*, mais on réserve plus spécialement ce nom aux appareils dans lesquels entrent en jeu les actions magnétiques du courant.

Les appareils dans lesquels on utilise à la mesure du courant des actions autres que celles définies par la loi de Laplace seront décrits à mesure que nous étudierons les principes sur lesquels ils sont basés.

Quelle que soit sa forme et ses dispositions, qui varient à l'infini, un galvanomètre comprend toujours un champ magnétique directeur, — c'est souvent le champ magnétique terrestre — et un circuit traversé par le courant électrique à mesurer.

De là deux grandes classes d'appareils, suivant que le circuit traversé par tout ou partie du courant dont on veut mesurer l'intensité est *fixe* ou *mobile*.

GALVANOMÈTRES A CIRCUIT FIXE.

Dispositions générales. — Les galvanomètres à circuit fixe sont caractérisés par une aiguille ou équipage mobile prenant une position d'équilibre sous l'action de deux couples, l'un produit par le circuit fixe, l'autre par un champ magnétique constant ou par un système de suspension.

L'*équipage mobile* est tantôt une aiguille aimantée, tantôt un système d'aiguilles astatiques, tantôt un aimant en forme de cloche. La *suspension* de cet équipage se fait par un pivot, un fil de cocon ou un fil métallique, lorsque ce dernier doit servir à produire un couple directeur. L'*index* est une tige fine et légère en paille, en aluminium, en crin, un fil de verre ou un simple rayon lumineux, lorsqu'on emploie les méthodes de réflexion (40).

Pour ne pas perdre un temps trop long aux lectures, on amortit les oscillations du système mobile en le disposant au centre d'une sphère de cuivre épaisse, en disposant des palettes légères en mica ou en aluminium, ou en faisant plonger les palettes dans un liquide, eau ou glycérine. Dans ce cas, le galvanomètre est dit amorti (*dead beat*). Nous décrirons quelques-uns des types de galvanomètres les plus connus ou les plus employés actuellement en pratique.

198. Galvanomètre de Nobili (1826). — C'est le plus ancien des appareils de mesure. Il se compose (fig. 78) de deux aiguilles aimantées de 5 à 6 centimètres de longueur disposées, l'une à l'intérieur, l'autre au-dessous d'un cadre

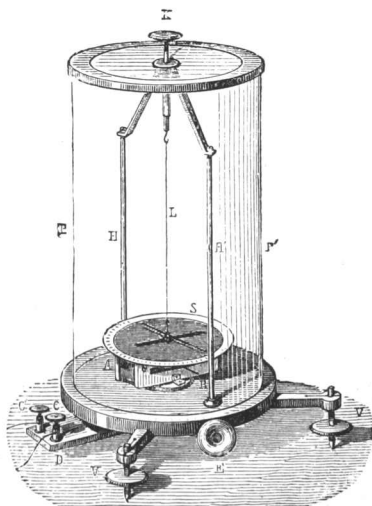


Fig. 78. — Galvanomètre astatique de Nobili.

horizontal traversé par le courant à mesurer. L'aiguille supérieure se prolonge par un index en crin ou en laiton se mouvant

au-dessus d'un limbe circulaire gradué en degrés. La direction est donnée par la torsion du fil de suspension. Des vis calantes permettent de placer l'équipage mobile bien au centre du cadre, et une cage protectrice met cet équipage à l'abri des courants d'air.

Pour un courant nul, les aiguilles doivent être parallèles aux fils du cadre. Jusqu'à 10 ou 12 degrés, il y a sensiblement proportionnalité entre l'intensité du courant et les déviations qu'il produit. Au delà, il faut faire une graduation. Cet appareil est aujourd'hui abandonné, car il n'y a aucune loi reliant les déviations aux intensités de courant qui les produisent et son faible amortissement rend les mesures très longues, très pénibles : il existe enfin des appareils incomparablement plus commodes et plus faciles à graduer.

199. Galvanomètre des tangentes. — Tout appareil galvanométrique dans lequel les intensités des courants sont proportionnelles aux tangentes des angles de déviation qu'ils produisent est un galvanomètre des tangentes. On réalise ces conditions le mieux possible en employant un champ directeur uniforme, tel que le champ magnétique terrestre ou celui d'un aimant placé à grande distance, une aiguille de très petites dimensions, un cadre aussi grand que possible, et des déviations de très faible amplitude, rendues facilement lisibles par les méthodes de réflexion (40).

Ce dernier artifice rend les corrections négligeables et permet de confondre l'arc, le sinus et la tangente et d'effectuer les lectures des déviations sur une échelle graduée en parties égales. On pourra s'en rendre compte par les formules que nous établissons ci-après.

200. Formules du galvanomètre des tangentes. — Dans le cas d'une aiguille infiniment petite, il suffit de se reporter aux valeurs trouvées pour les champs galvaniques (194) pour établir les formules suivantes, le champ directeur d'intensité H étant parallèle au plan du cadre galvanométrique.

Cadre circulaire de 1 tour de rayon r .

$$I = \frac{rH}{2\pi} \operatorname{tg} \alpha.$$

Cadre circulaire de N tours. — La section du cadre étant négligeable devant ses dimensions, et L la longueur du fil

$$I = \frac{rH}{2\pi N} \operatorname{tg} \alpha = \frac{r^2 H}{L} \operatorname{tg} \alpha.$$

Cadre circulaire de section rectangulaire. — En appelant r le rayon moyen, il faut substituer, dans la formule du cadre circulaire (159), la valeur du rayon de la spire d'action moyenne $r_{a. \text{ moy.}}$ (194) à celle du rayon moyen r

$$I = \frac{Hr}{2\pi N} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{b^2}{r^2} - \frac{1}{3} \frac{c^2}{r^2} \right) \operatorname{tg} \alpha.$$

Cadre circulaire de section rectangulaire et aiguille de longueur non négligeable. — La formule est des plus compliquées si le centre de l'aiguille n'est pas dans le plan moyen du cadre. En faisant cette dernière hypothèse, la formule se simplifie un peu et devient, en appelant $2l$ la distance des pôles de l'aiguille

$$I = \frac{rH}{2\pi n} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{b^2}{r^2} - \frac{1}{3} \frac{c^2}{r^2} \right) \left[1 - \frac{3}{4} (1 - 5 \sin^2 \alpha) \frac{l^2}{r^2} + \frac{3^2 \cdot 5}{(2 \cdot 4)^2} (1 - 14 \sin^2 \alpha + 21 \sin^4 \alpha) \frac{l^4}{r^4} \right] \operatorname{tg} \alpha.$$

Ces corrections sont d'ailleurs purement théoriques, car en faisant α très petit, le terme entre crochets devient très sensiblement égal à 1.

On a cherché à réduire l'importance de ces termes correctifs par certains artifices tels que le cadre conique de Gaugain (158), les bobines à deux, trois et quatre cercles d'Helmholtz, et les bobines à enroulements sphériques qui donnent un champ uniforme à l'intérieur et, par suite, rendent le terme correctif relatif à la longueur de l'aiguille absolument nul. Ces dispositions compliquées ne se sont pas répandues en pratique, et l'on s'en tient aux proportionnalités obtenues par l'emploi de faibles déviations, les erreurs de lecture étant généralement d'un ordre supérieur à celles introduites par les termes correctifs eux-mêmes, à grand renfort de calculs pénibles et fastidieux.

Le type de galvanomètre des tangentes dans lequel on met à profit les faibles déviations est le galvanomètre de sir W. Thomson.

201. Galvanomètre à réflexion de sir W. Thomson.

— Cet appareil, qui varie beaucoup dans ses formes et ses dispositions de détail, se compose en principe d'une légère aiguille aimantée, suspendue au centre d'une grande bobine de fil et d'un système de lecture permettant d'amplifier les petits déplacements de l'aiguille. Un long index sans poids est formé par un rayon lumineux réfléchi sur une échelle graduée par un petit miroir qui supporte l'aiguille.

Les déviations étant toujours très faibles et la bobine relativement grande, les déviations sont sensiblement proportionnelles aux intensités des courants à mesurer.

Il se construit sous la forme astatique ou non astatique, apériodique ou non, différentielle ou non, etc.

Dans la forme non astatique, il se compose de quatre petits aimants de 5 à 6 millimètres de longueur collés contre un petit miroir plan-convexe. Le diamètre du miroir est d'environ 7 à 8 millimètres et le poids total, aiguille et miroir, n'atteint pas 1 décigramme. On cherche, en multipliant le nombre des aiguilles, à obtenir le maximum d'aimantation avec le minimum de poids parce que l'aiguille revient d'autant plus rapidement au zéro que l'aimantation est plus grande.

Le miroir est suspendu à un simple fil de cocon et placé au centre d'une bobine renfermée dans un cylindre de laiton. La face antérieure est fermée par une glace. Le cylindre est supporté par trois pieds à vis calantes pour mettre l'instrument de niveau. Un aimant légèrement courbé ou aimant *directeur*, supporté par une tige verticale fixée au sommet de la cage, constitue un méridien artificiel dont on règle l'action en le faisant glisser ou tourner sur sa tige, pour faire varier l'intensité du champ magnétique dans lequel se déplace l'aiguille.

Sensibilisation du galvanomètre. — Quand les pôles de l'aimant directeur sont disposés comme ceux de l'aimant terrestre (pôle nord ou marqué au sud), sa force directrice s'ajoute à celle de la terre, et la sensibilité de l'appareil *diminue*, puisque le champ directeur augmente.

En faisant tourner cet aimant de 180°, on oppose sa force directrice à celle de la terre; pour avoir le maximum de sensibilité, on l'abaisse jusqu'à ce que les deux actions se neutralisent;

puis on le soulève un peu, afin de conserver une petite force directrice qui ramène l'index lumineux au zéro.

Repérage d'un instrument de mesure. — Pour pouvoir déplacer et replacer toujours dans la même position un appareil de mesure quelconque reposant sur trois vis calantes, sir W. Thomson numérote les trois pieds de l'appareil et place le pied n° 1 dans un petit trou fait sur la table, le pied n° 2 dans une rainure courte ayant une direction telle que son prolongement passe par le trou, et le pied n° 3 sur le plan de la table. D'où le nom de *trou, rainure et plan* donné à la disposition. M. J. Carpentier obtient le même résultat à l'aide d'une *plaque-crapaudine* en laiton portant trois rainures radiales en forme de V disposées à 120°. Un appareil de mesure dont les vis calantes sont engagées dans les rainures ne peut prendre qu'une seule position (Voy. fig. 9, page 28).

Orientation d'un cadre galvanométrique. — Il y a deux cas à considérer, suivant les positions relatives du cadre et du méridien magnétique.

a. Placer un cadre galvanométrique dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. — On dispose une aiguille aimantée au centre de ce cadre, et on envoie des courants dans ce cadre, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, jusqu'à ce que les courants n'influencent plus l'aiguille, qui doit alors rester immobile.

b. Placer un cadre galvanométrique dans le plan du méridien magnétique. — On dispose une aiguille aimantée au centre de ce cadre, et on le fait tourner dans un sens ou dans l'autre jusqu'à ce que des courants égaux et de sens contraires produisent des déviations égales, à droite et à gauche de la position d'équilibre de l'aiguille.

202. Galvanomètre astatique de Thomson. — Le système astatique s'emploie seulement dans les appareils à long fil. Chaque aiguille est entourée séparément d'une bobine, le courant passe en sens inverse dans les deux bobines. Le système étant un peu plus lourd, on munit l'équipage inférieur d'une petite lame d'aluminium en forme de losange pour amortir les oscillations. Le réglage de la position de l'aimant directeur se fait à l'aide d'une vis de rappel. La boîte carrée

ou cylindrique qui renferme l'appareil porte une ouverture pour loger un thermomètre et un niveau à bulle d'air qui permet de disposer le système dans une position parfaitement verticale.

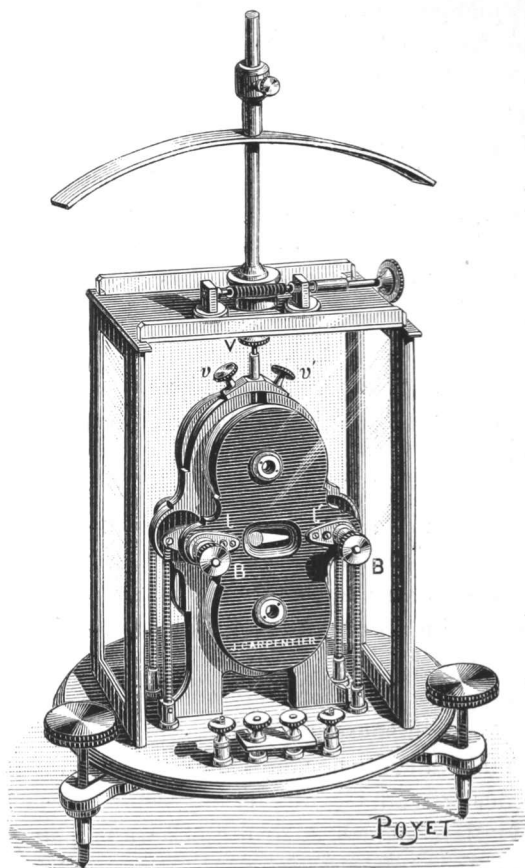


Fig. 79. — Galvanomètre à miroir de Thomson. -- Modèle de M. J. Carpentier.

Chacune des bobines se compose de deux parties séparées par un plan vertical médian ; on peut ainsi retirer le système astatique pour le vérifier, rattacher le fil de cocon, etc. Il y a donc en réalité quatre bobines distinctes qui correspondent à huit bornes placées sur le socle. Suivant la manière d'effectuer la liaison de ces bornes entre elles, on groupe les bobines en

tension, en quantité ou en deux groupes en dérivation de deux bobines en tension; ce qui permet de proportionner la résistance du galvanomètre à la nature des mesures à effectuer.

Le fil de cocon est attaché à un bouton qu'on peut élever ou abaisser à volonté. Quand on l'abaisse, les aiguilles reposent sur les bobines; l'on peut alors déplacer l'instrument sans risquer de briser le fil de cocon. Les lectures des déviations se font par la méthode du miroir (40).

Les figures 79 et 80 montrent la disposition qui a été donnée

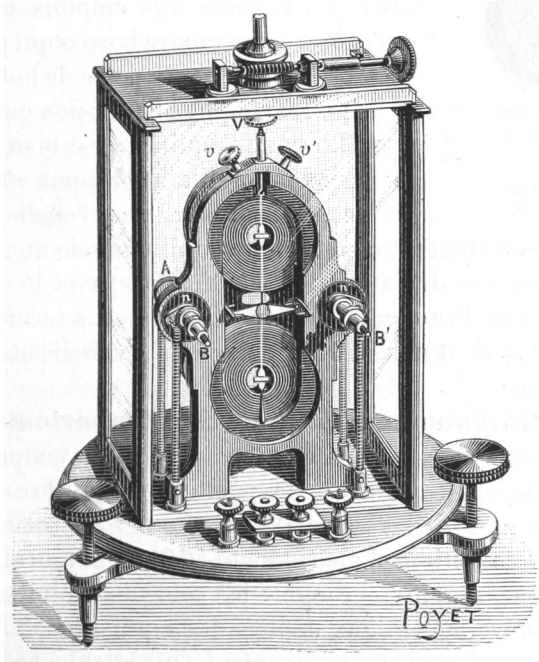


Fig. 80. — Galvanomètre Thomson. — Modèle de M. J. Carpentier.
Vue intérieure.

au galvanomètre astatique de Thomson par M. J. Carpentier. Les bobines sont montées par couple sur des platines d'ébonite et chacune de ces deux platines se fixe à la carcasse de l'instrument par deux simples boutons B, B'. Lorsqu'on enlève et qu'on replace les bobines pour attacher le fil de cocon, les communications de circuits se rompent et se rétablissent sans qu'on ait à s'en préoccuper. Le crochet de suspension V du fil de cocon

n'est maintenu en place que par le serrage de deux boutons $\nu\nu'$, ce qui facilite ainsi l'enlèvement et la mise en place. Le galvanomètre à long fil formé de fil de 0,1 millimètre de diamètre porte

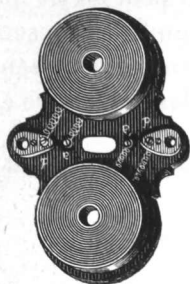


Fig. 81. — Paire de bobines, modèle de galvanomètre de M. J. Carpentier.

4 bobines de 12 000 spires et de 3 000 ohms de résistance chacune. Celui à gros fil de 1 millimètre de diamètre ne compte que 3 ohms par bobine. En substituant les circuits les uns aux autres, un seul appareil muni de quelques bobines de rechange devient ainsi propre aux emplois les plus divers, grâce aux quatre bornes qui permettent d'employer une seule paire de bobine ou les deux paires couplées en tension ou en dérivation. Lorsque l'équipage est bien astatique, la période d'oscillation atteint 25 et même 30 secondes : sur une échelle placée à

1 mètre de distance, un courant de 1 millième de micro-ampère peut donner une déviation de 2 centimètres, avec le champ magnétique terrestre comme champ directeur. La formule de mérite (221) atteint alors 20 000 mégahms, l'échelle étant divisée en centimètres.

203. Galvanomètres amortis et aperiodiques. —

Pour éviter les oscillations qui font perdre un temps précieux dans les mesures avant que la position d'équilibre ne soit atteinte, on amortit les oscillations et on s'approche plus ou moins des conditions d'apériodicité (46) en entourant l'aimant d'une masse de cuivre rouge : les courants induits dans cette masse se développent aux dépens de la puissance vive de l'aiguille et amortissent son mouvement. On obtient aussi un certain amortissement en munissant l'équipage mobile d'une lame légère en aluminium ou en mica qui se meut dans l'air ou dans l'eau.

Voici comment *sir W. Thomson* a rendu aperiodique son galvanomètre à réflexion non astatique (fig. 82).

Le centre de la bobine est occupé par un tube en laiton A de longueur telle que la partie *ab* se trouve au milieu de sa longueur. Le tube A est fermé par une petite glace ; il porte un filet de vis sur lequel se visse un bague *c*, dans laquelle vient se visser une troisième partie du tube fermée aussi par une glace,

de façon à former une chambre d'air complètement fermée. Au milieu du tube *c* se trouve un miroir *m* portant une petite aiguille aimantée. Le miroir est presque du même diamètre que le tube, ayant juste la place nécessaire à son déplacement, il est suspendu par un fil de cocon extrêmement court. L'espace *ab*

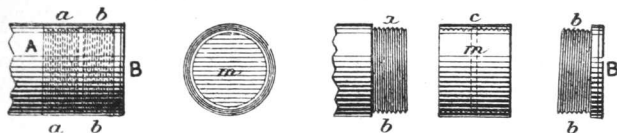


Fig. 82. — Galvanomètre apériodique à réflexion de sir W. Thomson.

fermé par les petites glaces est juste assez grand pour permettre au miroir de fournir une bonne déviation sur l'échelle.

Par cette disposition, on empêche tout mouvement violent du miroir sous l'action du courant : au lieu de dépasser le point et de revenir en arrière, le rayon arrive lentement à sa vraie position et s'y arrête sans la dépasser. Lorsqu'on interrompt le courant, le rayon revient lentement au zéro. Le fil de suspension étant très court, le miroir ne se meut pas aussi librement que dans le galvanomètre ordinaire, sa sensibilité n'est donc pas aussi grande, mais elle est cependant suffisante dans la plupart des cas. Il est facile de remplacer le cocon lorsqu'il est brisé. Une des extrémités du cocon étant fixée au miroir, on passe l'autre extrémité dans un petit trou pratiqué sur *c*, et on tend le cocon jusqu'à ce que le miroir soit suspendu et ne touche pas les côtés. On applique alors une goutte de vernis sur le trou qui est ainsi bouché en même temps que le cocon se trouve fixé.

204. Galvanomètre universel apériodique d'Arsonval-Wiedemann (1888). — Cet appareil est une boussole des tangentes à bobines mobiles pouvant se transformer, par un simple changement de l'équipage magnétique, en galvanomètre astatique ou en galvanomètre Thomson. La partie portant l'équipage mobile est indépendante du socle qui soutient les bobines et la règle divisée sur laquelle elles glissent. L'amortissement est lui-même mobile et variable à volonté, en passant graduellement d'un maximum à zéro (fig. 83 et 84).

La partie fixe, toute en laiton, se compose d'un plateau circulaire P reposant sur une pointe et deux vis calantes. Une règle divisée R de 50 centimètres de longueur traverse le plateau suivant le diamètre perpendiculaire à la ligne qui joint les deux

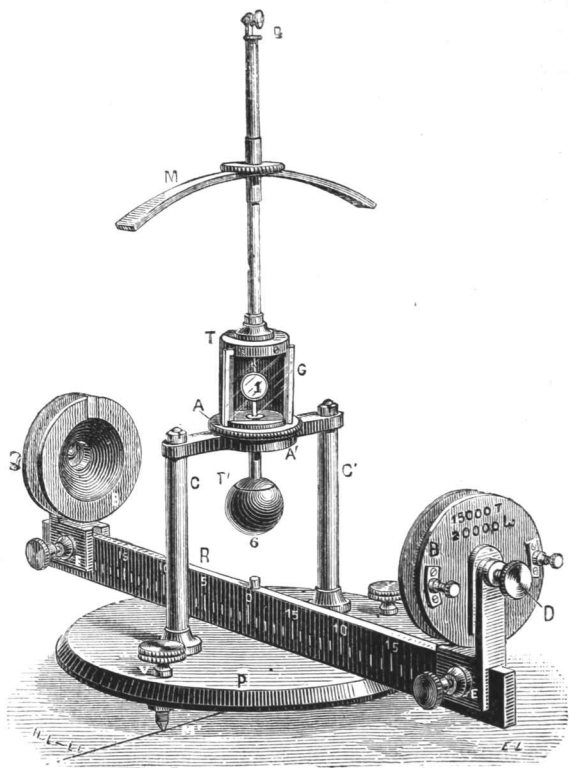


Fig. 83. — Galvanomètre universel apériodique d'Arsonval-Wiedemann. Vue d'ensemble.

vis calantes. Sur un second diamètre, perpendiculaire au premier, s'élèvent deux colonnes CC' reliées à leur partie supérieure par une traverse percée d'une ouverture circulaire de 5 centimètres de diamètre. C'est sur cet orifice que vient s'asseoir et pivoter comme sur un centre la seconde partie de l'appareil.

Le centre du plateau partage en deux parties d'égale longueur la règle divisée qui y est fixée de champ. Chaque moitié

de la règle reçoit une chape mobile qui peut glisser tout du long, comme sur un banc de Melloni. Chaque chape porte à sa partie supérieure une bobine circulaire qui s'y trouve fixée verticalement à l'aide d'une vis centrale D, mobile à la main, ce

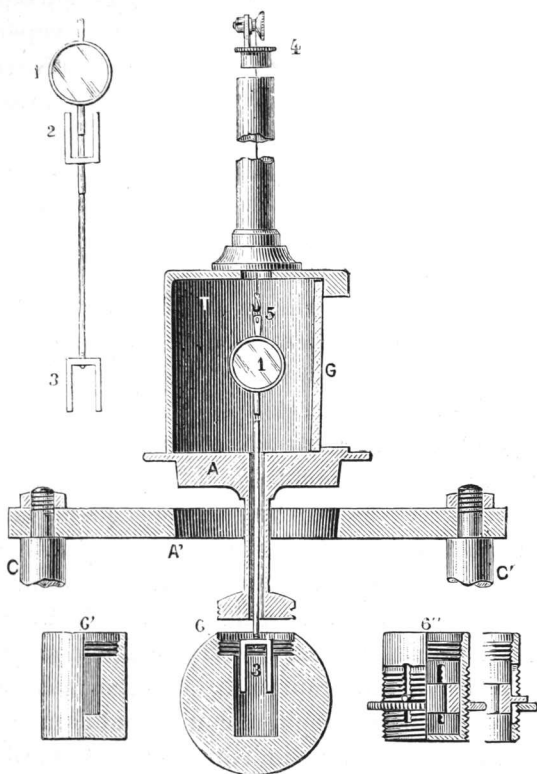


Fig. 84. — Galvanomètre d'Arsonval-Wiedemann. Détails de l'amortisseur et du système astatique.

qui permet un changement rapide de bobines suivant la nature des courants à mesurer. Chaque bobine porte gravés sur sa joue extérieure le nombre de tours et la résistance du fil qui s'y trouve enroulé. La règle divisée devant être perpendiculaire au méridien magnétique, il suffit de placer les pointes des deux vis calantes sur une ligne tracée dans ce méridien pour que l'appareil se trouve installé une fois pour toutes.

La partie mobile se compose d'un tambour cylindrique en

laiton T, disposé verticalement et venant pivoter par sa base inférieure sur l'ouverture circulaire dont est percée l'entretoise reliant les deux colonnes. Ce cylindre est percé latéralement d'une ouverture carrée, fermée par une glace plane, mobile, légèrement inclinée, qui laisse voir le miroir surmontant l'équipage magnétique. Au centre de la base supérieure du cylindre s'élève un tube métallique vertical, recevant à son extrémité libre un bouchon mobile surmonté d'un treuil 4 sur lequel s'enroule le fil de cocon qui supporte l'équipage; ce fil descend dans le tube et porte à son extrémité inférieure un petit crochet auquel on vient suspendre l'équipage après avoir enlevé la glace du cylindre. Le long de ce tube glisse un aimant directeur M.

Du centre de la base inférieure du tambour part également un tube qui porte à son extrémité libre un bouchon fileté sur lequel vient se visser la sphère en cuivre rouge qui compose l'amortisseur. Le centre de cette sphère passe par la ligne horizontale qui joint les centres des deux bobines mobiles. Toutes ces parties forment un ensemble rigide composé exclusivement de pièces de tour, et se trouve par conséquent parfaitement centré par rapport à lui-même et au plateau fixe.

L'équipage magnétique se compose d'un petit aimant vertical en forme d'U (fig. 84), ayant 15 millimètres de longueur et 6 millimètres d'écart entre les branches. Il pèse à peine 2 grammes et peut porter de 100 à 120 grammes. Cet aimant pénètre avec la plus grande facilité dans la sphère composant l'amortisseur qui est creusé d'un simple trou cylindrique vertical pour le recevoir. On peut donc enlever l'amortisseur sans toucher à l'aimant. Cet aimant est vissé à un fil d'aluminium qui pénètre dans le tambour. L'extrémité de ce fil opposée à l'aimant vient s'engager, à frottement doux, dans la monture du miroir, qui peut ainsi recevoir toutes les orientations par rapport au plan de l'aimant. Comme le tambour portant la glace transparente est lui-même mobile autour de son centre de figure, on peut diriger le miroir dans n'importe quel azimut, l'aimant mobile restant toujours dans le plan du méridien magnétique. Il est facile de placer un second aimant 2 semblable au premier sur la même tige, en opposant les pôles, ce qui constitue un équipage astatique de

Nobili, si l'on ne veut pas astatiser à l'aide de l'aimant directeur.

L'appareil se transforme très rapidement en Thomson par un simple changement de l'équipage. On a donc réuni en une seule les trois formes principales de galvanomètre, avec le grand avantage de pouvoir en faire varier la sensibilité à volonté par l'écart des bobines et d'en faire également un appareil différentiel. Ce galvanomètre, muni de son amortisseur, fait un excellent appareil de mesure balistique qui revient au zéro sans oscillation, qualité très précieuse pour prendre rapidement les mesures.

En se servant de l'échelle micrométrique de M. d'Arsonval pour faire la lecture des petites déviations, on a une boussole des tangentes de la plus haute précision. C'est pour ces différentes raisons que M. d'Arsonval a cru devoir appeler cet instrument galvanomètre *universel aperiodique*.

205. Galvanomètre des sinus (Pouillet, 1837). — Dans cet appareil, on maintient invariable la position relative de l'aiguille et du cadre, ce qui rend les mesures indépendantes des dimensions de l'aiguille. Tout galvanomètre portant un limbe gradué et un cadre mobile autour d'un axe vertical peut servir de galvanomètre des sinus. Nous prendrons comme exemple le modèle de M. Ducretet (fig. 85) qui peut d'ailleurs fonctionner aussi comme galvanomètre des tangentes.

Le cadre étant disposé parallèlement à l'aiguille et au champ directeur, on y envoie le courant à mesurer. L'aiguille dévie, et on fait tourner le cadre dans le sens même de la déviation jusqu'à ce qu'il redevienne parallèle à l'aiguille. L'aiguille est alors en équilibre sous l'action de deux couples, l'un dû au courant, l'autre dû au champ directeur. En appelant α l'angle dont le cadre a tourné, on a évidemment

$$\frac{2\pi nI}{r} = H \sin \alpha$$

d'où

$$I = \frac{rH}{2\pi n} \sin \alpha.$$

Le courant maximum que l'appareil permet de mesurer s'ob-

tient en faisant $\alpha = 90^\circ$ ou $\sin \alpha = 1$, dans la formule ci-dessus. L'obligation de courir après la position d'équilibre rend les

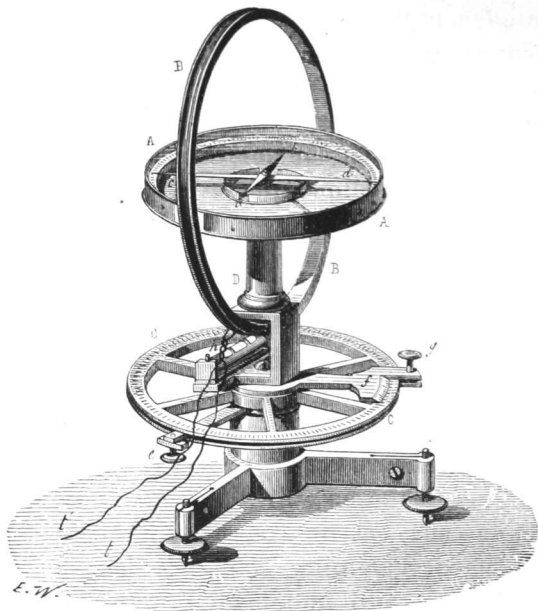


Fig. 85. — Galvanomètre des sinus et des tangentes.

mésures longues et délicates, aussi l'appareil est-il abandonné en pratique.

206. Galvanomètre différentiel (A. C. Becquerel, 1826).

— Un galvanomètre différentiel se compose de deux bobines ou de deux séries de bobines ayant le même nombre de spires et la même résistance électrique disposées symétriquement par rapport à un équipage mobile, de façon à le laisser en équilibre chaque fois que des courants égaux traversent les bobines.

En général, cette condition est obtenue en rendant, par construction, une des bobines légèrement mobile et ajustable, pour compenser les inégalités de fabrication. La plupart des galvanomètres déjà décrits ou ceux que nous examinerons par la suite peuvent s'établir sous la forme différentielle : nous aurons l'occasion de signaler par la suite plusieurs applications de ces appareils.

GALVANOMÈTRES A CIRCUIT MOBILE.

Lorsqu'un courant est placé dans un champ magnétique, ce champ magnétique exerce sur lui une force ; si le cadre est libre de se mouvoir, il se déplace jusqu'à ce que l'action exercée par le champ sur le circuit soit équilibrée par une autre action égale et de signe contraire.

Pour un élément de longueur dl , traversé par un courant d'intensité I placée dans un champ magnétique H , la force élémentaire exercée par le champ sur le courant dl a pour valeur

$$df = H I dl \sin \alpha$$

en appelant α l'angle formé par la direction de l'élément de courant et celle des lignes de force au point où est l'élément de courant.

Cette action est utilisée dans le galvanomètre à cadre mobile de Thomson, celui de MM. Deprez et d'Arsonval, et le galvanomètre à mercure de M. Lippmann. Dans tous ces appareils, on fait $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$, pour avoir, toutes choses égales d'ailleurs, la force maxima entre le champ fixe et le conducteur mobile.

207. Galvanomètre à cadre mobile de Thomson. — Cet appareil directement dérivé du siphon recorder, est ainsi décrit par *J. Clerk-Maxwell*, à propos des bobines suspendues ⁽¹⁾.

« Dans le galvanomètre ordinaire, un aimant suspendu est soumis à l'action d'une bobine fixe. Mais si la bobine peut être suspendue avec une délicatesse suffisante, nous pourrions déterminer l'action d'un aimant, ou celle d'une autre bobine sur la bobine suspendue, par la déviation de cette bobine à partir de sa position d'équilibre. Nous ne pouvons pas, cependant, faire passer le courant dans la bobine suspendue sans qu'il y ait communication métallique entre les électrodes de la pile et celle du fil de la bobine. Cette communication peut être établie de deux manières différentes, par une suspension bifilaire et par des fils dans des directions opposées... »

La suspension bifilaire est appliquée au siphon-recorder. La suspension unifilaire appliquée aux mesures est ainsi décrite par Clerk-Maxwell :

« L'autre mode de suspension est par le moyen d'un seul fil

⁽¹⁾ *A Treatise on Electricity and Magnetism*, t. II, § 721 (1873).

fixé à une extrémité de la bobine. L'autre extrémité de la bobine est reliée à un autre fil suspendu dans la même ligne verticale que le premier dans une coupe de mercure..... Dans certains

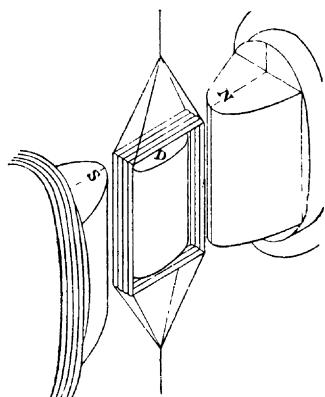


Fig. 86. — Galvanomètre à circuit mobile de sir W. Thomson.

cas, il convient de fixer les extrémités des deux fils à des pièces au moyen desquels on peut les tendre fermement, en prenant soin que la ligne des fils passe par le centre de gravité de la bobine. L'appareil sous cette forme peut être employé lorsque l'axe n'est pas vertical (fig. 86).

« La bobine suspendue peut être employée comme un galvanomètre extrêmement sensible, car, en augmentant l'intensité du champ magnétique dans lequel elle oscille, la force due à un faible courant dans la bobine peut être

grandement augmentée sans ajouter à la masse de la bobine. Dans ce but, la force magnétique peut être produite par des aimants permanents, ou par des électro-aimants excités par un courant auxiliaire, et il peut être puissamment concentré sur la bobine suspendue à l'aide d'armatures en fer doux. Ainsi, dans le *recording* appareil de sir W. Thomson, la bobine est suspendue entre les pôles opposés des aimants N et S, et dans le but de concentrer des lignes de force sur les côtés verticaux de la bobine, une pièce de fer doux D est fixée entre les pôles des aimants. Ce fer doux devenant aimanté par induction produit un champ de force très puissant, dans l'espace compris entre lui et les deux aimants, à travers lequel les côtés verticaux de la bobine sont libres de se mouvoir, de sorte que la bobine, même lorsque le courant qui les traverse est très faible, est soumise à une force considérable tendant à la faire tourner autour de son axe vertical. »

208. Galvanomètre aperiodique de MM. Deprez et d'Arsonval ⁽¹⁾. — Dans cet appareil, le champ magnétique

(1) *Comptes rendus*, séance du 15 mai 1882.

est constitué par un aimant en U (fig. 87) dont les branches sont maintenues dans une position verticale, la culasse étant encastrée dans la socle de l'appareil.

Entre ses branches se trouve un cadre rectangulaire formé d'un fil très fin faisant un grand nombre de tours. Ce cadre est relié à deux fils d'argent ou de cuivre écroui. Le fil supérieur est attaché à l'extrémité d'une tige qui peut recevoir deux mouvements distincts, l'un de rotation pour orienter le cadre, l'autre de translation verticale, afin de placer le cadre à une hauteur convenable. Le second fil est attaché, à la partie inférieure, à une lame élastique dont la tension est réglée par une vis. Ces deux fils étant fortement tendus, déterminent, dans l'espace, un axe fixe autour duquel le cadre peut prendre un mouvement de rotation. Ils servent en même temps à ame-

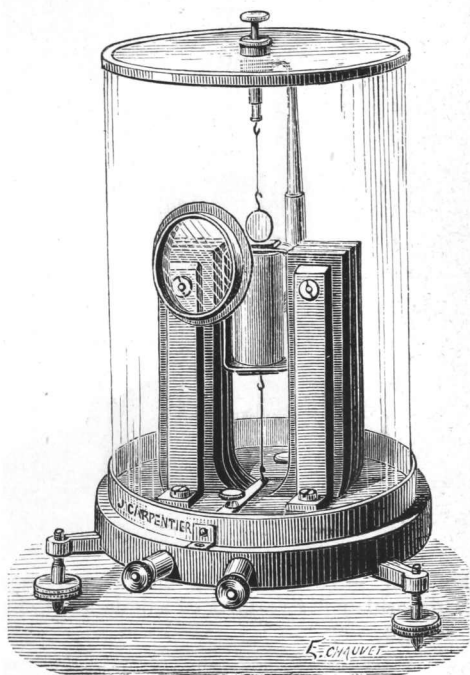


Fig. 87. — Galvanomètre à cadre mobile de MM. Deprez et d'Arsonval.

ner le courant dans le cadre, leurs extrémités communiquant respectivement avec deux bornes, et enfin le couple élastique qui résulte de leur torsion sous l'influence d'un mouvement angulaire du cadre sert à mesurer l'intensité du couple dû aux actions réciproques de l'aimant et du cadre, lorsque ce dernier est parcouru par un courant. Un petit miroir permet de lire les angles de torsion avec une grande précision. Dans l'intérieur du cadre se trouve un tube en fer destiné à renforcer l'intensité du champ magnétique. Lorsqu'on écarte avec la main le cadre de sa position d'équilibre naturel, il y revient en exécutant une série d'oscilla-

tions qui peuvent durer un temps considérable; mais si l'on réunit les deux bornes par un fil, les oscillations s'arrêtent immédiatement, et le cadre revient à sa position d'équilibre, comme s'il se mouvait dans un fluide de grande densité, à cause des courants d'induction déterminés dans le cadre par son mou-

vement dans le champ magnétique.

Généralement les fils de suspension de ce galvanomètre sont rectilignes. Dans ces conditions, à moins que les fils n'aient une grande longueur, le couple directeur ne peut être considéré comme proportionnel à la torsion que dans des limites angulaires très faibles. En outre, lorsque le fil a subi une torsion dépassant ces limites, il conserve une déformation permanente et la bobine

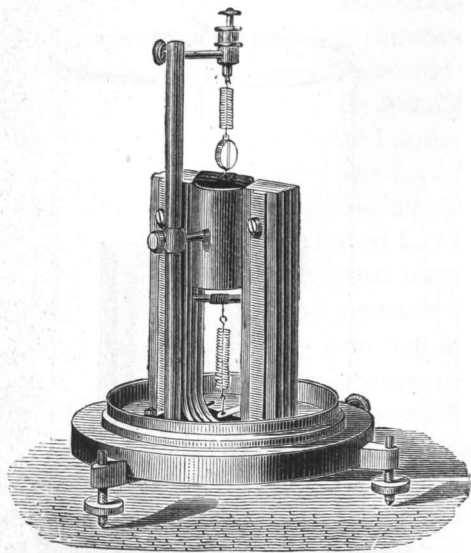


Fig. 88. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval. Disposition des ressorts en spirale de M. Éric Gerard.

ne reprend pas exactement sa position initiale.

Pour remédier à cet inconvénient, M. *Éric Gerard* (1885) remplace les fils rectilignes par des ressorts à boudin, en fil de bronze phosphoreux de 0,15 mm de diamètre, et maintenus dans la verticale par un fil de cocon axial qui soutient la bobine (fig. 88). Par cette disposition, le couple de torsion reste proportionnel aux déplacements angulaires dans des limites étendues, la bobine revient exactement à sa position initiale lorsque le couple de torsion a cessé, et la hauteur de l'appareil peut être notablement réduite.

209. Galvanomètre à mercure de M. Lippmann (1884).

Le principe de l'appareil consiste à équilibrer l'action du courant par la pression hydrostatique d'une colonne de mercure.

Un courant vertical traverse une chambre parallélépipédique très mince, placée entre les deux pôles d'un aimant puissant produisant un champ magnétique intense.

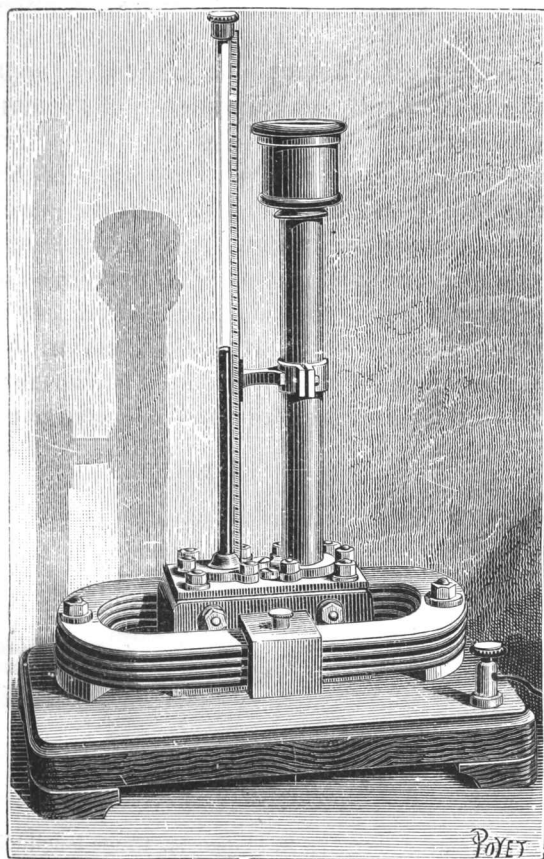


Fig. 89. — Galvanomètre à mercure de M. Lippmann.

Si l'on considère l'équilibre dans une tranche verticale, la force horizontale exercée par le champ d'intensité H sur le courant d'intensité I et de longueur l est égale à $HI l$ dynes.

La force exercée sur la tranche verticale de mercure d'épaisseur e est égale à

$$elhDg \text{ dynes}$$

en appelant h la dénivellation, D la densité du mercure et g

l'accélération due à la pesanteur. En posant l'équation d'équilibre entre ces deux forces, on a

$$I = Dg \frac{he}{H}; \quad h = \frac{I}{Dg} \frac{HI}{e}.$$

La dénivellation est d'autant plus grande et l'appareil plus sensible que le champ H est plus intense et l'épaisseur de la chambre plus faible.

Voici la forme pratique donnée à l'appareil (fig. 89) :

Un manomètre à mercure ABC (fig. 90) est placé entre les branches d'un aimant permanent, formé ici de deux branches en U, de telle manière que les deux pôles se trouvent de chaque côté de la branche horizontale du manomètre. Des masses de fer terminées en forme de tronc de cône servent d'armatures aux aimants permanents et permettent de concentrer le champ en B (fig. 90 et 91), pour le rendre aussi intense que possible en

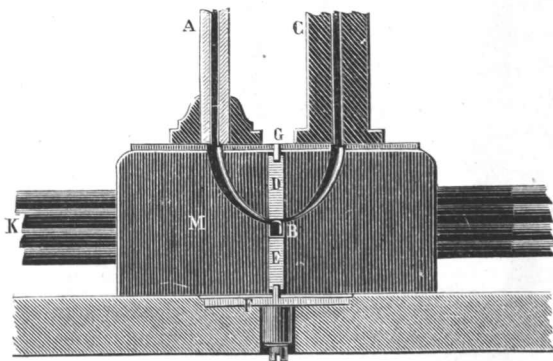


Fig. 90. — Galvanomètre de M. Lippmann. Coupe longitudinale.

ce point. Le courant à mesurer est amené au mercure de la branche horizontale du manomètre et traverse cette branche verticalement; il arrive par la lame de platine D et sort par la lame E. La portion de la colonne de mercure traversée par le courant représente un élément de courant mobile qui, placé dans le champ magnétique constitué par les aimants K, tend à se déplacer vers la droite ou vers la gauche; la poussée exercée sur cet élément de courant est proportionnelle à son intensité; elle produit donc une action hydrostatique qui se traduit par la dé-

nivellation du mercure, qui s'élève dans l'une des branches du manomètre jusqu'à ce que la pression hydrostatique totale fasse équilibre à la force électromagnétique.

Pour éviter d'avoir à lire des différences de niveau, on dispose sur l'une des branches un réservoir à large surface; le niveau dans cette branche reste alors constant, quelle que soit la dénivellation dans l'autre branche, constituée par un tube de verre de faible section. On donne à la branche à niveau constant une certaine hauteur afin de pouvoir effectuer les lectures, quel que soit le sens du courant.

Lorsqu'on désire une sensibilité encore plus grande, il suffit de donner au tube de verre une certaine inclinaison; une dénivellation très faible produit alors un grand déplacement de la colonne de mercure. L'ampère-mètre de M. Lippmann est assez aperiodique, en ce sens qu'il arrive lentement à sa position d'équilibre et s'y arrête sans la dépasser. Il est réversible, c'est-

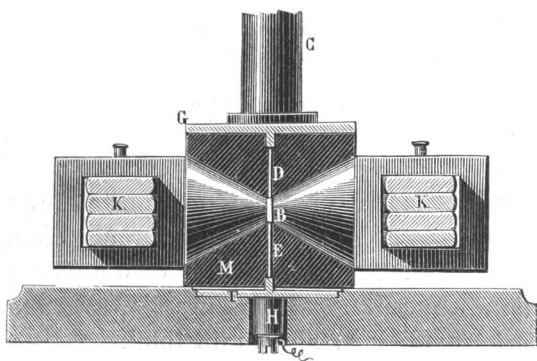


Fig. 91. — Galvanomètre de M. Lippmann. Coupe transversale.

à-dire que si l'on met le mercure en mouvement à l'aide d'une force mécanique extérieure, et qu'on réunisse les deux lames de platine D et E par un circuit, ce circuit est traversé par un courant *continu* qui dure tant que dure l'écoulement du mercure. Il constitue alors une machine *unipolaire*, appareil dont nous indiquerons le principe à propos de l'induction.

Bien que le nombre de galvanomètres soit actuellement très grand, aucun d'eux ne diffère essentiellement en principe des principaux types que nous venons de décrire, d'autant mieux

qu'un certain nombre d'appareils prétentieusement baptisés du nom de *galvanomètres* sont à peine des *indicateurs de courant* (210).

APPAREILS DE MESURE INDUSTRIELS DES INTENSITÉS ET DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

210. Définitions. — Les méthodes galvanométriques sont les plus usitées en industrie pour la mesure des intensités et des différences de potentiel. Les appareils employés sont de nature très variée et désignés sous le nom d'*ampèremètres* ou de *voltmètres*, suivant qu'ils servent à déterminer des intensités ou des différences de potentiel.

Les uns obéissent à des lois connues et peuvent être gradués en partant de ces lois, et après avoir déterminé seulement un ou deux points de la graduation. Ce sont des appareils de mesure proprement dits.

D'autres suivent une loi absolument empirique et une graduation changeant avec chaque appareil particulier. Ils méritent à peine le nom de galvanomètres et devraient s'appeler, avec plus de raison, des *indicateurs de courant* ou des *indicateurs de potentiel*.

Les voltmètres et les ampèremètres industriels ne diffèrent entre eux que par la grosseur du fil que porte l'appareil et par la manière de disposer l'appareil sur le circuit. L'ampèremètre a une résistance généralement petite, et d'autant plus petite que l'intensité à mesurer est plus grande, *s'intercale* dans le circuit et est traversé par le courant total.

Le voltmètre à fil long, fin et résistant, se dispose en *dérivation* entre les deux points dont on veut connaître la différence de potentiel. Le voltmètre n'est donc pas autre chose qu'un ampèremètre à grande résistance fixe et constante, traversé par un courant dont l'intensité varie proportionnellement à la différence de potentiel entre les deux points où il est branché, et mesurant ainsi *indirectement* cette différence de potentiel. Dans tous les cas, la résistance du voltmètre doit être assez grande pour ne pas troubler le régime du courant par sa présence. Les voltmètres industriels doivent avoir au moins 20 ohms de résistance par volt à mesurer, mais ce chiffre n'a rien d'absolu.

Sous ces réserves relatives à l'enroulement et au couplage des appareils, nous pouvons étudier en même temps les voltmètres et les ampèremètres industriels qui, pour chaque type, ne diffèrent entre eux que par la résistance du fil et le nombre de spires sur les bobines. Nous examinerons seulement ici quelques types de galvanomètres proprement dits : les indicateurs de courant seront étudiés plus tard comme applications de l'électromagnétisme.

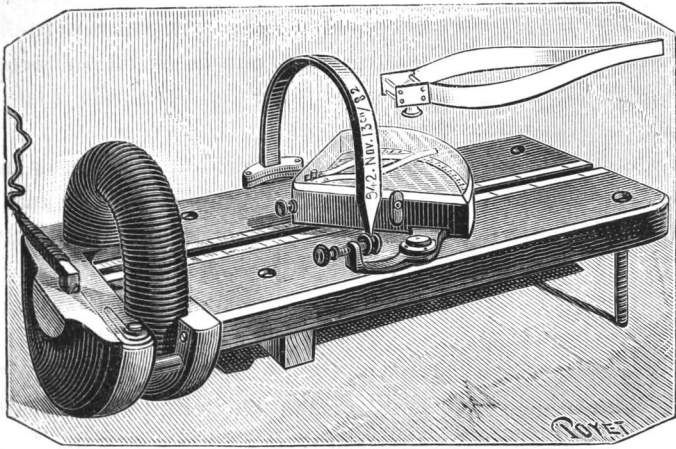


Fig. 92. — Galvanomètre à magnétomètre mobile de sir W. Thomson.

211. Voltmètre de sir W. Thomson (1883). — L'appareil (fig. 92) se compose de deux parties : le magnétomètre et la bobine. La bobine est formée d'un fil fin de maillechort de plus de 2 000 mètres de longueur, faisant environ 7 000 tours et présentant plus de 6 000 ohms de résistance. Elle est roulée sous forme d'un tore de 14 cm de diamètre extérieur et 6 cm de diamètre intérieur. Cette bobine est disposée verticalement et solidement fixée sur une planchette en bois qui forme le socle de l'appareil et se met de niveau à l'aide de vis calantes. Le magnétomètre se compose de quatre petites aiguilles en acier de 1 centimètre de longueur, reliées à un index en aluminium ; le système repose sur un axe vertical et l'extrémité de l'index se meut devant une échelle graduée en tangentes. Une glace horizontale, placée au-dessous de l'index et formant le fond de

la boîte dans laquelle le système est enfermé, permet de faire la lecture sans l'erreur due à la parallaxe. Ce magnétomètre est mobile sur une longue planchette horizontale et peut s'éloigner ou se rapprocher à volonté de la bobine. Il y a donc deux graduations : une sur le magnétomètre, l'autre sur la planchette. Les divisions sur la planchette sont tracées de telle façon que le magnétomètre, placé dans un champ magnétique de 1 unité C.G.S. d'intensité, donne, à la distance marquée 1 sur la bobine, une déviation égale à 1 lorsque la différence de potentiel aux bornes de l'instrument est égale à 1 volt. On rapproche le magnétomètre de la bobine jusqu'à ce que la déviation devienne égale à 2 divisions ; on marque alors 2 sur l'échelle à la position correspondante, et ainsi de suite.

L'intensité du courant est proportionnelle aux lectures sur le cercle du magnétomètre, inversement proportionnelle aux lectures sur l'échelle de la planchette et proportionnelle à l'intensité du champ magnétique. Soient :

H l'intensité horizontale du champ magnétique en unités C. G. S. au point où se trouve placé le magnétomètre ;

d le nombre de divisions lu sur le cadre du galvanomètre ;

n le nombre lu sur l'échelle de la planchette pour la position correspondante du magnétomètre ;

e la différence de potentiel en *volts* aux bornes de l'instrument.

On a alors

$$e = H \frac{d}{n} \text{ volts.} \quad (1)$$

La graduation est permanente et s'établit une fois pour toutes. Lorsqu'on fait une série de mesures sans déplacer le magnétomètre, on calcule une fois pour toutes la valeur $\frac{H}{n}$ et l'on n'a plus qu'à multiplier cette constante pour la déviation d pour connaître E .

Pour déterminer H , on dispose entre les bornes de l'instrument un ou plusieurs éléments de force électromotrice connue E . On place le magnétomètre à une distance n et on lit la déviation d . La formule (1) donne alors

$$H = e \frac{n}{d} \text{ unités C.G.S.}$$

Cette détermination de H est d'autant plus nécessaire que sa valeur est très variable avec les circonstances locales. Le champ terrestre directeur peut être utilisé jusqu'à 100 volts.

Pour mesurer des forces électromotrices supérieures à 100 volts, on augmente la force directrice de l'aiguille en surmontant le magnétomètre d'un barreau aimanté en forme de demi-cercle dont on a déterminé à l'avance l'intensité de champ à son centre, point qui correspond à la position des aiguilles aimantées lorsque l'aimant directeur est en place. L'intensité du champ magnétique produit au centre de ces aimants demi-circulaires varie en général entre 8 et 10 unités C.G.S. Cette valeur, *au moment de l'étalonnage*, est peinte sur l'aimant lui-même, mais il ne faut pas perdre de vue que ces aimants su-

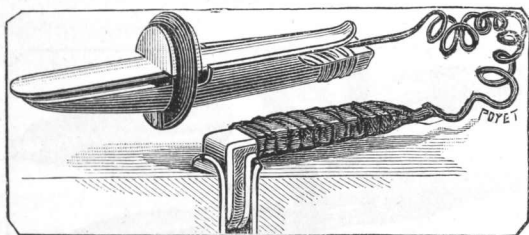


Fig. 93. — Prise de contact et pinces de sir W. Thomson.

bissent avec le temps un affaiblissement graduel dont il faut tenir compte.

L'appareil est mis en communication avec les différents points dont on veut mesurer des différences de potentiel à l'aide d'un fil souple double dont la figure 93 représente les dispositions des extrémités. On voit dans le bas de la figure une sorte d'équerre terminée par deux lames de cuivre en communication électrique avec les deux fils et séparées par une pièce isolante en ivoire. En enfonçant cette équerre dans le socle de l'appareil, dans une ouverture ménagée à son extrémité, on relie les deux bouts du fil de la bobine avec les deux fils souples dont les deux autres extrémités sont terminées par deux pinces (une seule est représentée figure 93).

Cette pince rappelle assez bien les pinces en bois connues sous le nom d'*épingles de blanchisseuse* ; l'une des branches

est formée par une lame de cuivre en communication électrique avec le fil souple, l'autre par un petit cylindre de bois taillé en sifflet; un anneau en caoutchouc formant ressort tend à rapprocher les deux branches qu'on écarte en exerçant une pression à l'autre extrémité; en pinçant alors le fil, la barre, etc., lorsqu'on abandonne la pince à elle-même, l'élasticité du caoutchouc suffit pour maintenir et assurer un bon contact.

Lorsque les pinces sont placées aux deux points voulus, il suffit d'appuyer sur le bouton qu'on voit près de la bobine, sur la gauche de la figure 92, pour envoyer le courant dans la bobine et faire ainsi une mesure qui ne prend que quelques secondes.

212. Ampèremètre de sir W. Thomson (1883). — Cet appareil ne diffère du premier que par la bobine et par son mode d'intercalation dans le circuit.

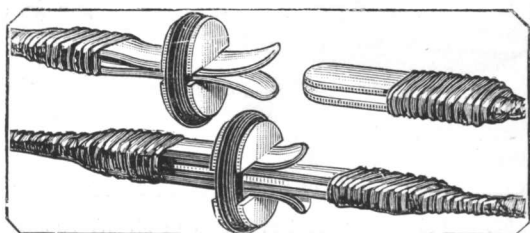


Fig. 94. — Appareil d'intercalation de sir W. Thomson.

La bobine destinée à mesurer des courants qui varient entre 0,1 et 100 ampères se compose d'une lame de cuivre de 1,2 cm de large et de 1,5 mm d'épaisseur; elle a environ 10 cm de diamètre extérieur et se compose seulement de six tours séparés l'un de l'autre par du papier d'amiante; aussi sa résistance est-elle négligeable. Pour les courants de 1000 ampères, on emploie un simple anneau de cuivre très épais. L'appareil destiné à mesurer plusieurs circuits distincts s'intercale dans chacun d'eux à l'aide d'une disposition très ingénieuse représentée en détail figure 94. Dans la partie du conducteur où doit s'intercaler le galvanomètre, ce conducteur est coupé et relié à deux lames de cuivre qu'une forte bague de caoutchouc maintient toujours en contact pour ne pas interrompre la continuité du circuit. Le galvanomètre est lui-même relié à deux

filis souples formés d'une grosse tresse de fil de cuivre, et terminés par deux lames de cuivre séparées par une lame isolante. Il suffit d'approcher l'une de l'autre les deux pièces et de faire pénétrer la seconde dans la première pour introduire le galvanomètre dans le circuit sans rompre ce circuit. La figure 94 montre les deux positions du système, *avant* et *après* l'introduction du galvanomètre. La forme des lames est telle que lorsqu'on retire l'appareil pour l'employer sur un autre point ou sur un autre circuit, le circuit général se trouve fermé de nouveau avant que le galvanomètre ne soit complètement retiré de ce circuit.

Le mode de graduation est analogue à celui adopté pour le voltmètre. Lorsque le magnétomètre placé dans un champ magnétique égal à 1 unité C. G. S d'intensité est sur le point 1 de l'échelle divisée, l'aiguille dévie de 1 division pour un courant de 1 ampère. La formule est alors :

$$I = H \frac{d}{n} \text{ ampères,}$$

formule dans laquelle H , d et n ont les mêmes significations que pour le voltmètre ; I est l'intensité en ampères du courant à mesurer.

213. Galvanomètre de torsion de MM. Siemens et Halske (1880).

— Cet appareil, très employé en Allemagne, est constitué par un aimant en forme de cloche (fig. 95)

suspendu à un ressort à boudin et placé entre deux bobines

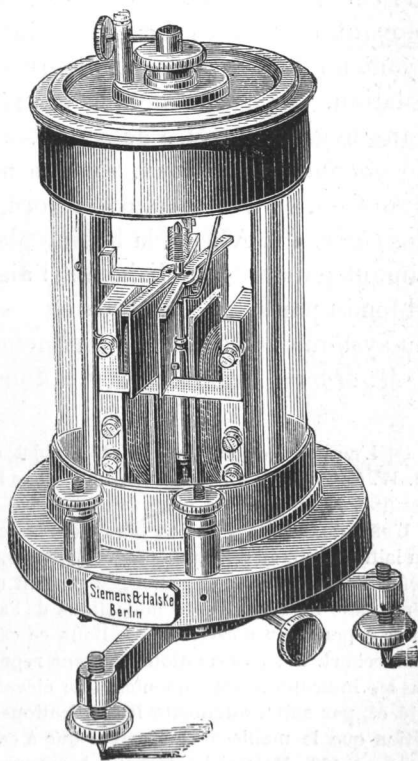


Fig. 95. — Galvanomètre de torsion de MM. Siemens et Halske.

traversées par le courant à mesurer. L'aimant est ramené à sa position primitive par la torsion du ressort ⁽¹⁾. L'angle de torsion est proportionnel à l'intensité du courant qui traverse le fil des bobines. L'aimant a la forme d'un dé à coudre fendu longitudinalement suivant deux génératrices opposées, l'ouverture placée à la partie inférieure. Cette disposition diminue le moment d'inertie et ferme l'aimant, ce qui est avantageux pour la conservation de son intensité d'aimantation, conservation dont dépend l'exactitude de l'appareil. Des ailettes disposées latéralement à l'aiguille servent à amortir ses oscillations.

214. Galvanomètres à indications rapides. — L'apériodicité d'un appareil de mesure ne suffit pas pour rendre ses indications rapides : ce dernier résultat n'est obtenu qu'en employant des forces directrices intenses et des pièces mobiles ayant un faible moment d'inertie par rapport à leur axe de rotation. Ces conditions ont été réunies pour la première fois dans le galvanomètre de *sir W. Thomson* connu sous le nom de *galvanomètre marin*, dont le principe est indiqué dans la figure 96, et très employé à bord des navires faisant la pose des câbles ⁽²⁾. AB est la bobine placée entre les branches d'un aimant puissant NS dirigeant l'aiguille et le miroir fixés à un fil tendu par ses deux bouts et passant par le centre de gravité du système pour annuler l'influence des oscillations du navire.

M. Marcel Deprez (1880) a donné une forme industrielle au

⁽¹⁾ L'emploi des ressorts a été l'objet de certaines objections auxquelles *M. W. Kohlrausch* a répondu en 1886, dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift*, par le résultat de ses propres observations.

L'effet du temps, si l'on en juge d'après des observations faites sur un ressort en laiton pendant sept années consécutives, est complètement négligeable. Une déformation continue et prolongée produit un léger déplacement permanent du zéro, mais n'altère pas les indications de l'appareil si on a soin de faire les lectures à partir du nouveau zéro. Dans ce cas, l'acier est moins affecté que le maillechort. Des déformations souvent répétées, mais intermittentes, n'altèrent pas les indications subséquentes. Une élévation de température réduit l'élasticité et, par suite, augmente les indications. L'acier est moins sensible à cette action que le maillechort. L'erreur due à ces différentes causes ne dépasse pas 0,5 pour 100. Mais si le courant à mesurer traverse le ressort, et l'échauffe sensiblement, l'erreur peut être beaucoup plus grande, surtout si l'action est continue; elle a atteint 1,4 pour 100 dans un galvanomètre de torsion Siemens après 30 minutes de service continu sur une différence de potentiel de 100 volts.

⁽²⁾ *Systèmes télégraphiques*, par Ch. Bontemps, 1876, p. 234.

galvanomètre de Thomson en remplaçant l'aiguille unique par une série de petites aiguilles aimantées formant *arête de poisson* — ce qui a donné le nom à l'appareil (fig. 97) — placée

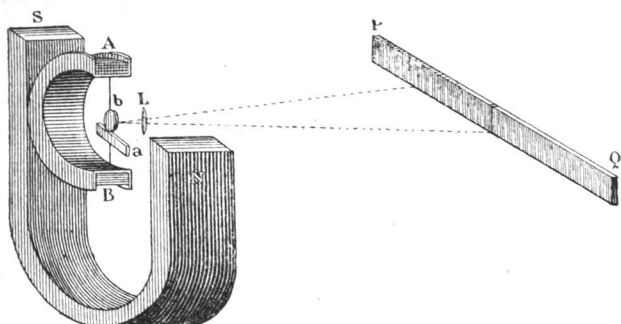


Fig. 96. — Principe du galvanomètre à indications rapides de sir W. Thomson.

entre les branches d'un aimant en U. Ces aiguilles sont montées sur pivot et fortement dirigées dans le plan de l'aimant.

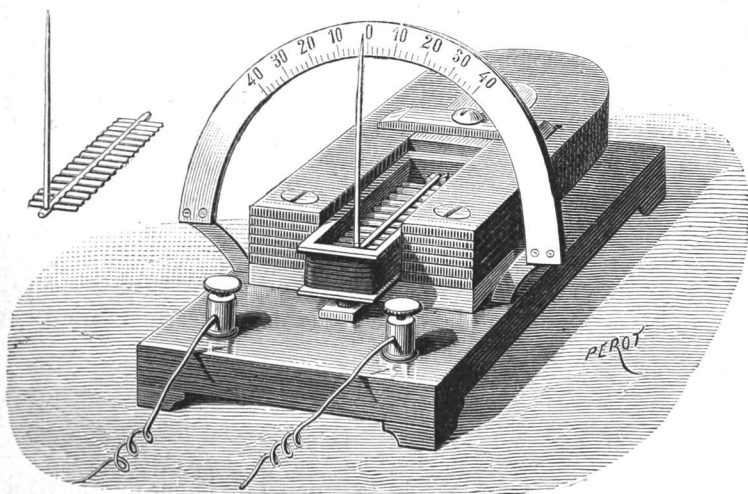


Fig. 97. — Première forme de galvanomètre industriel de M. Marcel Deprez. Type dit à *arête de poisson*.

Le courant traverse un petit cadre rectangulaire placé entre l'aiguille et l'aimant. L'aiguille entraîne un index en paille ou en aluminium se déplaçant sur un cadran gradué. Pour une

déviations de 25° à 30° de chaque côté de la position d'équilibre, les indications de l'appareil sont sensiblement proportionnelles aux intensités du courant qui traverse le cadre fixe. L'enroulement de ce cadre dépend de l'intensité des courants à mesurer; l'appareil enroulé de fil fin se transforme facilement en voltmètre. Dans les modèles industriels plus récents, l'arête de poisson a disparu et est remplacée par une lame de fer doux dont la section transversale est un losange allongé.

Pour étendre le champ des indications, on incline la bobine d'un angle de 15° à 20° , ce qui permet d'obtenir des déviations sensiblement proportionnelles jusqu'à 60° , mais d'un seul côté seulement. Nous reviendrons à ces dispositions à propos des indicateurs de courant, en parlant des applications de l'électromagnétisme.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES GALVANOMÈTRES.

Quelles que soient les dispositions des galvanomètres, ils présentent des caractères communs que nous devons signaler avant de terminer l'étude des appareils destinés à la mesure des intensités des courants par leurs actions galvaniques.

215. Sensibilité absolue et sensibilité relative ⁽¹⁾. — La grandeur d'une quantité physique, une intensité de courant I , par exemple, est liée à une observation par une certaine fonction.

$$I = f(x).$$

La *sensibilité absolue* S_a d'un appareil de mesure est le rapport de l'accroissement dx de la variable à l'accroissement correspondant dI de la grandeur.

$$S_a = \frac{dx}{dI} = \frac{1}{f'(x)}.$$

La *sensibilité relative* S_r est le rapport de l'accroissement dx de la variable à la variation relative $\frac{dI}{I}$ de la grandeur.

$$S_r = I \frac{dx}{dI} = \frac{f(x)}{f'(x)}.$$

(1) Mascart et Joubert, t. II, p. 229.

Ces deux sensibilités ne présentent en général leur maximum ni pour les mêmes valeurs de x , ni pour les mêmes valeurs de la grandeur elle-même.

Dans le galvanomètre des tangentes, par exemple, S_a est maximum pour de très faibles déviations et la sensibilité relative S_r pour la déviation de 45° .

Suivant les applications en vue, on doit chercher à placer le galvanomètre dans les conditions qui correspondent à sa sensibilité absolue maxima ou à sa sensibilité relative maxima.

16. Mesure de la résistance d'un galvanomètre.

— La méthode plus simple est le pont de Wheatstone, en considérant le galvanomètre comme une résistance ordinaire. Lorsqu'on n'a pas d'autre galvanomètre à sa disposition que celui à mesurer, on peut appliquer l'une des méthodes suivantes, dont les démonstrations constituent des applications très simples des lois des courants.

Méthode de la demi-déviatiou. — Cette méthode s'emploie avec une pile de faible résistance et constante. On monte en circuit une boîte de résistance, la pile et le galvanomètre de résistance G . On introduit dans le circuit une résistance R , et l'on augmente cette résistance jusqu'à une valeur R_1 telle que l'intensité du courant devienne moitié moindre. On a alors :

$$G = R_1 - 2R.$$

La méthode exige l'emploi d'un galvanomètre gradué.

Méthode de l'égalé déviation. — Cette méthode s'applique avec une pile de faible résistance sans polarisation et un galvanomètre non gradué : on établit en circuit le galvanomètre G , la pile E , le shunt S et une boîte de résistance R , comme le montre la figure 98. Une résistance R donne une certaine déviation de G . On retire le shunt, et l'on augmente la résistance R jusqu'à une valeur R_1 telle que la déviation soit la même que dans le premier cas. On a alors :

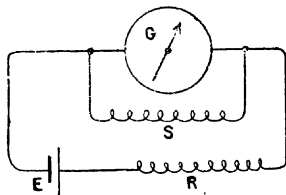


Fig. 98.

$$G = S \left(\frac{R_1 - R}{R} \right).$$

Méthode de sir W. Thomson. — Indépendante de la résistance intérieure de la pile. On établit le montage de la figure 99 et on donne à la résistance R une valeur telle que la déviation

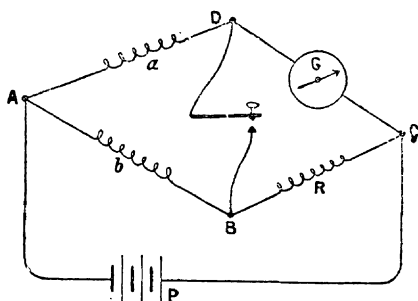


Fig. 99.

du galvanomètre ne change pas en fermant la clef de courtcircuit établie entre B et D. On a alors :

$$G = R \frac{a}{b}.$$

217. Réducteurs. —

On a souvent à mesurer des intensités de courant

et des différences de potentiel dont les valeurs dépassent les limites de graduation des appareils dont on dispose. Il faut alors employer des artifices qui permettent de réduire les indications dans un rapport donné et connu.

On peut réduire les indications d'un *ampèremètre* :

1° Par un *shunt*. Cette disposition demande que les résistances des shunts soient bien établies invariables, et que les résistances de contact ne viennent pas modifier les rapports ;

2° Par le déplacement du champ directeur ;

3° Par l'éloignement relatif du circuit et de l'aiguille ;

4° Par l'emploi de bobines mobiles ou cercles inclinants ;

5° Par une combinaison des procédés indiqués ci-dessus.

Pour réduire les indications d'un *voltmètre*, le moyen le plus simple et le plus pratique consiste à intercaler dans son circuit une résistance égale à n fois sa propre résistance. La

sensibilité se trouve alors réduite dans le rapport $\frac{1}{n+1}$.

218. Graduation d'un galvanomètre. — Opération qui consiste à tracer une graduation proportionnelle aux intensités du courant qui traverse le galvanomètre. Avec les galvanomètres des tangentes ou des sinus, cette graduation est inutile. Elle sert seulement pour les appareils dont la loi de déviation est inconnue.

Avec un galvanomètre donné de résistance G, voici com-

ment on opère : on dresse d'abord une table des shunts du galvanomètre $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, etc., et des résistances de compensation correspondantes (189). On forme ensuite un circuit composé du galvanomètre, d'une pile et d'une boîte de résistance. On insère d'abord le shunt $\frac{1}{2}$ et la résistance de compensation correspondante. On ajoute ensuite une résistance suffisante pour amener la déviation à une valeur convenable 1° par exemple. On enlève alors le shunt et la résistance de compensation; le courant qui traverse le galvanomètre se trouve doublé; la déviation obtenue correspond à une intensité *double*. On introduit le shunt $\frac{1}{3}$ et sa résistance de compensation, on réajuste la boîte pour ramener la déviation à la valeur 1 ou 1°. On retire le shunt et sa résistance de compensation; le courant se trouve triplé, la déviation obtenue correspond à une intensité *triple*, et ainsi de suite. On note ces déviations sur le galvanomètre lui-même ou sur une table de réduction. Pour ramener les déviations dans les limites de l'échelle, on peut insérer une résistance dans le circuit, ou shunter le galvanomètre.

219. Étalonnage d'un galvanomètre. — Cette opération, qui consiste à marquer sur une graduation les intensités en ampères correspondant à chaque déviation, s'applique surtout aux appareils industriels. Les méthodes varient à l'infini. L'une d'elles, fondée sur les actions électrolytiques, consiste à faire traverser par un courant donné une cuve électrolytique et le galvanomètre à étalonner pendant un certain temps t (secondes), en maintenant la déviation constante pendant l'expérience. La quantité d'électricité Q (en coulombs) qui a traversé la cuve et le galvanomètre, déduite de l'action chimique, permet de calculer I par la relation :

$$I = \frac{Q}{t} \text{ ampères.}$$

Une autre méthode consiste à introduire dans le circuit du galvanomètre une résistance R fixe et parfaitement connue. On mesure, par une méthode quelconque, la différence de

potentiel entre les deux extrémités de cette résistance, et on en déduit l'intensité par la formule d'Ohm.

Enfin l'*électrodynamomètre absolu* (Voyez ce mot) permet d'étalonner avec précision un galvanomètre industriel quelconque.

220. Constante d'un galvanomètre. — On appelle ainsi, suivant les auteurs :

1° Le facteur par lequel il faut multiplier la lecture pour avoir l'intensité d'un courant en unités C. G. S. ou en ampères ;

2° Le nombre de divisions de l'échelle produite par 1 Daniell sur un circuit comprenant le galvanomètre et dont la résistance totale est de 1 mégohm ;

3° Un facteur qui englobe tous les éléments de construction propres à l'appareil lui-même. Dans un galvanomètre des tangentes dont le champ terrestre sert de champ directeur, la valeur H ne figure pas dans la constante.

Pour éviter toute confusion on doit avoir soin de ne jamais employer le mot *constante* sans le bien définir dans chaque cas.

221. Formule de mérite d'un galvanomètre. — C'est la résistance totale du circuit qui, sur un élément Daniell, produit l'unité de déviation sur l'échelle divisée du galvanomètre.

La formule de mérite est d'autant plus grande que le galvanomètre est plus sensible. On tend aujourd'hui à exprimer la formule de mérite d'un galvanomètre par la résistance qui avec une force électromotrice de 1 volt fait dévier le galvanomètre de 1 division de l'échelle.

Les galvanomètres à cadre mobile Deprez d'Arsonval ont des formules de mérite variant de 1 à 20 mégohms, suivant la grosseur du fil de suspension. Les galvanomètres Thomson astatiques ont 1 000, 2 000 et jusqu'à 10 000 mégohms pour formule de mérite.

222. Applications des galvanomètres. — Les applications des galvanomètres sont si nombreuses qu'il nous est impossible de les signaler ici, d'autant mieux qu'un grand nombre de ces applications se rapportent à des phénomènes dont nous n'avons pas encore parlé. Nous aurons l'occasion d'y revenir souvent au cours de notre étude.

CHAPITRE VI

POTENTIELS. — ÉLECTROMÉTRIE

223. Définitions. — Lorsqu'il existe entre deux points A et B une différence de potentiel, et que cette différence de potentiel est maintenue constante par un artifice quelconque, une source ou générateur électrique, on peut mesurer cette différence de potentiels en mettant à profit le courant qui peut s'établir dans un circuit plus ou moins résistant reliant les deux points, soit les actions *électrostatiques* qui peuvent s'exercer entre des corps portés aux potentiels des points A et B. Les appareils mettant à profit les actions électrostatiques sont des *électromètres*, et l'étude des appareils de ce genre et de leurs applications constitue l'*électrométrie* ⁽¹⁾.

Sir W. Thomson a divisé les électromètres en trois grandes classes, d'après la nature des actions électrostatiques mises en jeu dans l'appareil. Nous suivrons cette classification universellement adoptée aujourd'hui et nous étudierons ces appareils dans l'ordre suivant :

- 1° *Électromètres à répulsion* ;
- 2° *Électromètres symétriques* ;
- 3° *Électromètres à attraction* ou *électromètres-balances*.

I. — ÉLECTROMÈTRES A RÉPULSION.

Le type de l'électromètre à répulsion est l'électroscope à

(1) Le mot *électrométrie* est souvent employé dans un sens plus étendu ; il embrasse l'ensemble des mesures électriques.

feuilles d'or, réservé exclusivement aujourd'hui aux expériences de cours. La loi de déviation des feuilles d'or en fonction du potentiel est complexe et l'appareil ne se prête pas aux mesures, même grossières. Tous les appareils de cette classe sont caractérisés par l'emploi de deux systèmes mobiles l'un par rapport à l'autre et portés au même potentiel. Leur répulsion donne une mesure de leur potentiel.

La balance de *Coulomb*, l'électromètre de *Peltier*, de *Riess*, de *Delmann*, etc., en sont les principales formes aujourd'hui abandonnées ⁽¹⁾ pour des appareils plus simples et plus exacts. Le seul type de cette classe qui offre quelque intérêt, à cause de ses dispositions qui permettent de lui appliquer le calcul, est l'électromètre à répulsion de *M. Lippmann*.

224. Électromètre à répulsion de M. Lippmann (1886). — Cet électromètre est formé essentiellement d'une sphère métallique isolée, que l'on porte au potentiel V à mesurer. Cette sphère se trouve partagée, par construction, en deux hémisphères mobiles l'un par rapport à l'autre, et qui se repoussent avec une force égale à F , lorsque leur système est électrisé. Or on a entre F et V la relation simple

$$F = \frac{1}{8} V^2.$$

Pour connaître V , il suffit donc de mesurer F . Cette mesure pourrait être effectuée par divers procédés.

Si l'appareil destiné à mesurer F était extérieur à la sphère métallique, on serait obligé de le mettre assez loin pour que son voisinage n'exerçât pas d'action perturbatrice sensible sur la distribution électrique. Il est préférable de le mettre tout entier à l'intérieur même de la sphère électrisée, qui est creuse.

L'un des hémisphères est fixe ; l'autre, mobile, est suspendu par un système *trifilaire*, c'est-à-dire composé de trois fils verticaux d'égale longueur. Lorsque la répulsion se produit, l'hémisphère mobile ne peut que se déplacer parallèlement à lui-même, les trois fils de la suspension faisant alors un petit angle α avec leur première position verticale. On mesure α par

(1) Voy. *Électricité statique* de M. Mascart.

la méthode de la réflexion à l'aide d'un miroir collé à deux des fils, et visible à travers une petite ouverture. En appelant f le poids de l'hémisphère mobile, on a

$$F = f \tan \alpha$$

et par conséquent,

$$f \tan \alpha = \frac{1}{8} V^2.$$

Il suffit donc de connaître le poids f , qui est invariable; le rayon de la sphère est indifférent.

Dans une seconde disposition, le système des deux hémisphères est contenu à l'intérieur d'une enveloppe sphérique concentrique en cuivre que l'on met en communication avec la terre. Ce dispositif augmente la sensibilité de l'instrument et le met à l'abri des courants d'air, ainsi que des perturbations électriques extérieures. Il est avantageux de multiplier optiquement la sensibilité de l'instrument en lisant les déviations à l'aide d'un oculaire de microscope grossissant de 15 à 50 fois, par la méthode de M. d'Arsonval (40). On diminue alors dans le même rapport la déformation, d'ailleurs très petite, que subit le système des deux hémisphères par suite de la déviation.

II. — ÉLECTROMÈTRES SYMÉTRIQUES.

Dans les appareils appartenant à cette classe, le champ électrique est produit par deux conducteurs fixes symétriques portés à des potentiels différents : l'action de ce champ s'exerce sur un corps électrisé placé dans le champ, mobile symétriquement autour de sa position moyenne. Le premier appareil de ce genre a été réalisé par *Bohnenberger*.

Sir W. Thomson a considérablement augmenté la sensibilité de l'électromètre symétrique en créant l'*électromètre à quadrants* dont la première forme a été décrite en 1856 dans les mémoires de l'*Academia Pontifica dei Nuovi Lincei*.

225. Principe de l'électromètre à quadrants. — Une aiguille en aluminium, en forme de triangle double évidé, est suspendue par une balance bifilaire à fils de cocon à l'intérieur d'une sorte de boîte formée par quatre quadrants ou

secteurs creux A, B, C, D (fig. 100). Ces derniers sont reliés deux à deux en diagonale à l'aide de fils de cuivre recouverts de soie. Des conducteurs isolés du reste de l'appareil peuvent communiquer aux deux paires de quadrants les potentiels des points auxquels ils sont reliés.

L'aiguille peut être électrisée, de son côté, par l'intermédiaire d'un fil de platine P plongeant dans un

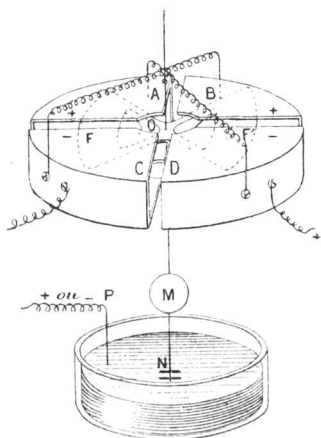


Fig. 100. — Principe de l'électromètre à quadrants.

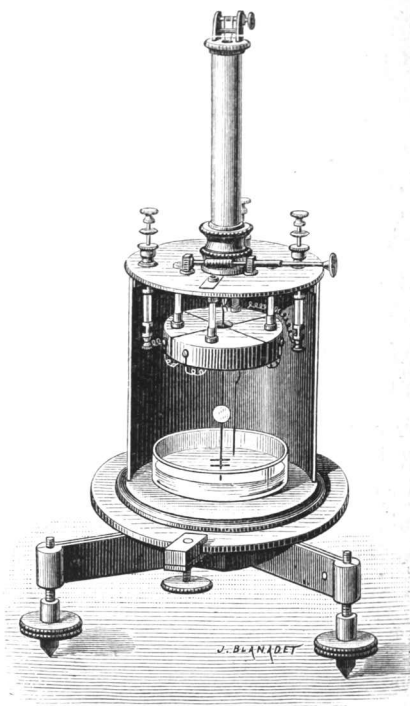


Fig. 101. — Électromètre à quadrants de Sir W. Thomson. Modèle de M. Mascart.

vase de verre rempli d'acide sulfurique concentré. Dans le même vase plonge également une seconde tige de platine ON mettant l'aiguille en communication avec le fil extérieur P, tout en lui conservant une mobilité parfaite.

Lorsque l'aiguille et les quadrants sont au même potentiel, la ligne médiane de l'aiguille doit être en regard de la fente EF et être également couverte par les deux paires de quadrants.

Lorsqu'on communique des potentiels différents aux quadrants et à l'aiguille, l'ensemble forme un condensateur déformable ; le déplacement de l'aiguille tend à rendre la capacité maxima (136). Il se produit donc une déviation dans un sens

ou dans l'autre, et cette déviation est lue à l'aide d'un miroir *M* fixé sur la tige *ON* de l'aiguille et une échelle de réflexion ordinaire. La figure 101 représente l'ensemble de l'électromètre de Thomson sous la forme que lui donne M. Mascart, forme que nous venons de décrire et sous laquelle il est le plus ordinairement employé aujourd'hui.

226. Théorie de l'électromètre à quadrants ⁽¹⁾. — Soient *A* et *B* les potentiels des deux paires de quadrants, *C* le potentiel de l'aiguille. L'ensemble forme un condensateur dont l'une des armatures est mobile. La condition générale d'équilibre est que le travail de déplacement dû à un changement de position de l'armature mobile soit égal à l'accroissement d'énergie du système, le déplacement ayant lieu à potentiel constant (136).

Appelons a_o, b_o, c_o , les charges correspondantes des trois parties de l'appareil lorsque l'aiguille est placée symétriquement par rapport aux quadrants.

Si l'aiguille tourne d'un angle α , la distribution des charges se trouve modifiée, la capacité de l'un des côtés aura augmenté d'une quantité $k\alpha$, k étant une constante de construction, et la capacité de l'autre moitié aura diminué d'une quantité égale.

En appelant $a' b' c'$ les charges nouvelles des conducteurs après le déplacement, on aura :

$$\begin{aligned} c &= c_o + k\alpha(C - B) - k\alpha(C - A) = c_o + k\alpha(A - B) \\ b &= b_o - k\alpha(C - B) \\ a &= a_o + k\alpha(C - A). \end{aligned}$$

La variation d'énergie du système est alors :

$$\begin{aligned} W - W_o &= \frac{1}{2} k\alpha [(A - B)C - (C - B)B + (C - A)A] \\ &= k\alpha \left[C(A - B) - \frac{1}{2}(A^2 - B^2) \right] \\ &= k\alpha(A - B) \left[C - \frac{A + B}{2} \right]. \end{aligned}$$

Cet accroissement d'énergie est précisément égal au travail

⁽¹⁾ MM. MASCART et JOUBERT, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. I, p. 99.

du couple de torsion exercé par la suspension, lequel est également proportionnel, pour de petits déplacements, au sinus de l'angle dans le cas de la suspension bifilaire et rigoureusement proportionnel à l'angle dans le cas de la suspension unifilaire. En appelant W_α ce couple, on a donc pour équation générale d'équilibre du système :

$$W_\alpha = k(A - B) \left[C - \frac{A + B}{2} \right].$$

La déviation est donc une fonction des trois potentiels A, B et C. Le choix de ces potentiels différencie et caractérise les modes d'emploi de l'appareil.

227. Modes d'emploi de l'électromètre à quadrants.

— Les méthodes d'emploi forment deux groupes :

1° *Méthodes hétérostatiques*, dans lesquelles on fait intervenir des potentiels autres que les potentiels à mesurer.

2° *Méthode homostatique* ou *idiostatique*, dans laquelle il n'intervient pas d'autres potentiels que ceux à déterminer.

1° *Méthodes hétérostatiques*. — On en distingue deux principales :

a. Méthode de Sir W. Thomson (C très grand).

b. Méthode de M. Mascart (A = — B).

a. *Méthode de Sir W. Thomson*. — L'aiguille C est en communication avec l'armature intérieure d'une bouteille de Leyde chargée à un potentiel élevé dont l'armature extérieure communique avec la terre.

On vérifie la constance du potentiel de cette aiguille avec une *jauge* (236) ou électromètre à attraction de la troisième classe, et on le ramène à sa valeur fixe s'il tend à augmenter ou, plus généralement, à diminuer, à l'aide d'un *replenisher* ou *rechargeur*, sorte de machine d'induction statique dont nous parlerons plus tard. Quel que soit le potentiel de l'aiguille, il ne doit pas y avoir de déviation si les quatre quadrants sont au même potentiel.

Si C est très grand devant A et B, la formule générale devient :

$$W_\alpha = k(A - B)C.$$

Les couples et, par suite, les déviations sont proportionnels à la différence de potentiel ($A - B$) des deux paires de quadrants.

Le couple mécanique équilibrant le couple électrostatique est en général un bifilaire dont on fait varier l'écartement pour ramener les lectures dans les limites de l'échelle.

La proportionnalité entre les potentiels et les déviations existe jusqu'à 3° environ pour les électromètres à secteurs plats; au delà il faut une table de réduction.

b. Méthode de M. Mascart. — Elle consiste à faire $A = -B$ en chargeant les quadrants à l'aide d'une pile de $2n$ éléments dont le milieu est à la terre. La formule générale devient

$$W_{\alpha} = k(A - B)C.$$

Les couples sont alors proportionnels aux potentiels de l'aiguille C.

L'inégalité des deux moitiés de la pile peut déplacer le zéro. M. Gouy (1888) évite cet inconvénient en reliant les quadrants aux extrémités d'une grande résistance métallique (1 mégohm) reliée à la pile, le milieu de la résistance étant à la terre. Le courant étant très faible, les bobines ne chauffent pas et les différences de potentiels entre les deux extrémités de la résistance et la terre restent exactement égales en valeur absolue.

c. On peut employer une troisième méthode qui consiste à mettre l'un des quadrants à la terre. Dans ce cas, $B = 0$. La formule générale devient :

$$W_{\alpha} = kA \left(C - \frac{A}{2} \right) = kAC \left(1 - \frac{A}{2C} \right).$$

La différence de potentiel à mesurer est établie entre A et C.

La formule montre alors que le couple est plus grand pour une valeur négative de A que pour une valeur positive. L'électromètre est dissymétrique. Les dispositions qui rendent l'appareil symétrique doivent être employées de préférence.

2° *Méthode idiostatique* ou *homostatique*. — Elle consiste à relier l'aiguille à une des paires de quadrants. On fait ainsi $C = A$ ou $C = B$ et la formule générale devient :

$$W_{\alpha} = K(A - B)^2.$$

Les couples et, par suite, les déviations sont alors proportionnels aux *carrés* des différences de potentiel.

Étalonnage de l'électromètre. — Si l'on établit n éléments de force électromotrice E entre les deux paires de quadrants, et qu'ils produisent une déviation, on aura évidemment :

$$\delta = kn^2E^2; \quad k = \frac{\delta}{n^2E^2}$$

k étant ainsi déterminé par cette expérience, on aura pour une autre expérience donnant une déviation α :

$$\alpha = k(A - B)^2; \quad A - B = \sqrt{\frac{\alpha}{k}} = \sqrt{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\alpha}$$

et en posant

$$\sqrt{\frac{n^2E^2}{\delta}} = a$$

on a

$$(A - B) = a\sqrt{\alpha}.$$

Lorsque le métal des quadrants n'est pas le même que celui de l'aiguille, les forces électromotrices de contact introduisent des erreurs dont on peut s'affranchir, comme nous l'indiquerons dans le paragraphe suivant.

228. Causes d'erreur dans l'emploi de l'électromètre à quadrants. — La formule générale de l'électromètre à quadrants (226) se trouve entièrement en défaut dans le cas où la charge est symétrique (méthode homostatique de M. Mascart) et les quadrants portés à des potentiels assez élevés. Cette observation, due à M. Gouy ⁽¹⁾, l'a amené à démontrer l'existence d'un *couple directeur électrique*, qui tend à ramener l'aiguille au zéro, couple proportionnel à l'angle d'écart et indépendant du mode de suspension. Ce couple directeur électrique est proportionnel au carré du nombre d'éléments de la pile de charge, et exerce surtout une influence sensible lorsque l'appareil est réglé pour avoir une grande sensibilité. La formule générale n'est exacte que lorsque le couple directeur électrique est négligeable devant celui de la suspension.

(¹) *Journal de physique*, mars 1888.

MM. *Mascart* et *Joubert* ont fait remarquer ⁽¹⁾ que si on met alternativement les deux quadrants d'un électromètre en communication avec deux points présentant une différence constante de potentiel, la déviation ne restera constante que si le métal des quadrants est le même que celui de l'aiguille, la force électromotrice de contact ne changeant pas de signe en même temps que la différence de potentiel des quadrants.

MM. *Ledeboer* et *Maneuvrier* (1887) ont calculé tous les effets de cette force électromotrice parasite et montré comment on pouvait éliminer l'influence de la dissymétrie. Partons de la formule générale

$$\delta = kV^2$$

et introduisons la différence de potentiels parasite v dans la formule, il vient :

$$\delta = kV(V + 2v),$$

V étant le potentiel du pôle positif de la pile de charge. Si donc on change de pôle, V se changera en $(-V)$, et l'équation deviendra

$$\delta' = kV(V - 2v).$$

Enfin, si l'on forme la différence $\delta - \delta'$ et la somme $\frac{\delta + \delta'}{2}$ et qu'on en prenne le rapport, il vient

$$\frac{\delta - \delta'}{\frac{\delta + \delta'}{2}} = 4 \frac{v}{V}.$$

Ces trois équations expliquent le phénomène précédent avec toutes ses circonstances. On voit de plus que l'on a

$$\frac{\delta + \delta'}{2} = kV^2$$

et que, par suite, en faisant deux mesures alternativement avec les deux pôles et en prenant la demi-somme des déviations, on obtiendra directement la constante k , comme si le phénomène de dissymétrie n'existait pas. Cette dissymétrie

(1) *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. II, p. 209.

n'interviendra pas dans l'application de la méthode homostatique aux courants alternatifs.

229. Électromètre apériodique de M. J. Carpentier (1887). — Le principal inconvénient des électromètres symétriques est leur manque d'apériodicité. M. P. Curie a le premier réalisé un électromètre apériodique en constituant les quadrants par des aimants fixes produisant un champ intense dans lequel l'aiguille se déplace et s'amortit. Mais la disposition de M. Curie ne convient qu'aux électromètres sensibles ;

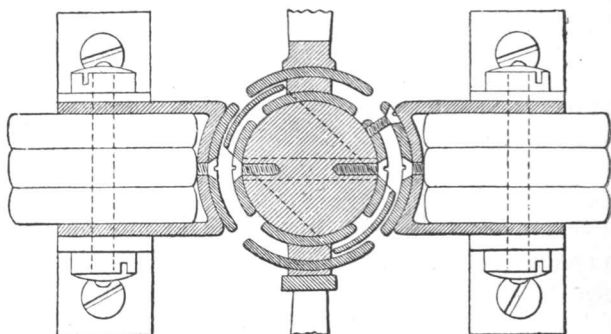


Fig. 102. — Principe de l'électromètre apériodique de M. J. Carpentier.

l'appareil combiné par M. J. Carpentier est plus spécialement destiné aux applications industrielles, et se distingue par des qualités d'apériodicité exceptionnelles, qui rendent les lectures promptes et sûres.

La pièce principale de l'électromètre (fig. 102), l'armature mobile, est un cadre rectangulaire allongé, formé d'une lame métallique, large de 1 centimètre environ, qui a été repliée sur elle-même et dont les extrémités ont été raboutées. Les grands côtés du cadre ont reçu, en outre, une courbure transversale et peuvent être considérés comme deux portions d'un cylindre dont l'axe coïncide avec l'axe longitudinal du cadre.

Le cadre est suspendu de manière à être mobile autour de son axe, entre deux autres cylindres fixes concentriques. Chacun de ces deux cylindres est divisé, suivant deux plans rectangulaires passant par l'axe commun, en quatre portions égales, constituant à l'électromètre huit armatures fixes, entre

lesquelles tourne le cadre ou armature mobile. Le montage des armatures fixes est tel que quatre armatures, comprises dans deux dièdres droits opposés par le sommet, communiquent électriquement entre elles et sont isolées des quatre autres.

Dans l'un des modèles (fig. 103) le cadre a son axe vertical ;

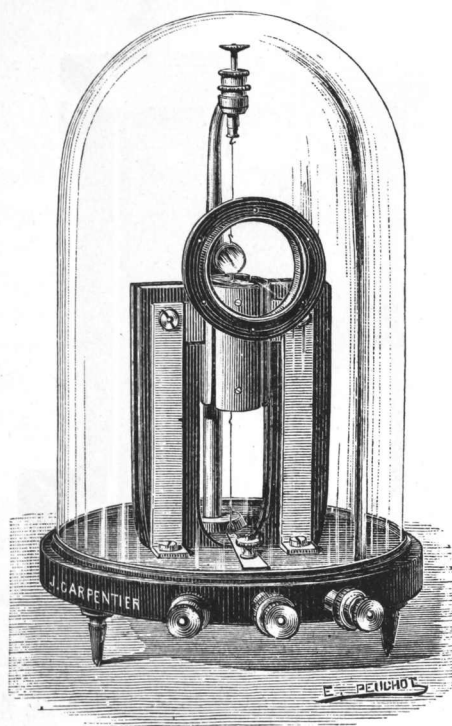


Fig. 103. — Électromètre aperiodique de M. Carpentier. Modèle vertical à lecture au miroir.

il est suspendu à l'aide de fils métalliques très fins. L'équilibre de torsion des fils maintient le cadre, quand aucune action électrique ne s'exerce, dans une position qui correspond au zéro de la graduation. Dans cette position, le cadre est à peu près symétriquement placé par rapport aux plans de séparation des armatures fixes (fig. 102).

Grâce au petit diamètre des armatures fixes extérieures,

l'électromètre a pu être introduit entre les **jambes d'un aimant permanent ordinaire en fer à cheval**, c'est-à-dire dans un champ magnétique assez intense ; de plus, les **armatures fixes intérieures** ont été faites en fer, pour accroître encore l'intensité du champ magnétique dans l'intervalle où se meut l'ar-

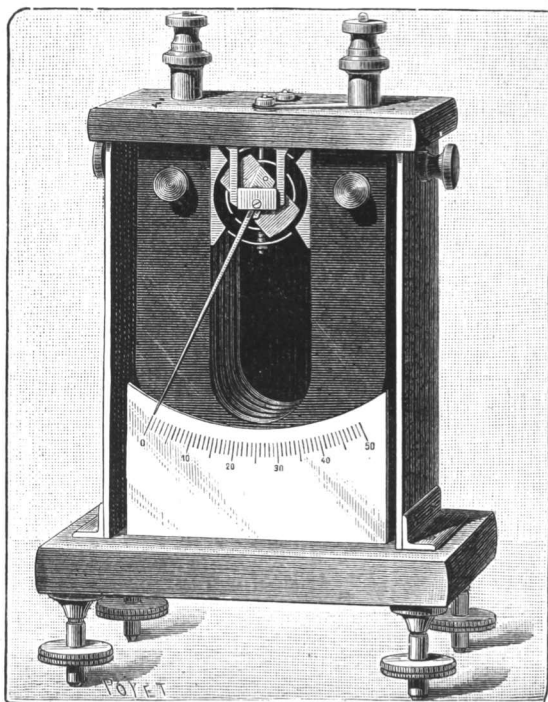


Fig. 104. — Électromètre aperiodique de M. J. Carpentier. Modèle industriel à lecture directe.

mature mobile. Ces dispositions, jointes à la forme donnée à cette armature, concourent à faire naître dans les deux branches du cadre des forces électromotrices d'induction énergiques, qui produisent un amortissement très rapide. En fait, cet électromètre est d'une aperiodicité remarquable, et quand il fonctionne, on est frappé de l'allure particulière avec laquelle l'index s'avance vers le point qu'il doit atteindre, et qu'il ne dépasse pas.

Dans le modèle industriel (fig. 104) l'équipage mobile est

monté sur un axe horizontal et porte une aiguille légère en aluminium se déplaçant devant une graduation tracée expérimentalement. Le couple électrique est équilibré dans chaque position par celui d'un poids suspendu à l'équipage mobile.

230. Électromètre astatique de MM. Curie et Blondlot (1888) (1). — Cet instrument est une transformation de l'électromètre à quadrants de Sir W. Thomson. L'aiguille (fig. 105), au lieu d'être en forme de 8, est constituée par deux demi-cercles A_1 et A_2 soutenus par une petite pièce d'ébonite; ces deux demi-cercles, solidaires dans leurs mouvements, sont indépendants au point de vue électrique. Les secteurs sont remplacés par des plateaux fixes P_1 et P_2 ayant également la forme de demi-cercles.

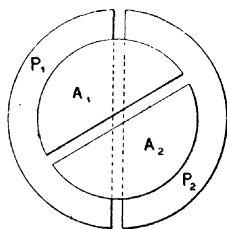


Fig. 105.

En désignant par V_1, V_2, V_3, V_4 les potentiels respectifs de A_1, A_2, P_1, P_2 , par α l'angle de déviation de l'aiguille sous l'action des forces électriques équilibrées par la torsion du fil de suspension, on a

$$\alpha = k(V_1 - V_2)(V_3 - V_4),$$

à la seule condition que l'angle des deux fentes diamétrales ne soit pas très petit. k est une constante caractéristique égale à deux fois le quotient de la capacité de l'aiguille pour l'unité d'angle par le couple de torsion du fil de suspension pour l'unité d'angle.

L'avantage de cet instrument réside, non dans la substitution de demi-cercles aux secteurs de l'électromètre à quadrants, mais dans le fait que l'aiguille mobile est formée d'un système de deux conducteurs à des potentiels distincts, en tous points semblable au système des conducteurs fixes : l'appareil est ainsi rendu plus symétrique, et cette symétrie se retrouve dans la formule qui donne les déviations de l'instrument.

Le couple directeur électrique signalé par M. Gouy dans l'électromètre ordinaire (228) n'existe pas dans cet instrument.

L'aiguille, très légère, est découpée dans une feuille d'aluminium de 0,025 millimètre d'épaisseur qui reçoit une rigi-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 26 novembre 1888.

dité assez forte d'un gaufrage préalable, donnant une surface ondulée analogue à celle des tambours des baromètres anéroïdes. Les plateaux fixes étant en acier aimanté amortissent les mouvements de l'aiguille. L'appareil peut être employé par les méthodes homostatique et hétérostatiques, comme électromètre différentiel et enfin comme wattmètre (voyez ce mot).

Dans ce cas, il mesure exactement la puissance moyenne absorbée par un appareil alimenté par des courants de forme quelconque.

231. Voltmètre électrostatique industriel de Sir W. Thomson (1886). — La mesure industrielle des différences de potentiel élevées exige un appareil à lecture directe, prenant rapidement sa position d'équilibre, facile à équiper et à employer dans un atelier quelconque.

C'est dans ce but que Sir W. Thomson a combiné l'appareil représenté figure 106, établi pour la mesure directe de potentiels variant entre 400 et 10 000 volts. Par ses dispositions, cet appareil est intermédiaire entre les électromètres symétriques proprement dits et les électromètres à attraction que nous allons décrire un peu plus loin, car il ne comporte qu'une seule paire de quadrants avec aiguille mobile en aluminium suspendue à l'intérieur et tournant autour d'un axe horizontal. La paire de quadrants fixe est reliée à l'un des points et l'aiguille à l'autre point, entre lesquels on veut déterminer la différence de potentiel.

L'ensemble constitue donc un condensateur à capacité variable dans lequel le couple dû aux actions électrostatiques est équilibré par le moment d'un poids suspendu à l'extrémité inférieure de l'aiguille, moment proportionnel au sinus de l'angle de déviation. L'extrémité supérieure de l'aiguille porte une pointe servant d'index qui se déplace devant une graduation tracée expérimentalement.

Trois poids différents suspendus à l'aiguille modifient la sensibilité absolue (**215**) de l'instrument dont les déviations correspondent alors respectivement à 50, 100 ou 200 volts par division de la graduation.

Les oscillations de l'aiguille sont amorties à l'aide d'une sorte de petit trapèze qui vient s'appliquer contre l'aiguille et l'arrête

en place en manœuvrant au moment opportun une petite manette placée sur la droite de l'appareil. Enfin, pour éviter un court-circuit accidentel qui mettrait l'appareil hors de service en volatilisant instantanément l'aiguille lorsque la différence de potentiel à mesurer est élevée et fournie par une machine, la communication entre les quadrants, l'aiguille et les points entre

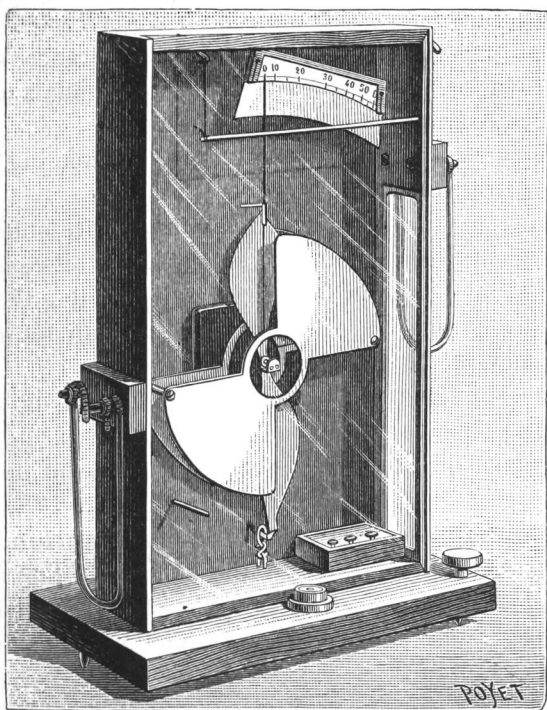


Fig. 106. — Électromètre industriel de sir W. Thomson.

lesquels on veut effectuer la mesure ne s'établit que par l'intermédiaire de tubes en verre en forme d'U dans lesquels est un fil de coton humide présentant une très grande résistance. Dans ces conditions, même si l'aiguille vient toucher les quadrants, la résistance ainsi intercalée ne permet pas au courant qui s'établit de prendre une intensité dangereuse pour la conservation de l'appareil.

L'électromètre industriel s'applique aussi bien aux courants

continus qu'aux courants périodiques, comme nous l'établirons dans le chapitre suivant, en précisant exactement, dans chaque cas, la quantité physique qu'il mesure.

III. — ÉLECTROMÈTRES A ATTRACTION.

232. Définitions. — Les appareils appartenant à cette classe sont quelquefois désignés sous le nom d'*électromètres absolus* parce qu'ils permettent de déterminer les différences de potentiel en unités électrostatiques lorsque l'on connaît les dimensions de l'appareil et les forces exercées.

Le premier électromètre à attraction a été imaginé et réalisé par *Snow Harris* en 1834.

Le premier modèle de *Sir W. Thomson* fut présenté par l'auteur à l'Association Britannique en 1855. Il était constitué par un disque et un plan. La formule n'était exacte qu'à la condition que la distance entre le disque et le plan fût infiniment petite par rapport au diamètre du disque.

C'est en 1860, que *Sir W. Thomson* imagina de ne rendre mobile qu'une partie du disque et inventa l'*anneau de garde* qui a pour effet de répartir la charge d'une façon uniforme et permet d'appliquer la théorie en toute rigueur.

233. Théorie de l'électromètre à attraction. — Deux disques parallèles plans placés à une distance d l'un de l'autre possèdent des charges électriques égales et de signes contraires. En considérant une surface S pour laquelle la densité est uniforme, on a (127)

$$C = \frac{S}{4\pi d}.$$

On en déduit, en appelant V la différence de potentiel des deux disques

$$Q = VC; \quad \sigma = \frac{Q}{S} = \frac{V}{4\pi d}.$$

Nous avons vu (109) que la force normale f_n exercée par un plan indéfini chargé sur une quantité q a pour valeur

$$f_n = 2\pi\sigma q.$$

En appelant Q la charge du disque mobile de surface S , la force totale F sera donnée par les relations :

$$Q = S\sigma; \quad \sigma = \frac{V}{4\pi d}; \quad F = 2\pi S\sigma^2 = \frac{SV^2}{8\pi d^2}.$$

d'où

$$V = d\sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

En exprimant d en centimètres, S en centimètres carrés, on a V en unités électrostatiques C.G.S. de potentiel.

Sir W. Thomson a établi par expérience qu'on obtient une très grande approximation en donnant au disque mobile un diamètre égal au maximum aux trois quarts du diamètre du plateau fixe et à la distance d le cinquième du diamètre total de l'anneau de garde.

Si le disque a un rayon R et l'anneau de garde un rayon intérieur R_1 , on prend pour valeur de S la surface moyenne

$$S = \pi \left(\frac{R^2 + R_1^2}{2} \right)$$

ce qui donne

$$V = 4d\sqrt{\frac{F}{R^2 + R_1^2}}.$$

Pour exprimer en volts la différence de potentiel déterminée en unités électrostatiques C.G.S., il suffit de savoir, comme nous l'établirons un peu plus loin (289), que

1 unité électrostatique C.G.S. de différence de potentiel = 300 volts.

Nous allons examiner quelques-unes des formes pratiques données à l'électromètre à attraction par Sir W. Thomson.

234. Électromètre à attraction de Sir W. Thomson.

— Le principe de tous les électromètres absolus de Sir W. Thomson consiste à ne rendre mobile que la partie centrale de l'un des plateaux. L'appareil se compose toujours de deux disques minces A et C (fig. 107) isolés. Le disque inférieur A est monté sur une vis micrométrique permettant de l'approcher et de l'éloigner à volonté du disque C suspendu au centre de l'anneau de garde B avec lequel il communique électriquement.

Pour déterminer la force exercée entre le disque A et le disque C, celui-ci est suspendu à un levier L, équilibré par un contre-poids Q tournant autour d'un fil métallique tendu sur deux supports conducteurs reliés au plateau de garde. Le le-

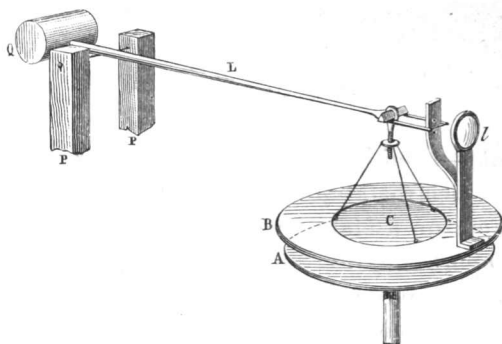


Fig. 107. — Principe de l'électromètre à attraction.

vier L se termine par une fourchette portant un cheveu tendu horizontalement. Cette fourchette laisse passer une tige fixe portant deux points de repère que l'on observe avec une loupe l .

Le cheveu doit être exactement entre les deux points lorsque le disque C et l'anneau de garde sont dans un même plan. On tare l'appareil en plaçant une masse connue M sur le plateau C, et en équilibrant le système à l'aide d'un cavalier posé sur le levier L, les deux plateaux communiquant électriquement entre eux. On enlève alors le poids F, on établit une différence de potentiel entre les deux plateaux, et l'on fait varier leur distance jusqu'à ce que le cheveu revienne se placer entre les deux repères. La force F exercée entre les deux plateaux est alors égale à celle exercée par la pesanteur sur la masse M, c'est-à-dire égale à Mg dynes. Cette valeur de F est déterminée à l'avance une fois pour toutes pour chaque appareil.

235. Modes d'emploi de l'électromètre à attraction. — On peut appliquer, à volonté, la méthode idiostatique ou la méthode hétérostatique (227).

a. Méthode idiostatique. — On établit une communication entre les deux disques A et C et les deux points V_1 et V_2 dont on veut mesurer la différence de potentiel. Lorsque le disque C est dans le plan de l'anneau de garde, on a

$$V_1 - V_2 = d \sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

b. Méthode hétérostatique. — Il est difficile de mesurer d avec exactitude, tandis qu'on peut déterminer, grâce à la vis micrométrique, la *différence* des deux distances avec une grande précision. On emploie alors la méthode hétérostatique. Le disque est chargé à un potentiel élevé et constant (bouteille de Leyle, jauge et replenisher). Le plateau est relié successivement à la terre et au potentiel à mesurer. Soit V le potentiel du disque, V_1 et V_2 les potentiels de la terre et du point considéré dans les deux expériences, d_1 , d_2 les distances d'équilibre correspondantes :

La première expérience donne :

$$V_1 - V = d_1 \sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

La seconde expérience donne :

$$V_2 - V = d_2 \sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

En retranchant :

$$V_1 - V_2 = (d_1 - d_2) \sqrt{\frac{8\pi F}{S}}.$$

La mesure se réduit à une différence de lectures sur la vis micrométrique.

236. Électromètre absolu de Sir W. Thomson. — Dans cet appareil destiné aux mesures précises, le disque mobile est suspendu à des ressorts en acier étalonnés une fois pour toutes à l'aide de poids. Ces ressorts sont enfermés dans une boîte métallique D (fig. 108), en communication électrique avec l'anneau de garde B.

Jauge. — La jauge permet de reconnaître le moment où le potentiel du plateau A atteint une valeur déterminée. Elle se compose d'une plaque mobile p (fig. 109) et d'un anneau de garde G, avec son plateau inférieur qui l'attire, le tout enfermé dans la boîte J (fig. 108). La plaque p tourne autour d'un fil de platine f fixé à ses extrémités et exerçant une torsion qui équilibre précisément l'attraction de la plaque p lorsque le potentiel

de charge est atteint. Pour vérifier cet équilibre, la plaque d'a-

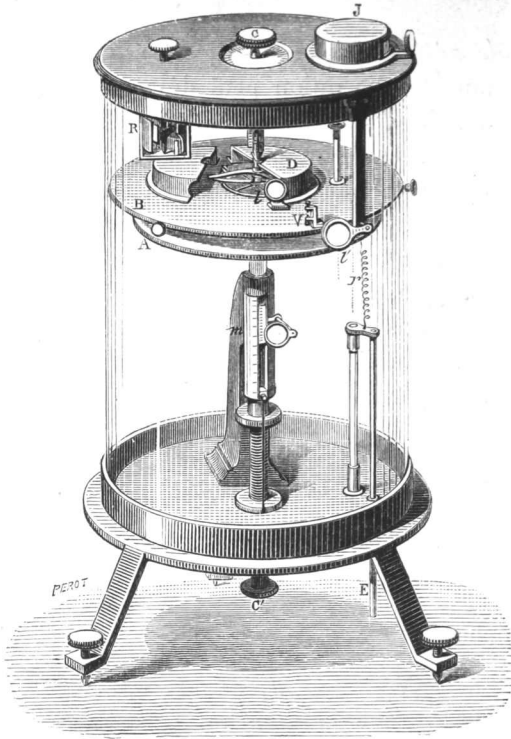


Fig. 108. — Électromètre à ressorts de sir W. Thomson.

luminium p se termine par une queue h supportant le fil de mire qui doit se projeter exactement entre deux points noirs tracés sur du papier blanc, observés à l'aide d'une loupe l .

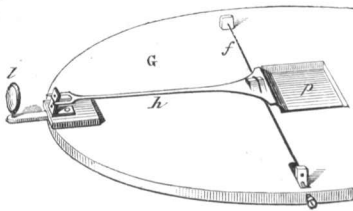


Fig. 109. — Jauge.

Électromètre portatif. — Dans cet appareil (fig. 110), dont la graduation est empirique, la jauge p est placée au fond d'un vase de verre cylindrique et communique avec une garniture d'étain qui couvre une partie

de la surface intérieure. La seconde armature est formée par des feuilles d'étain collées à l'extérieur du vase. Le plateau

attractif A est commandé par la vis C, et l'air desséché à l'intérieur par de la pierre ponce imbibée d'acide sulfurique P et suspendue dans une coupe annulaire. L'appareil ne peut servir qu'à *comparer* des différences de potentiel en mesurant les distances du plateau A qui ramènent la jauge *p* au zéro. La sensibilité dépend du potentiel de charge.

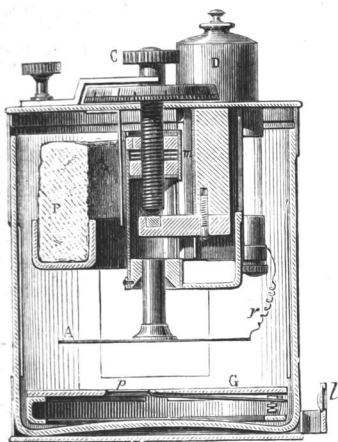


Fig. 110. — Électromètre portable.

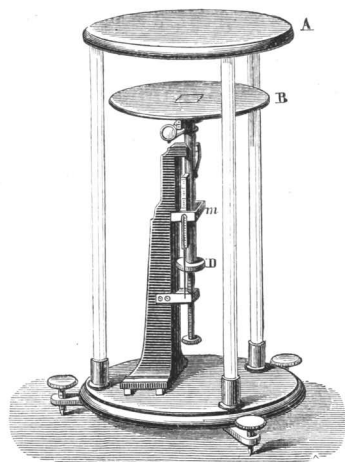


Fig. 111. — Électromètre à grande échelle.

Électromètre à grande échelle. — Cet appareil destiné à la mesure des potentiels très élevés est formé (fig. 111) d'un plateau attractif A isolé, d'un plateau de garde B et d'une jauge qui est abattue lorsque A et B sont au même potentiel. On établit une différence de potentiel entre les plateaux A et B, et on manœuvre la vis D jusqu'à ce que la jauge soit dans sa position normale. Si F est la force verticale nécessaire pour soulever la palette, force déterminée une fois pour toutes, et V le potentiel du plateau A, le plateau B étant au sol, *d* la distance, on a :

$$V = d \sqrt{\frac{8\pi F}{S}}$$

Ces appareils ne sont d'ailleurs employés que dans les recherches scientifiques ; pour les mesures courantes, on donne la préférence aux électromètres symétriques.

237. Détermination de l'égalité de potentiel entre deux points. Téléphone. — Dans bien des expériences et dans toutes les mesures effectuées par la méthode de réduction à zéro, on n'a pas à déterminer la valeur de la différence de potentiel entre deux points, mais seulement à constater l'*égalité de potentiel entre deux points*. Il n'est pas alors indispensable d'employer un électromètre, et l'on peut utiliser avec avantage, dans ce but, soit un galvanoscope sensible, soit un électrodynamomètre, appareil dont nous parlerons à propos de l'électrodynamique, soit enfin un *téléphone*.

Le téléphone, considéré au point de vue spécial qui nous occupe, se compose essentiellement d'un aimant permanent A (fig. 112) portant une bobine de fil isolé B à l'une de ses

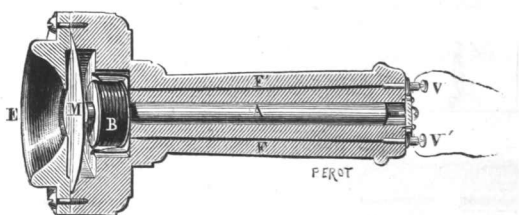


Fig. 112. — Téléphone considéré comme électroscope.

extrémités, et à une faible distance, une plaque mince de fer doux M de 4 à 6 centimètres de diamètre, fixée par sa périphérie dans une monture. L'attraction exercée par l'aimant sur cette plaque de fer doux la maintient dans une certaine position d'équilibre; mais si l'on envoie un faible courant dans la bobine entourant l'aimant, ce courant augmente ou diminue l'aimantation du noyau, déplace brusquement la plaque et produit un *clic* caractéristique. Le même bruit se produit lorsque le courant est interrompu. Un téléphone relié par les bornes V et V' à deux points entre lesquels il y a une différence de potentiel, même très faible, produira donc une série de bruits à chaque rupture et fermeture de son propre circuit, et ne restera muet que si la différence de potentiel est nulle. Il permet donc de reconnaître une différence de potentiel.

Lorsque les différences de potentiel entre les deux points considérés sont périodiquement variables et que leur période

est inférieure à $\frac{1}{16}$ de seconde, le téléphone rend un son continu de hauteur variable avec la période lorsqu'on laisse la communication permanente entre les deux extrémités du fil du téléphone et les deux points considérés. Nous aurons l'occasion d'indiquer un certain nombre d'applications du téléphone comme indicateur d'égalité de potentiel entre deux points.

APPLICATIONS DES ÉLECTROMÈTRES.

238. Force électromotrice des piles. — L'avantage de l'électromètre est de donner les forces électromotrices des piles par une lecture directe et sans polarisation, le générateur restant en circuit ouvert et n'ayant à fournir que la faible quantité d'électricité nécessaire à la charge de l'électromètre dont la capacité est très petite.

En faisant deux lectures en sens inverse avec l'étalon et la pile à mesurer, on obtient deux déviations proportionnelles à la somme des lectures, on élimine ainsi les défauts de symétrie et de réglage, ainsi que l'erreur provenant de la différence de potentiel due à la nature différente de l'aiguille et des quadrants (228).

La sensibilité est variable à volonté, soit par l'écartement du bifilaire, si l'on applique la méthode idiostatique, soit par le potentiel plus ou moins élevé de l'aiguille ou des quadrants lorsqu'on emploie la méthode hétérostatique (227).

239. Résistance des liquides. — *Méthode de M. Lippmann* (1). On enferme le liquide dont on veut mesurer la résistance dans un tube bien cylindrique fermé à ses deux extrémités par des plaques de même section que le tube et servant à amener le courant au liquide. Deux électrodes parasites en fil de platine ou de platine platiné plongent entre deux points du liquide et communiquent avec un électromètre de très faible capacité. La différence de potentiel entre ces deux points est proportionnelle au produit de la résistance de la colonne liquide interposée entre les deux points par l'intensité

(1) *Académie des sciences* (1876).

du courant qui la traverse. En mesurant la différence de potentiel entre les extrémités d'une résistance connue traversée par le même courant que le liquide, on en déduit sa résistance par la proportionnalité des différences de potentiel aux résistances.

On élimine les causes d'erreurs secondaires dues à la polarisation des électrodes parasites et à la nature différente de l'aiguille et des secteurs en inversant le courant et en prenant la moyenne des potentiels indiqués par l'électromètre.

240. Capacité d'un électromètre. — Pour mesurer cette capacité, on prend un condensateur de capacité connue C , on le charge à un certain potentiel, et on le met en communication avec l'électromètre de capacité x . Soit V le potentiel observé. La charge de l'électromètre est alors égale à xV . On décharge l'électromètre après l'avoir séparé du condensateur et on le remet une seconde fois en communication avec lui. On observe un nouveau potentiel plus petit V' . On a alors évidemment :

$$(C+x)(V-V')=xV$$

relation d'où l'on tire la valeur de x . La capacité d'un électromètre est en général très petite et peut être le plus souvent négligée dans les mesures courantes.

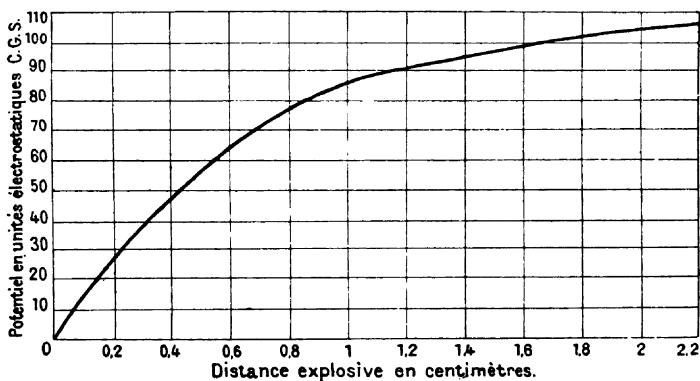


Fig. 113. — Distance explosive en fonction du potentiel.

241. Potentiel correspondant à certaines distances explosives. — Les expériences faites par MM. *Bichat* et

Blondlot ⁽¹⁾ en 1886 pour déterminer les potentiels correspondant à des distances explosives variant entre 1 et 22 millimètres entre deux boules de 1 centimètre de diamètre ont donné des résultats représentés figure 113. Ces résultats, comparés aux expériences faites par *M. Baille* ⁽²⁾ avec un électromètre à anneau de garde de Thomson, pour des distances variant entre 1 et 10 millimètres, présentent toute la concordance que l'on peut attendre des mesures de cette nature, eu égard à l'altération de la surface des boules de l'excitateur, altération due à l'étincelle elle-même.

242. Étude de l'électricité atmosphérique. — On

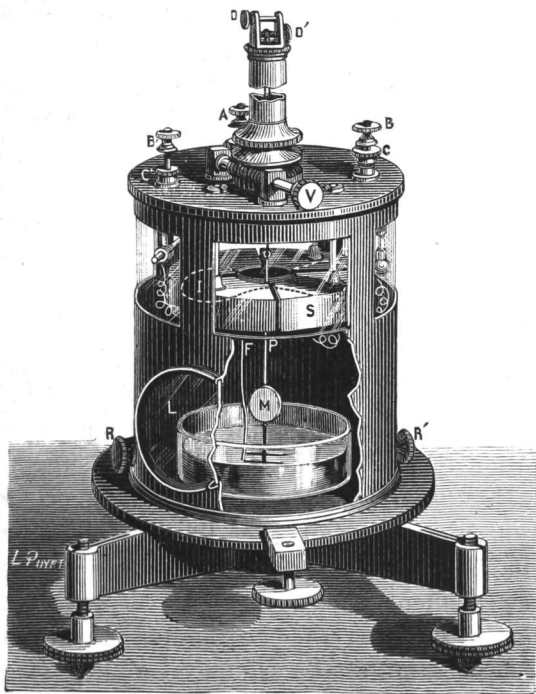


Fig. 114. — Électromètre symétrique de M. Mascart pour l'étude de l'électricité atmosphérique.

ignore encore les causes et le lieu d'origine des actions électriques dont l'atmosphère est le siège; plusieurs physiciens,

(1) *Académie des sciences*, séance du 26 juillet 1886.

(2) *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, t. XXV, p. 531.

il est vrai, ont tiré de leurs propres observations quelques résultats importants, mais les phénomènes généraux ne pourront être étudiés avec fruit que par la comparaison et la discussion d'observations continues faites simultanément en un grand nombre de points. L'électromètre symétrique de M. Mascart fournit un moyen simple et commode de recueillir des documents dans ce but.

Dans les études d'électricité atmosphériques, on se propose de mesurer la différence entre le potentiel de l'air en un point déterminé et le potentiel de la surface du sol, que l'on considère comme nul. Mais le potentiel de l'air est une quantité essentiellement variable, et il faut *enregistrer* le phénomène d'une manière continue, au lieu de se contenter de prendre des points à époques fixes. L'électromètre employé au parc Saint-Maur est le modèle de M. Mascart représenté figure 114.

Le collecteur de charge est constitué par un filet d'eau qui s'échappe d'un réservoir C (fig. 115) de 50 litres environ de capacité et que l'on remplit toutes les douze heures. L'eau s'écoule constamment au dehors par l'extrémité d'une tige L longue de 1,5m. environ qui traverse le mur de l'observatoire. Le débit réglé par le robinet R' est tel que le filet liquide se résout en gouttelettes à 4 ou 5 centimètres de l'orifice de la tige. Un tube en verre V montre à chaque instant le niveau de l'eau dans l'intérieur. Le réservoir peut être au besoin mis en communication avec le sol par le fil T. Il est supporté par des isoieurs de M. Mascart, ainsi que le fil conducteur T qui met le collecteur en communication avec l'aiguille de l'électromètre.

Isoieurs de M. Mascart. — Pour l'électricité atmosphérique et, plus généralement, dans toutes les expériences d'électricité statique où l'on opère avec des corps qui ont une charge limitée, aucun des commutateurs ordinaires ne peut être employé; les supports en ébonite et les supports en verre, même lorsqu'ils sont vernis à la gomme laque, ne tardent pas à prendre une conductibilité superficielle qui les met hors d'usage. Il est donc nécessaire que les corps électrisés et les fils de communication, sur toute leur longueur, soient parfaitement isolés, et c'est là une question importante bien résolue par les isoieurs de M. Mascart.

Ces isoloirs sont représentés figure 116; ils sont de deux sortes, les uns destinés à reposer sur des supports fixes ho-

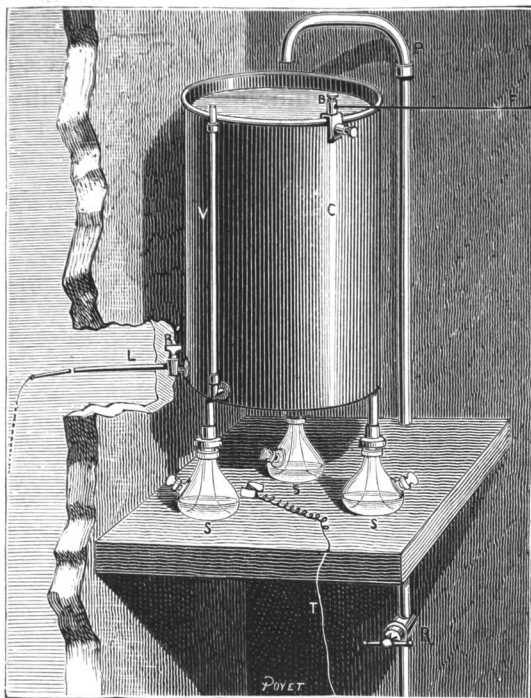


Fig. 115. — Collecteur de charge par l'étude de l'électricité atmosphérique.

rizontaux, les autres à être accrochés et suspendus. Les premiers se composent d'une sorte de carafe dont le fond se prolonge à l'intérieur en une tige qui vient ressortir à travers le goulot; le fond du vase contient de l'acide sulfurique concentré; un coulant muni d'un chapeau, qui glisse le long de la tige, permet de fermer presque entièrement l'ouverture du flacon, mais sans toucher les bords. Les seconds sont formés aussi d'une sorte de carafe dont le fond se relève en un tube ouvert à l'intérieur et livre passage à une tige de verre portant deux crochets à ses deux extrémités; cette tige ferme à sa partie supérieure la carafe qui contient de l'acide sulfurique concentré. Dans l'un et l'autre cas, la tige desséchée par l'acide constitue un isolant parfait.

Enregistrement. — Une caisse d'horloge H (fig. 117) est divisée dans le sens de la hauteur en deux parties séparées par une cloison en bois; l'une renferme un mouvement d'horlogerie, l'autre forme chambre noire et contient un châssis qui descend de toute sa hauteur en vingt-quatre heures, entraînant dans son mouvement une feuille de papier sensibilisé au gélatino-bromure d'argent. Une lanterne L contient une petite

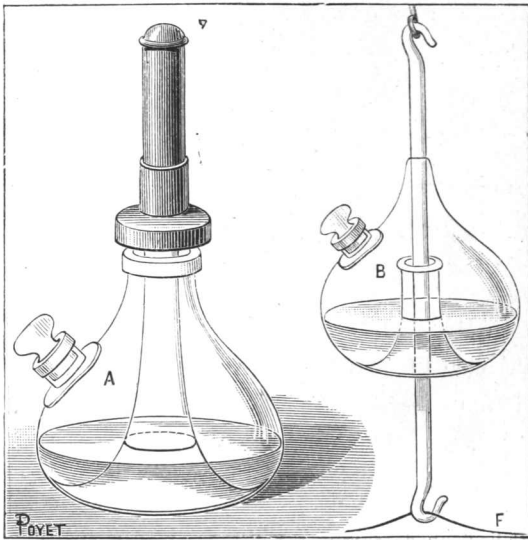


Fig. 116. — Isoloirs de M. Mascart.

lampe à gazogène qui envoie à l'électromètre des rayons lumineux se réfléchissant sur la lentille et sur le miroir fixé à l'aiguille de l'électromètre.

Nous supposons que l'on ait versé de l'acide sulfurique concentré dans tous les isoloirs préalablement lavés et séchés, ainsi que dans le vase où plongent les fils de platine. La hauteur relative de l'horloge et de l'électromètre est réglée de façon que les rayons émanés de la lampe, après réflexion, viennent tomber exactement sur la fente derrière laquelle glisse le châssis photographique. Ces rayons forment sur le papier sensible deux images dont l'une, due à la réflexion sur la face plane de la lentille, a une position fixe et trace une ligne droite,

tandis que l'autre, due à la réflexion sur le miroir, suit tous les mouvements de l'aiguille et trace une courbe plus ou moins mouvementée.

Pour mettre l'appareil en expérience, on commence par faire communiquer la cage de l'électromètre avec le sol, au moyen d'un fil T (fig. 117); on relie les deux paires de quadrants par les

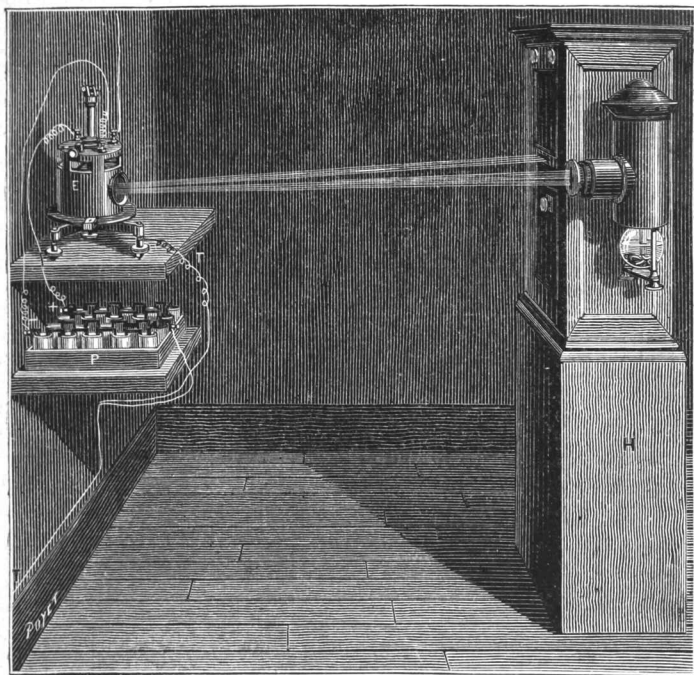


Fig. 117. — Enregistrement photographique des variations du potentiel de l'atmosphère.

bornes B et B' dont on a relevé les chapeaux C et C' (fig. 114), aux deux pôles d'une pile P de vingt éléments Volta, dont le milieu communique avec la terre. Les deux paires de quadrants sont ainsi à des potentiels égaux et de signes contraires, et l'aiguille maintenue en communication avec le sol prend une certaine position d'équilibre. On fait tourner la suspension bifilaire jusqu'à ce que l'image mobile vienne se confondre avec l'image fixe. La position du zéro, qui correspond à un potentiel nul, étant ainsi déterminée, on réunit la borne A au fil F qui aboutit

au réservoir isolé, et on relève le chapeau adapté à cette borne.

Des expériences spéciales permettent de vérifier l'isolement des différentes pièces. Si cet isolement est parfait, ce qui est une condition indispensable, on voit aussitôt l'image mobile dévier dans un sens ou dans l'autre, selon la nature de l'électricité atmosphérique, et l'angle de déviation, lorsqu'il est compris entre certaines limites, est proportionnel au potentiel de l'air au point où se fait l'écoulement.

Graduation. — On enlève le fil F, et on relie la borne A de l'électromètre au pôle positif d'une pile Daniell de dix élé-

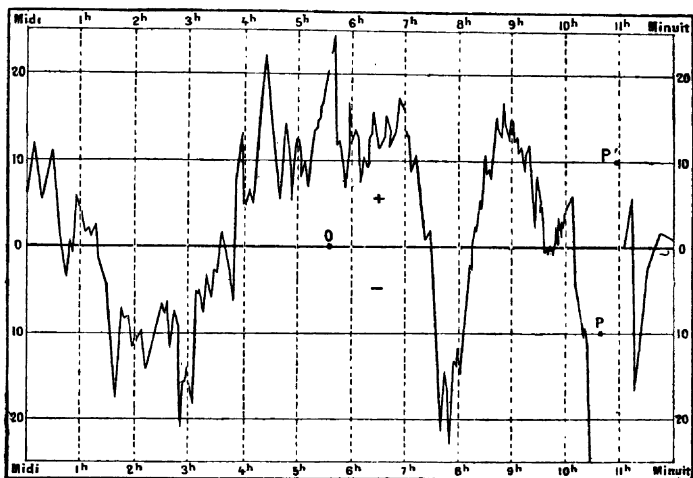


Fig. 118. — Spécimen de l'enregistrement continu des variations du potentiel atmosphérique.

ments, par exemple, dont l'autre pôle communique avec la terre. L'image mobile est déviée, et s'arrête au bout de quelques instants en une certaine position P (fig. 118). On laisse l'appareil dans cet état pendant six à dix minutes, le temps nécessaire pour que le papier soit influencé, puis on intervertit les pôles de la pile auxiliaire; on obtient alors une seconde image, symétrique de la première, qui laisse une trace en P' sur la feuille. La demi-distance P P' mesure la déviation produite par dix éléments Daniell. On peut ainsi exprimer exactement, en éléments Daniell et, par suite, en volts, le potentiel de l'air à un instant quelconque.

Lorsqu'on met le réservoir en communication avec le sol, l'image mobile revient immédiatement au zéro et laisse sur le papier une trace 0 qui persiste jusqu'à ce que l'isolement ait été rétabli. L'enregistreur donne ainsi de lui-même une vérification quodienne du zéro.

Les graduations doivent être renouvelées fréquemment; en effet, les conditions primitives d'isolement ne persistent pas indéfiniment; l'acide s'hydrate, et peu à peu les déviations pour une même charge diminuent d'amplitude; lorsque la déperdition est bien accusée, ce dont il est nécessaire de s'assurer de temps en temps, il faut démonter l'appareil, descendre le réservoir, et procéder avec les précautions d'usage au renouvellement de l'acide sulfurique dans les isolements et dans le vase de l'électromètre.

243. Applications diverses. — Nous examinerons ultérieurement les applications de l'électromètre à la mesure de certains éléments dont nous n'avons pas encore entrepris l'étude. Citons, par exemple, la détermination de la capacité des condensateurs, la mesure des hauts potentiels par le condensateur, la mesure de l'intensité des courants périodiques, la mesure de la puissance électrique, la détermination des coefficients d'induction, etc.

CHAPITRE VII

GÉNÉRATEURS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE THÉORIQUES

244. Définitions. — Quelle que soit la nature des actions mises en jeu dans un générateur d'énergie électrique (affinité chimique, chaleur, travail mécanique, etc.), on peut le définir comme un système produisant une *force électromotrice* E et opposant au passage du courant une *résistance intérieure* r dépendant de sa nature et de ses dimensions.

La résistance intérieure d'un générateur électrique est un facteur constant ou ne variant que lentement avec le temps, tandis que la force électromotrice peut être constante ou varier d'une façon *périodique*. De là deux classes distinctes :

Générateurs à force électromotrice constante.

Générateurs à force électromotrice périodique.

Les premiers sont caractérisés par la production de courants *continus*, les seconds par des courants *périodiques*, alternatifs ou redressés.

GÉNÉRATEURS A FORCE ÉLECTROMOTRICE CONSTANTE.

245. Constantes d'un générateur électrique. — Quelle que soit la nature des actions mises en jeu dans un générateur d'énergie électrique (affinité chimique, chaleur, travail mécanique, etc.), nous savons (**244**) qu'on peut le définir comme un système produisant une force électromotrice E et opposant au passage du courant une résistance r .

Considérons, pour fixer les idées, un générateur électrochimique, une pile hydro-électrique, dans laquelle les solutions actives restent toujours identiques à elles-mêmes, ainsi que les surfaces des électrodes et leur distance. Dans ces conditions théoriques, sensiblement réalisées par certains générateurs que nous étudierons par la suite, les deux éléments qui caractérisent le générateur sont invariables et s'appellent alors les *constantes* du générateur. Un générateur constant fermé sur un circuit de résistance constante y produit un courant *continu* et *constant*.

Pour éviter de répéter un grand nombre de fois le dessin d'un générateur électrique, à courant continu, on a pris l'habitude d'adopter un signe conventionnel. Une *pile* se représente par deux traits, l'un long et fin (fig. 119) est le pôle positif (+), celui par lequel sort le courant qui est au potentiel le plus élevé, l'autre gros et court qui correspond au pôle négatif (-) par lequel entre le courant et qui est au potentiel le moins élevé. Le nombre de traits, gros ou fins, indique le nombre des éléments. La figure 119 représente deux éléments en tension.

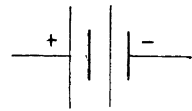


Fig. 119. — Signe conventionnel des piles.

Nous pouvons étudier le fonctionnement d'un générateur électrique *constant*, en le faisant agir sur un circuit extérieur de résistance variable, et déterminer ses différents éléments de fonctionnement. Nous pouvons aussi *coupler* un certain nombre de générateurs constants identiques, et étudier leurs couplages. Les résultats obtenus s'appliqueront à tous les générateurs constants, quelle que soit la cause de la force électromotrice et la nature de la résistance du générateur. Nous serons ainsi conduits à résoudre un certain nombre de problèmes d'une application fréquente.

Les éléments dont nous aurons à étudier les variations en fonction de la résistance du circuit extérieur sont :

L'*intensité du courant* I ;

La *différence de potentiel aux bornes* ou différence de potentiel utile e ;

La *puissance utile* P_u dans le circuit extérieur;

La *puissance totale* P_t produite par le générateur;

La *puissance perdue* P_p dans l'élément pour vaincre sa résistance, c'est la différence entre la puissance totale produite et la puissance utile, disponible dans le circuit extérieur.

Le *rendement* η ou rapport ⁽¹⁾ de la puissance utile P_u à la puissance totale P_t .

Ces différents éléments se déterminent par une simple application des lois du courant électrique.

246. Générateur électrique constant en circuit sur une résistance extérieure variable. — Considérons un générateur électrique dont les constantes sont E et r , et établissons entre ses bornes une résistance R variant depuis 0 jusqu'à l'infini. Lorsque la résistance R est nulle, le générateur est dit en *court-circuit*; lorsqu'elle est infinie, le générateur est à *circuit ouvert*.

On a évidemment, en appliquant la loi d'Ohm, les relations suivantes entre les différents éléments :

$$\text{Intensité du courant : } I = \frac{E}{r + R}.$$

$$\text{Différence de potentiel aux bornes : } e = E - rI = RI.$$

$$\text{Puissance utile : } P_u = RI^2 = eI.$$

$$\text{Puissance totale : } P_t = (r + R)I^2 = EI.$$

$$\text{Puissance perdue dans la pile : } P_p = rI^2 = (E - e)I.$$

$$\text{Rendement : } \eta = \frac{P_u}{P_t} = \frac{e}{E} = \frac{R}{R + r}.$$

Puissance utile maxima. — La discussion de ces formules montre que la puissance utile, nulle pour $R = 0$, est également nulle pour $R = \infty$.

Elle passe donc par un maximum dans l'intervalle, et ce maximum a lieu lorsque $R = r$; le rendement correspondant est égal à 0,5 et la puissance utile maxima

$$P_{u. \max.} = \frac{E^2}{4r}.$$

La puissance utile maxima d'un élément augmente comme le carré de la force électromotrice et diminue proportionnellement à la résistance.

(1) Le *rendement* étant le rapport de deux puissances est toujours un nombre abstrait plus petit que 1.

Les courbes de la figure 120, montrent comment varient les différents facteurs de la circulation électrique pour un élément générateur théorique idéal, que nous appelons *Élément Volt-Ohm* ($E = 1$ volt; $r = 1$ ohm). Les courbes sont calculées dans

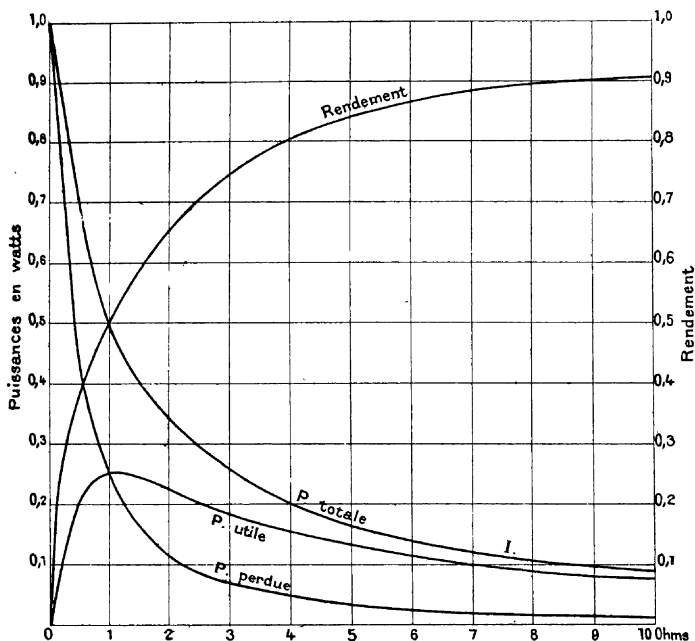


Fig. 120. — Variation des éléments de fonctionnement d'un générateur électrique (Volt-Ohm) en fonction de la résistance extérieure.

le système électromagnétique C.G.S. pratique (volt, ohm, ampère, watt).

Les résistances extérieures ou utiles R sont portées en abscisses, les différents éléments correspondants en ordonnées. Il résulte de l'examen de ces courbes qu'un générateur électrique produit sa puissance utile maxima lorsque l'intensité du courant est égale à la moitié de l'intensité en court-circuit. C'est en circuit ouvert ou infini que le rendement est maximum, mais le générateur produit alors un courant nul. Sa puissance utile est nulle. Dans le cas où l'élément débite sa puissance utile maxima, la différence de potentiel utile e n'est que la moitié de la force électromotrice E .

Il faut éviter, sauf des cas très spéciaux et exceptionnels, de faire débiter à un générateur électrique une intensité plus grande que la moitié de son intensité en court-circuit, car on diminue ainsi en même temps la puissance utile et le rendement.

Il vaut mieux, lorsqu'on a besoin d'une grande intensité, diminuer la résistance r à l'aide d'éléments plus grands, présentant une résistance intérieure plus faible, ou de couplages appropriés.

247. Couplage des générateurs électriques constants égaux. — Nous ne considérons que le cas de n éléments identiques, dont les constantes sont E pour la force électromotrice, et r pour la résistance intérieure, les résistances des fils de jonction étant supposées nulles ou négligeables.

Couplage en tension. — Les n éléments couplés en tension ou en série, c'est-à-dire le négatif du premier au positif du second, le négatif du second au positif du troisième, etc. Cet ensemble est équivalent à un seul élément dont la force électromotrice serait égale à nE et la résistance intérieure égale à nr .

Couplage en dérivation. — Le couplage en dérivation, en quantité, en batterie ou en surface, consiste à relier les n pôles positifs entre eux et les n pôles négatifs entre eux. Ces n éléments équivalent à un seul élément dont la force électromotrice serait égale à E et la résistance intérieure égale à $\frac{r}{n}$.

Couplage en séries multiples. — Si nous considérons q groupes de t éléments en tension, ou, ce qui revient au même, t groupes en tension renfermant chacun q éléments en dérivation, le nombre total d'éléments sera évidemment

$$n = tq.$$

Cet ensemble de tq éléments sera équivalent à un seul élément dont la force électromotrice serait égale à tE et la résistance intérieure à $\frac{t}{q}r$. Les relations précédemment établies (246) pour un seul élément s'appliquent à un couplage quelconque d'éléments égaux, à la condition de prendre pour constantes de l'élément unique équivalent les nouvelles constantes correspondant au couplage.

Quel que soit le couplage adopté, la puissance utile maxima ne dépend, comme l'indique le calcul, que des constantes des éléments employés. On doit donc, pour réaliser un générateur électrique de grande puissance, lui donner une grande force électromotrice et une faible résistance intérieure.

La figure 121, représente la puissance utile produite par 8 éléments (*Volt-Ohm*) pour tous les couplages possibles en fonc-

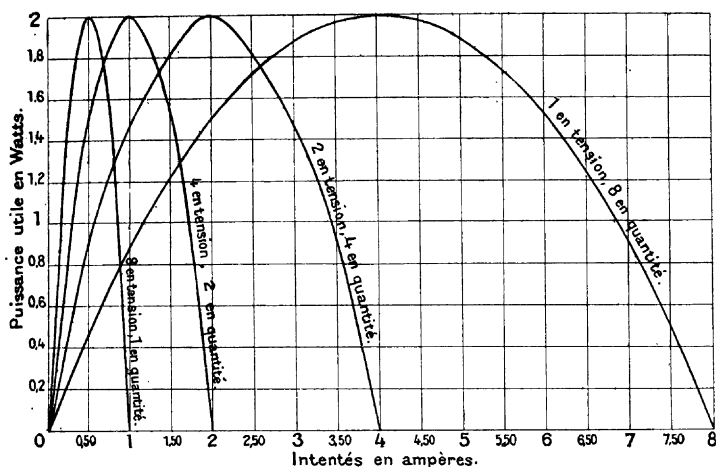


Fig. 121. — Influence du couplage sur la puissance et l'intensité du courant produites par 8 générateurs identiques.

tion de l'intensité du courant. Toutes ces courbes ont pour tangente horizontale commune $P_{u.\max.} = 2$ watts; chaque élément pouvant donner au maximum 0,25 watt.

248. Nombre minimum d'éléments (E, r) nécessaires pour produire une puissance utile donnée. — La puissance utile maxima que peut donner un élément E, r est égale à

$$\frac{E^2}{4r} \text{ watts.}$$

Si nous avons P_u watts à produire, le nombre *minimum* d'éléments n nécessaire sera donné par la relation

$$P_u = n \frac{E^2}{4r}$$

d'où

$$n = 4 \frac{rP_u}{E^2}.$$

Mais le nombre d'éléments *nécessaire* ne sera pas forcément *suffisant*. En pratique, il en faudra généralement un peu plus, parce que le couplage des t éléments en tension et q éléments en quantité pour obtenir séparément les deux facteurs du produit eI conduisent à un nombre entier plus grand que n , et qu'il faut, d'autre part, satisfaire simultanément à deux conditions distinctes : obtenir une intensité I et une différence de potentiel utile e . Les formules se transforment alors suivant les données du problème.

249. Calcul du nombre de générateurs nécessaires pour produire une puissance utile donnée. — Cette puissance utile est définie par les deux facteurs e_n et I_n , d'où l'on déduit la résistance utile R , effective ou apparente.

On peut imposer comme condition que les éléments travaillent à puissance maxima, à débit déterminé ou à rendement déterminé.

Puissance utile maxima. — Il faut, dans ce cas, que la résistance intérieure r_n des $n = tq$ éléments montés par t en tension et par q en dérivation soit égale à la résistance extérieure R , ce qui donne

$$r_n = \frac{t}{q} r = R; \quad \frac{t}{q} = \frac{R}{r}. \quad (1)$$

La différence de potentiel utile par élément e étant la moitié de leur force électromotrice E , et les éléments étant montés par t en tension, on a une seconde relation

$$\frac{tE}{2} = e_n. \quad (2)$$

Les équations (1) et (2) déterminent t et q et, par suite, le nombre d'éléments tq .

Si le calcul conduit à des nombres fractionnaires, il faudra évidemment prendre le nombre entier immédiatement supérieur et ramener à l'intensité exigée par l'emploi d'une petite résistance additionnelle intercalée dans le circuit.

Débit déterminé. — Si on appelle I , le courant maximum que

peut fournir un élément courant maximum fixé en général par le constructeur par des considérations d'ordre pratique, le nombre q de séries en quantité sera donné par la relation

$$I_n = qI_1. \quad (3)$$

Le nombre d'éléments en tension sera déterminé sachant que que chaque élément donne une différence de potentiel utile $e = E - rI_1$, ce qui donne

$$e_n = te = t(E - rI_1). \quad (4)$$

Rendement déterminé. — On connaît η . La formule du rendement

$$\eta = \frac{e}{E} = \frac{R}{R + r}$$

permet de déterminer t en introduisant sa valeur $e = \eta E$ dans la formule (4), ainsi que la résistance intérieure r_n de la combinaison formée par les n éléments. On détermine alors q en appliquant la formule (1).

LOIS DES CIRCUITS ÉLECTRIQUES.

Si complexe que soit un circuit électrique constitué par une combinaison de résistances constantes et de générateurs constants, il est toujours possible d'établir une série de relations entre les forces électromotrices, les résistances, les différences de potentiel aux points de rencontre des différents circuits et les intensités des courants qui les traversent en s'appuyant exclusivement sur la loi d'Ohm (140), et de résoudre ainsi un grand nombre de problèmes relatifs au régime permanent.

Kirchhoff a tiré de la loi d'Ohm deux autres lois qui permettent d'établir très simplement ces relations dans un grand nombre de cas.

250. Lois de Kirchhoff. — 1^{re} LOI. — *La somme algébrique des courants qui traversent plusieurs conducteurs aboutissant à un point commun est égale à 0*, en considérant comme positifs les courants qui s'approchent du point commun, et comme négatifs ceux qui s'en éloignent.

2^{me} LOI. — *Dans un système de conducteurs constituant un*

circuit fermé, la somme des produits de la résistance de chaque conducteur par l'intensité du courant qui le traverse est égale à la somme algébrique des forces électromotrices agissant dans le circuit fermé, en considérant comme positives les forces électromotrices qui tendent à augmenter l'intensité du courant, et comme négatives celles qui tendent à diminuer cette intensité.

Les lois de Kirchhoff s'appliquant à un système fermé dans lequel les résistances et les forces électromotrices restent constantes, les intensités restent elles-mêmes constantes et constituent un régime permanent.

Lorsque les courants sont *variables* ou *périodiques* (267), la loi d'Ohm et les lois de Kirchhoff ne cessent pas d'être applicables. Il faut seulement faire intervenir les forces électromotrices qui agissent dans le circuit à un instant donné, ainsi que les intensités au même instant.

Les lois de Kirchhoff sont d'une application très fréquente pour la démonstration des principales méthodes de mesure, pont de Wheatstone, pont de Thomson, résistance d'un galvanomètre, lois des courants dérivés, etc. Nous allons examiner ici quelques-unes de ces applications à la mesure des constantes des générateurs électriques.

FORCE ÉLECTROMOTRICE DES GÉNÉRATEURS ÉLECTRIQUES.

251. Définitions. — Nous ne considérons ici que les générateurs électriques constants ou sensiblement tels : piles hydro-électriques, piles thermo-électriques, accumulateurs.

La force électromotrice d'un générateur est égale à la différence de potentiel entre ses bornes lorsqu'il fournit un courant nul ou sensiblement tel. Nous n'indiquerons ici que les méthodes dans lesquelles le générateur électrique produit un courant exerçant des actions magnétiques qui servent à déterminer *indirectement* sa force électromotrice. Les méthodes dans lesquelles la force électromotrice est mesurée par des actions électrostatiques ont été étudiées dans le chapitre précédent, à propos de l'*électrométrie*.

On détermine, en général, la force électromotrice d'un géné-

rateur électrique en la comparant à celle d'un autre générateur de force électromotrice connue et constante pris pour étalon. Les étalons pratiques sont ordinairement des piles hydro-électriques de composition connue et définie, dans la confection desquelles il n'entre que des produits chimiquement purs.

Dans les méthodes que nous allons indiquer, nous supposons toutes les comparaisons faites avec une pile *Daniell* étalon d'une forme et d'une composition particulières, pile étalon que nous décrivons dans le chapitre consacré à l'*électrochimie*, dont la résistance intérieure est inférieure à 10 ohms, et dont la force électromotrice est de 1,08 volt légal à la température de 16° C. environ.

252. Méthode d'opposition. — On dispose n éléments de force électromotrice connue E en opposition avec n' éléments de force électromotrice E' en intercalant un galvanoscope qui doit rester au zéro pour une certaine valeur de n et de n' . On a alors :

$$nE = n'E'.$$

Si n éléments donnent une déviation d d'un côté, et $n+1$ éléments une déviation d' du côté opposé, la relation s'écrit alors :

$$n \frac{d}{d+d'} E = n'E'.$$

d'où l'on tire la valeur de E' .

253. Méthode de l'égalé résistance. — On monte en circuit la pile, de résistance intérieure r , dont on veut connaître la force électromotrice, un galvanomètre G et une boîte de résistance R . On gradue R pour obtenir une déviation dans les limites de la graduation de G . La valeur du courant est alors I . On remplace la pile par l'étalon et l'on fait varier R pour que la résistance totale du circuit soit la même que dans le premier cas. On a alors une intensité I' . On en tire

$$\frac{E}{E'} = \frac{I}{I'}.$$

Lorsque le galvanomètre et la résistance R ont une grande valeur relativement à la résistance intérieure des générateurs

dont on veut comparer les forces électromotrices, il est inutile d'égaliser la valeur de la résistance totale dans les deux expériences. C'est le cas, par exemple, lorsque la résistance totale du galvanomètre et de la boîte dépasse 8000 à 10 000 ohms.

254. Méthode de la grande résistance. — Cette méthode est très employée dans les laboratoires avec le galvanomètre Deprez d'Arsonval (208).

On monte (fig. 122) le galvanomètre G avec un shunt variable S, une clef d'inversion C et une boîte de résistance R. L'éta-

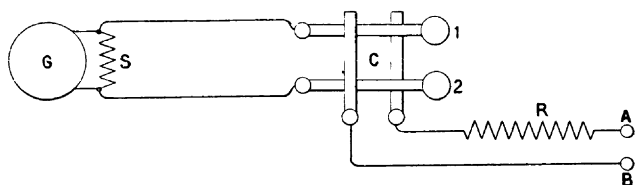


Fig. 122. — Montage des galvanomètres Deprez d'Arsonval pour la mesure des forces électromotrices des générateurs électriques.

lon est établi entre les points A et B, on met dans la boîte R une résistance variant de 5 000 à 10 000 ohms, et on fait varier S et R jusqu'à ce que l'on obtienne une déviation de 54 millimètres de chaque côté de l'échelle divisée. La somme des lectures en millimètres de part et d'autre du zéro de l'échelle donne la force électromotrice en centièmes de volt. Si l'on a eu soin de faire $R + G_s = 5000$ ohms, il suffit de porter la résistance extérieure à 50 000 ohms (G_s devient négligeable en pratique devant 50 000 ohms) pour mesurer jusqu'à 20 volts; la somme des lectures sur l'échelle exprimée en centimètres donne la force électromotrice en volts pour le même étalonnage initial.

On peut enfin mesurer jusqu'à 200 volts, en graduant initialement l'appareil sur une résistance initiale $R + G_s = 4000$ ohms et en portant la résistance totale à 200 000 ohms. La lecture de la déviation en millimètres de chaque côté de l'échelle, pour la même graduation initiale, donne la force électromotrice en volts.

L'application de la méthode est rendue facile à l'aide de la boîte à double rhéostat représentée fig. 123. L'un des rhéostats, variant de 1 à 100 ohms, ohm par ohm, est pour le shunt S,

le second rhéostat, variant de 100 à 9900, par 100 ohms à la fois, constitue la grande résistance R introduite dans le circuit. Un léger déplacement de l'échelle transparente du galvano-

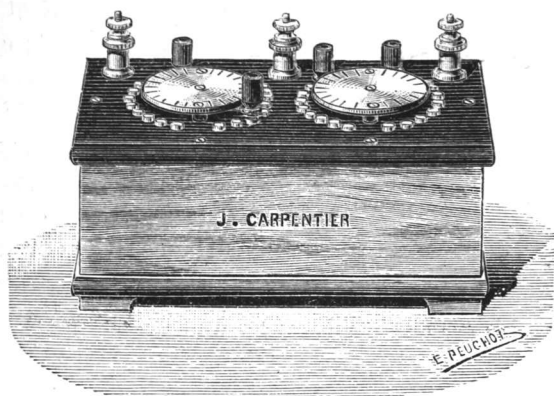


Fig. 123. — Rhéostat double pour l'application de la méthode de la grande résistance avec le galvanomètre Deprez d'Arsonval à miroir.

mètre, en avant ou en arrière, permet de parfaire l'ajustement si une variation de 100 ohms produit un écart trop grand.

255. Méthode de l'égale déviation. — Cette méthode s'emploie de préférence lorsque le galvanomètre n'est pas gradué. On monte en circuit l'étalon E , le galvanomètre G et une boîte de résistances. On ajuste les résistances dans la boîte pour avoir une lecture commode et placer le galvanomètre dans les meilleures conditions de sensibilité relative (215). Soit R la résistance totale du circuit. On remplace l'étalon par la pile E' à mesurer, et on ramène à la même déviation. En appelant R' la nouvelle résistance totale, on a

$$\frac{E}{E'} = \frac{R}{R'}$$

256. Méthode de Wiedemann. — L'étalon E et la pile E' sont montés en circuit et *en tension* sur un galvanomètre gradué G et une boîte de résistances que l'on fait varier pour avoir une déviation convenable δ . On retourne ensuite l'élément dont la force électromotrice est la plus faible et l'on obtient une déviation δ' . On a

$$\frac{E}{E'} = \frac{\delta + \delta'}{\delta - \delta'}$$

257. Méthode de M. Lacoine (dite de **Lumsden**). —

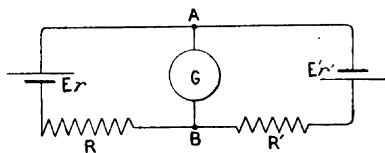


Fig. 124. — Méthode de M. Lacoine.

Les deux piles E et E' sont montées en tension; un galvanomètre G est établi en dérivation entre les points A et B (fig. 124). On intercale entre E et le point B une certaine résistance R, et on ajuste la résistance R' pour ramener

le galvanomètre au zéro. On a alors :

$$\frac{E}{E'} = \frac{R}{R'}$$

On suppose que les résistances des piles sont négligeables devant celles de R et R'. Lorsque ces résistances sont assez grandes pour qu'il faille en tenir compte, on fait une première expérience avec les résistances R et R', on change alors R en lui donnant une nouvelle valeur plus petite R₁ et on ajuste R' pour ramener le galvanomètre à zéro, la nouvelle valeur de R' est R'₁. On a alors :

$$\frac{E}{E'} = \frac{R - R_1}{R' - R'_1}$$

Si l'on connaît la résistance intérieure des éléments, cette seconde opération est inutile; en désignant par r et r' les résistances intérieures des éléments, la formule devient

$$\frac{E}{E'} = \frac{R + r}{R' + r'}$$

258. Méthode de Poggendorff. — Méthode de réduction à zéro. Les piles de forces électromotrices E et E' sont disposées comme ci-contre (fig. 125); on ajuste R et R' jusqu'à l'équilibre, et on a alors

$$\frac{E}{E'} = \frac{R + R' + r}{R}$$

Dans cette mesure, la pile E' seule ne produit pas de courant

et ne se polarise pas. La pile E doit donc être constante et se composer par exemple d'éléments Daniell en nombre suffisant pour que E soit plus grand que E'.

La résistance intérieure r de la pile E figure dans l'équation ci-dessus. On peut l'éliminer en faisant deux expériences, la première avec les résistances R et R', la seconde avec des résistances plus faibles R₁ et R'₁. La formule devient alors :

$$\frac{E}{E'} = \frac{(R - R_1) + (R' - R'_1)}{R - R_1}$$

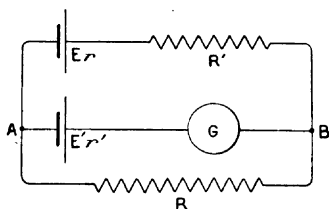


Fig. 125. — Méthode de Poggen-dorff.

259. Méthode du potentiomètre de Clark. — Cette méthode, sous sa forme complète, nécessite l'emploi de deux galvanomètres et de trois piles, l'étalon, la pile à mesurer et une pile auxiliaire. Elle présente l'avantage que l'étalon et la

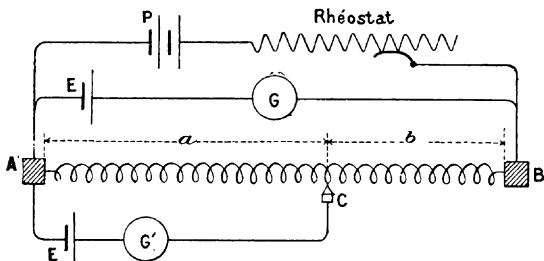


Fig. 126. — Méthode du potentiomètre de Clark.

pile à mesurer sont comparés dans les mêmes conditions, sans qu'aucun courant ne les traverse ; on évite ainsi toutes les erreurs produites par la polarisation dans la plupart des autres méthodes. *a, b* (fig. 126) est une bobine de fil nu, formé d'un alliage de platine et d'iridium, ayant 40 ohms de résistance et faisant 100 tours sur un cylindre d'ébonite tournant sur son axe comme un rhéostat de Wheatstone. Les bouts du fil sont attachés aux extrémités A et B, qui servent de pivots. P est une pile de quelques éléments reliée aussi aux blocs A et B, qui envoie un courant continu à travers *a, b*. En E est l'étalon

relié aux points A et B avec un galvanoscope intercalé en G, qui doit rester au zéro, ce qu'on obtient facilement en faisant varier le rhéostat. La pile E' est montée entre le point A et un contact glissant C sur le rhéostat, contact que l'on déplace jusqu'à ce que le galvanoscope G' soit au zéro. On a alors

$$\frac{E}{E'} = \frac{a+b}{a} = \frac{R}{a}.$$

Si E' a une force électromotrice plus grande que E, il faut inverser les deux éléments ou employer deux éléments étalon en tension. Cette méthode permet de comparer des forces électromotrices au $\frac{1}{100000}$ de volt.

Lorsqu'on n'a pas besoin d'une aussi grande précision, on peut simplifier l'application de la méthode en employant le

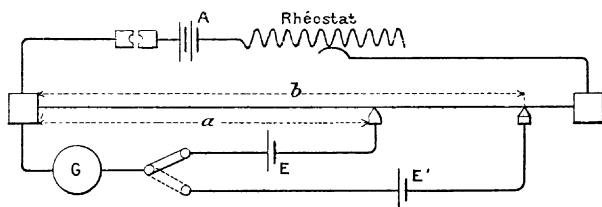


Fig. 127. — Pont à fil divisé monté en potentiomètre.

fil divisé du pont de Wheatstone, deux contacts glissants, et un seul galvanoscope que l'on utilise successivement pour les deux mesures, à l'aide d'un commutateur. On établit entre les extrémités du fil une différence de potentiel un peu plus grande que la plus grande force électromotrice des éléments à comparer, à l'aide de deux accumulateurs A en tension et d'un rhéostat, et on réalise le montage représenté figure 127. En appelant *a* et *b* les longueurs de fil comprises entre l'origine commune et les deux contacts glissants, on a, lorsque le galvanoscope G est au zéro pour les deux éléments,

$$\frac{E}{E'} = \frac{a}{b}.$$

On compare ainsi facilement les forces électromotrices com-

prises entre 1 et 3 volts au $\frac{1}{500}$ de volt, ce qui est bien suffisant pour les besoins de la pratique.

RÉSISTANCE INTÉRIEURE DES PILES.

Nous n'indiquerons que les méthodes principales applicables suivant la nature des appareils dont on dispose. Les démonstrations de ces formules ne sont que de simples applications des lois d'Ohm (140) et de Kirchhoff (250).

260. Méthode de la demi-déviatiou. — Applicable aux piles sans polarisation sensible. On monte dans le même circuit la pile de résistance inconnue r , un galvanomètre de résistance G et une boîte de résistances. Une résistance R débouchée donne une déviation α . On diminue cette résistance jusqu'à ce que la déviation soit 2α , soit R' la résistance dans la boîte. On a

$$r = R - (2R' + G).$$

261. Méthode de sir W. Thomson. — Applicable aux piles sans polarisation sensible. On monte en circuit la pile de résistance r , le galvanomètre G et une boîte de résistances. On débouche une résistance R convenable pour avoir une lecture facile et une bonne sensibilité du galvanomètre. On place ensuite un shunt de résistance S entre les bornes de la pile et on ramène le galvanomètre à la même déviation en diminuant la résistance dans la boîte jusqu'à une valeur R_1 . On a

$$r = S \frac{R - R_1}{R_1 + G}.$$

Cette méthode peut s'employer avec un galvanomètre non étalonné.

262. Mesure de la résistance intérieure d'un nombre pair d'éléments identiques. — On les groupe en deux circuits en tension, et on monte ces deux circuits *en opposition*; les forces électromotrices s'annulent, on mesure alors la résistance totale comme celle d'un conducteur ordinaire par une méthode connue (substitution, pont de Wheatstone, etc.).

263. Méthode de l'électromètre, du condensateur ou du galvanomètre à très grande résistance. — On branche sur les bornes de la pile en circuit ouvert un appareil permettant de mesurer la différence de potentiel. On shunte ensuite avec une résistance étalonnée jusqu'à diminuer la différence de potentiel de moitié. La résistance du shunt est alors égale à celle de la pile. Cette méthode est applicable seulement aux générateurs constants.

264. Méthode de Mance. — L'une des meilleures, car elle ne demande à la pile que d'être constante pendant le court intervalle d'abaissement de la clef, et s'applique, par suite, aux générateurs non constants.

Le pont de Wheatstone étant disposé comme le représente la figure 128, avec une clef de court-circuit entre A et B, on

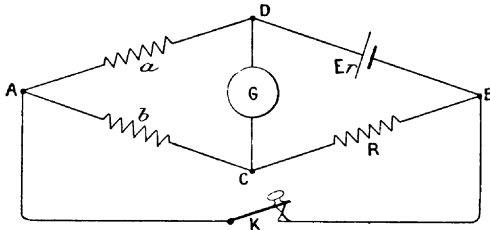


Fig. 128. — Méthode de Mance.

ajuste C B pour qu'en pressant la clef, la déviation du galvanomètre ne change pas. On a alors

$$r = R \frac{a}{b}.$$

Si a et b sont égaux, la formule se simplifie et devient :

$$r = R.$$

265. Méthode des potentiels. — On monte la pile en circuit avec une résistance R . On lit E avant la fermeture du circuit et e après la fermeture du circuit sur la résistance R .

$$I = \frac{E}{R+r} = \frac{e}{R}$$

d'où

$$r = \frac{E - e}{e} R.$$

266. Méthode des appareils étalonnés. — On monte en circuit un ampèremètre étalonné et on lit I en ampères et e aux bornes en volts après avoir déterminé E avant la fermeture du circuit. On en déduit r de la formule

$$r = \frac{E - e}{I}.$$

Le maximum d'exactitude est obtenu pour $e = \frac{1}{2} E$.

GÉNÉRATEURS A FORCE ÉLECTROMOTRICE PÉRIODIQUE.

267. Courants alternatifs. — La force électromotrice d'un générateur d'énergie électrique peut, au lieu d'être constante, comme nous l'avons supposé jusqu'ici, être variable en fonction du temps d'une manière quelconque. Un cas intéressant en pratique, parce que nous le retrouverons réalisé théoriquement dans certains générateurs d'induction électromagnétique, — et sensiblement réalisé en pratique dans un grand nombre de machines industrielles, — est celui pour lequel la force électromotrice varie *périodiquement*, change de signe deux fois par cycle, et produit dans le circuit des courants périodiques *alternatifs*. Il y a donc intérêt à établir la théorie générale de ces générateurs et à bien préciser les termes qui entrent dans leur définition et leur mesure. Nous prendrons comme loi de variation périodique une *sinusoïde*, et nous étudierons les courants sinusoïdaux comme se rapprochant le plus des conditions ordinaires de l'application.

Conditions de fonctionnement à l'instant t . — Soient

E_t la force électromotrice des générateurs à l'instant t .

E_{\max} sa force électromotrice maxima.

R la résistance électrique *totale* du circuit, y compris celle du générateur.

I_t l'intensité à l'instant t .

I_{\max} l'intensité maxima du courant.

T la durée d'une *période* ou d'un cycle complet.

La force électromotrice aura pour expression

$$E_t = E_{\max} \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad (1)$$

t étant le temps compté à partir de l'origine, lorsque la force électromotrice est nulle.

On a pour l'intensité I_t , en appliquant la loi d'Ohm :

$$I_t = \frac{E_{\max}}{R} \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad (2)$$

et pour la *puissance totale* à l'instant t :

$$P_t = E_t I_t = \frac{E_{\max}^2}{R} \sin^2 2\pi \frac{t}{T}. \quad (3)$$

La figure 129 montre comment varient ces trois facteurs pendant la période T . La force électromotrice et l'intensité du

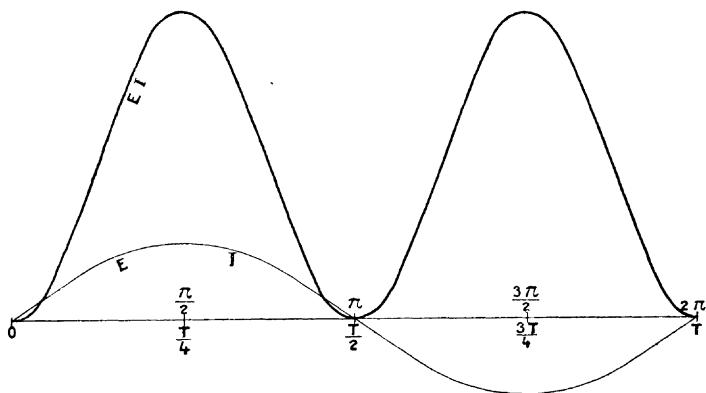


Fig. 129. — Variations de l'intensité, de la force électromotrice et de la puissance en fonction de la période dans un générateur de courants alternatifs.

courant croissent pendant un quart de la période, deviennent maxima pour $t = \frac{T}{4}$, nuls pour $t = \frac{T}{2}$, redeviennent maxima, mais en sens contraire, pour $t = \frac{3T}{4}$ et redeviennent nuls pour $t = T$ lorsque le cycle est terminé, et ainsi de suite. La *période* ou *temps périodique* T est le temps mis par la force électromotrice à décrire un cycle complet de variation ; la durée qui sépare

deux changements de signe de la force électromotrice et de l'intensité est égale à une demi-période.

Éléments de fonctionnement moyen. — L'ordonnée moyenne de la sinusoïde représentant la force électromotrice à l'instant t n'est pas autre chose que la *force électromotrice moyenne*. Une relation correspondante définit l'*intensité moyenne* du courant, bien que la quantité d'électricité qui a traversé le circuit pendant une période soit algébriquement nulle, les quantités produites pendant les deux demi-périodes étant égales et de signes contraires.

$$\text{Force électromotrice moyenne : } E_{\text{moy}} = \frac{2}{\pi} E_{\text{max}} = 0,6366 E_{\text{max}}. \quad (4)$$

$$\text{Intensité moyenne : } I_{\text{moy}} = \frac{E_{\text{moy}}}{R} = \frac{2E_{\text{max}}}{\pi R} = 0,6366 I_{\text{max}}. \quad (5)$$

Énergie totale fournie dans la demi-période : L'énergie élémentaire produite en un temps dt est, en vertu de la loi de Joule

$$dW = RI_t^2 dt$$

et pour la demi-période

$$W = R \int_0^{\frac{T}{2}} I^2 dt = RI_{\text{max}}^2 \int_0^{\frac{T}{2}} \sin^2 2\pi \frac{t}{T} dt,$$

mais

$$\int_0^{\frac{T}{2}} \sin^2 2\pi \frac{t}{T} dt = \frac{T}{4}$$

d'où

$$W = \frac{RI_{\text{max}}^2 T}{4}. \quad (6)$$

Puissance moyenne. — La puissance moyenne correspondante P_{moy} est alors

$$P_{\text{moy}} = \frac{2W}{T} = \frac{RI_{\text{max}}^2}{2}. \quad (7)$$

Mais la puissance moyenne a une autre expression, car si l'on désigne par le symbole $(I^2)_{\text{moy}}$ la moyenne des carrés de l'intensité, on a évidemment, d'après la loi de Joule

$$P_{\text{moy}} = R(I^2)_{\text{moy}} \quad (8)$$

On déduit de (7) et (8)

$$(\mathbf{I}^2)_{\text{moy}} = \frac{\mathbf{I}_{\text{max}}^2}{2}$$

et, en désignant par le symbole $\sqrt{(\mathbf{I}^2)_{\text{moy}}}$ la racine carrée de la moyenne des carrés de l'intensité

$$\sqrt{(\mathbf{I}^2)_{\text{moy}}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{I}_{\text{max}}. \quad (9)$$

Nous établirons un peu plus tard que les appareils de mesure ordinairement employés pour les courants alternatifs font connaître, non pas l'intensité moyenne, mais bien la racine carrée de la moyenne des carrés de l'intensité, le seul facteur qui intervienne d'ailleurs dans les calculs. Dans le cas d'un courant sinusoïdal

$$\frac{\mathbf{I}_{\text{moy}}}{\sqrt{(\mathbf{I}^2)_{\text{moy}}}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9006. \quad (10)$$

La puissance moyenne a aussi pour expression, en adoptant les notations correspondantes pour la force électromotrice

$$\mathbf{P}_{\text{moy}} = \frac{(\mathbf{E}^2)_{\text{moy}}}{\mathbf{R}} \quad (11)$$

et

$$\frac{\mathbf{E}_{\text{moy}}}{\sqrt{(\mathbf{E}^2)_{\text{moy}}}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9006 \quad (12)$$

C'est $\sqrt{(\mathbf{E}^2)_{\text{moy}}}$ et non pas \mathbf{E}_{moy} que les appareils de mesure déterminent.

La mesure de $\sqrt{(\mathbf{E}^2)_{\text{moy}}}$ s'effectue à l'aide d'un électromètre homostatique (227) ou d'un voltmètre thermique.

La puissance moyenne développée dans un circuit alimenté par une force électromotrice périodique (1) a pour valeur, en multipliant les équations (8) et (11)

$$(\mathbf{P}_{\text{moy}})^2 = \frac{(\mathbf{E}^2)_{\text{moy}}}{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{R} (\mathbf{I}^2)_{\text{moy}}$$

d'où

$$\mathbf{P}_{\text{moy}} = \sqrt{(\mathbf{E}^2)_{\text{moy}}} \sqrt{(\mathbf{I}^2)_{\text{moy}}} \quad (13)$$

La formule (13) montre que le produit de la force électromo-

(1) Lorsque le circuit n'est le siège d'aucune autre force électromotrice.

trice moyenne par l'intensité moyenne ne représente pas la puissance moyenne réelle.

Ces notions générales seront complétées lorsque nous étudierons plus en détail les générateurs d'énergie électrique à courants alternatifs, dans des cas plus complexes où le circuit peut être le siège de forces électromotrices de self-induction, d'induction mutuelle et d'induction magnétique.

268. Courants redressés, ondulatoires et pratiquement continus. — Si, à l'aide d'un mécanisme convenablement disposé, les communications du circuit extérieur avec le générateur à force électromotrice périodique sinusoïdale sont inversées à chaque demi-période, lorsque la force électromotrice passe par zéro, le générateur est toujours traversé par des courants alternatifs, mais le circuit extérieur reçoit des courants toujours de même sens appelés *courants redressés*. Ces courants passent par zéro, mais ne changent jamais de signe.

Concevons maintenant un petit nombre de générateurs égaux pour lesquels le courant passe par zéro à intervalles décalés d'un quart de période s'ils sont au nombre de deux, d'un sixième s'ils sont au nombre de trois, etc. Ces générateurs sont toujours couplés en tension et ont leurs communications avec le reste du circuit inversées deux fois par période, au moment où la force électromotrice de chacun d'eux passe par zéro. Le courant traversant le circuit extérieur est *ondulatoire*, c'est-à-dire qu'il subit des variations périodiques d'autant plus accentuées que le nombre des générateurs en tension est plus petit. Lorsque les générateurs sont au nombre de deux, le courant périodique passe par zéro deux fois par période, le courant est *redressé*. Avec trois générateurs, il ne passe plus par zéro, mais conserve une allure fortement *ondulatoire*.

En augmentant considérablement le nombre des générateurs élémentaires, en le portant à 20, 25, 30 et jusqu'à 50 en tension, les ondes deviennent extrêmement nombreuses et peu accentuées, et le courant *pratiquement continu*, bien qu'un téléphone intercalé dans le circuit ou branché entre deux points quelconques permette de constater ces petites variations par un ronflement continu dont la hauteur est inversement proportionnelle au temps périodique, et proportionnelle au nom-

bre de générateurs élémentaires. Les machines magnéto et dynamo-électriques à courants continus ne produisent, en réalité, que des courants ondulatoires dont les ondes ont une faible amplitude et une grande fréquence (100 à 600 par seconde).

Lorsqu'on intercale dans le circuit d'une machine produisant des courants redressés ou fortement ondulatoires un appareil mesurant $\sqrt{(I^2)_{\text{moy}}}$ et un ampèremètre ou galvanomètre étalonnés ensemble sur un courant *continu* — fournissant dans ce cas des indications concordantes — on constate que l'ampèremètre *retarde*, et d'autant plus que le courant est plus ondulatoire, car l'ampèremètre dévie proportionnellement à I_{moy} et nous avons établi (267) que I_{moy} est plus petit que $\sqrt{(I^2)_{\text{moy}}}$. L'emploi de l'ampèremètre n'est donc légitime que si le courant ondulatoire à mesurer diffère assez peu d'un courant continu.

Un électromètre idiostatique (227) dont la période d'oscillation est très petite relativement à la durée de la période d'un générateur périodique à courants continus ou à alternatifs, préalablement étalonné sur un courant continu permet de mesurer $\sqrt{(E^2)_{\text{moy}}}$ entre les deux points où il est établi. En effet, le couple exercé à chaque instant entre l'aiguille et les secteurs est proportionnel au *carré* de la différence de potentiel entre ces secteurs, la position moyenne d'équilibre que prend l'équipage mobile est donc proportionnelle à la *moyenne* des carrés de la différence de potentiel, et par suite à $\sqrt{(E^2)_{\text{moy}}}$. Cela suppose que la charge du condensateur formé par l'électromètre est à chaque instant proportionnelle à la différence de potentiel E_t à l'instant t , ce qui est pratiquement vrai, eu égard à la faible capacité de l'électromètre et à la faible résistance des fils de liaison.

Avec les voltmètres industriels fondés sur les actions électromagnétiques (210) le phénomène se complique des effets de self-induction, et une série d'appareils donnant des indications concordantes sur une différence de potentiel constante cessent de concorder — souvent dans de grandes proportions — si le courant est ondulatoire et, *à fortiori*, redressé. Ces divergences, que nous devons signaler dès à présent, ont des causes qui seront indiquées plus tard.

CHAPITRE VIII

QUANTITÉS ET CAPACITÉS MÉTHODES BALISTIQUES

269. Définitions. — Lorsque deux corps conducteurs isolés sont portés à des potentiels différents, ils prennent une certaine charge Q définie par la relation

$$Q = VC$$

V étant la différence de potentiel et C la capacité du système. Cette capacité définie par le rapport $\frac{Q}{V}$ peut se calculer dans quelques cas simples déjà étudiés en électrostatique (**123**).

Si nous considérons, par exemple, un système formé par deux plans conducteurs parallèles très rapprochés de surface S , à la distance d , la capacité C a pour valeur

$$C = k \frac{S}{4\pi d}$$

k étant la capacité inductive spécifique du diélectrique (**129**).

Cette équation montre que l'on peut augmenter la capacité en diminuant la distance et en augmentant la surface ainsi que la capacité inductive spécifique. Toute disposition permettant d'obtenir une grande capacité sous un petit volume constitue un *condensateur*. Suivant la nature du diélectrique interposé entre les conducteurs, on distingue les condensateurs à air et condensateurs à diélectrique solide.

Les premiers constituent des condensateurs parfaits, car ils

ne présentent pas de phénomènes secondaires, résidus et absorption (274) des condensateurs à diélectrique solide. On les appelle quelquefois des *condensateurs absolus* parce qu'on peut, lorsqu'ils affectent des formes géométriques simples, déduire leur capacité de leurs dimensions. C'est par eux que nous commencerons notre étude.

CONDENSATEURS PARFAITS OU ABSOLUS.

270. Condensateur à air. — On peut réaliser pratiquement un condensateur parfait en employant deux cylindres

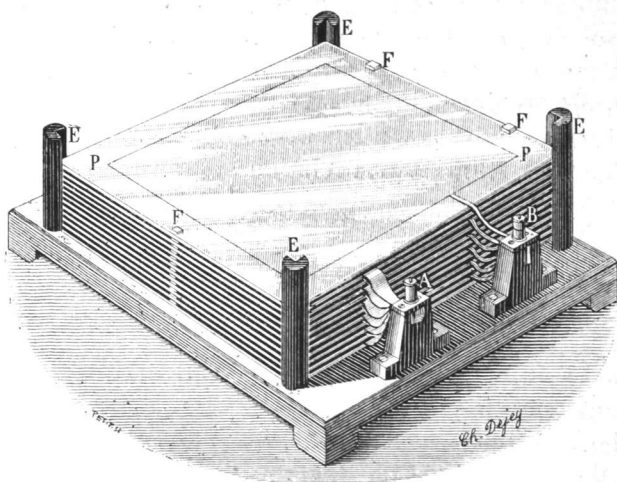


Fig. 130. — Condensateur à air.

concentriques, deux disques parallèles rapprochés séparés par une lame d'air, etc. Pour construire un *condensateur à air étalon* (1), on prend une série de lames de verre bien planes de 3 millimètres d'épaisseur recouvertes de papier d'étain sur leurs deux faces, les feuilles d'étain étant en communication électrique.

Les lames impaires sont entièrement recouvertes de papier d'étain et ont environ 30 centimètres de côté ; les lames paires

(1) W. E. Ayrtton, *Practical electricity*, § 180.

laissent un rebord de 2,5 centimètres non recouvert, comme on le voit en P (fig. 130). La première feuille forme l'armature extérieure du condensateur, les autres lames de verre sont empilées alternativement et séparées par de petits blocs de verre F de 2,5 millimètres d'épaisseur. Il y a n lames paires et $n + 1$ lames impaires, pour que les feuilles impaires terminent le condensateur ainsi disposé.

Les feuilles d'étain paires communiquent entre elles et avec une borne A, les feuilles impaires avec la borne B. Les piliers en ébonite E ont pour but d'empêcher les lames de verre de glisser lorsque l'on déplace le condensateur.

En appelant S la surface *totale* des feuilles d'étain *paires* du condensateur en centimètres carrés et l leur distance en centimètres, épaisseur des blocs de séparation, la capacité du condensateur ainsi construit est

$$C = \frac{S}{4\pi l} \text{ centimètres.}$$

$$C = \frac{S}{9 \cdot 10^{20} 4\pi l} \text{ unités électromagnétiques C.G.S. (291)}$$

$$C = \frac{S}{9 \cdot 10^{11} 4\pi l} \text{ farads.}$$

$$C = \frac{S}{9 \cdot 10^5 4\pi l} \text{ microfarads.}$$

Cette valeur n'est qu'approchée, parce que la densité de la charge est plus grande sur les bords; on peut réaliser un condensateur plus exact en employant l'anneau de garde (232) de Thomson. Si S est la surface du disque et S' celle du trou de l'anneau de garde, la capacité du système formé par une plaque et un disque parallèle à une distance l , la distance l étant très petite et la plaque de très grande surface par rapport à celle du disque a pour expression

$$C = \frac{S + S'}{8\pi l}.$$

Pour réaliser un condensateur de capacité variable d'une manière continue, Sir W. Thomson (1871) emploie des cylindres concentriques glissants dont on peut déterminer la capacité par

le calcul et qui permettent d'ajuster des capacités avec une grande précision, mais ces condensateurs ont une très faible capacité et ne sont utilisés que dans les recherches scientifiques.

Le *platymètre* de Sir W. Thomson (1855) est aussi une combinaison de condensateurs à air cylindriques servant à comparer les capacités des condensateurs. Nous indiquerons plus loin des méthodes plus pratiques pour la comparaison des capacités.

Quelles que soient les dispositions adoptées pour la construction d'un condensateur parfait, nous allons étudier les phénomènes de charge et de décharge et d'isolement d'un pareil condensateur, dans le cas général où la résistance du diélectrique n'est pas infinie, mais présente une très grande valeur.

271. Période variable de charge d'un condensateur. — Lorsqu'un condensateur de capacité C est mis en communication avec un générateur de force électromotrice constante E , il ne prend pas instantanément sa charge CE .

L'accroissement de charge CdE pendant un instant dt est égal à la quantité fournie par la source de résistance r moins la quantité qui traverse directement le diélectrique de résistance ρ . En appelant E_t le potentiel de charge à l'instant t ,

$$CdE_t = \frac{E - E_t}{r} dt - \frac{E_t}{\rho} dt$$

d'où

$$\frac{CdE_t}{dt} = \frac{E - E_t}{r} - \frac{E_t}{\rho}.$$

Équation différentielle qui, intégrée, donne

$$E_t = E \frac{\rho}{\rho + r} \left(1 - e^{-\frac{t(\rho+r)}{c\rho r}} \right)$$

Ou, comme ρ est très grand par rapport à r

$$E_t = E \left(1 - e^{-\frac{t}{cr}} \right).$$

La charge acquise au bout du temps t est

$$Q_t = E_t C = CE \left(1 - e^{-\frac{t}{cr}} \right).$$

Cette démonstration suppose la loi d'Ohm applicable à la

charge et à la décharge d'un condensateur, ce qui a été démontré expérimentalement exact par *M. H. Pellat* ⁽¹⁾.

272. Décharge d'un condensateur fermé sur une résistance. — La perte pendant un instant dt est, en appelant R cette résistance

$$-C dE_t = \frac{E_t}{\rho} dt + \frac{E_t}{R} dt$$

d'où

$$-C \frac{dE_t}{dt} = \frac{E_t}{\rho} + \frac{E_t}{R}.$$

En pression qui, intégrée, donne

$$E_t = E_0 e^{-\frac{t(R+\rho)}{CR}}.$$

lorsque ρ est très grand par rapport à R

$$E_t = E_0 e^{-\frac{t}{CR}}.$$

La quantité déchargée pendant le temps t est

$$Q_t = CE_0 e^{-\frac{t}{CR}}.$$

La charge restant dans le condensateur après le temps t est

$$Q_r = CE_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{CR}} \right).$$

273. Décharge d'un condensateur isolé. — La perte pendant un instant dt est proportionnelle à $\frac{E_t}{\rho} dt$, ρ étant la résistance intérieure du condensateur. On a alors

$$-C dE_t = \frac{E_t}{\rho} dt$$

d'où

$$C \frac{dE}{dt} + \frac{E}{\rho} = 0.$$

Expression qui, intégrée, donne

$$E_t = E_0 e^{-\frac{t}{\rho C}}.$$

La charge restant au bout du temps t est

⁽¹⁾ *Journal de physique*, 1881.

$$Q_t = CE_t = Q_0 e^{-\frac{t}{c\tau}}$$

CONDENSATEURS A DIÉLECTRIQUE SOLIDE.

Les condensateurs à air sont coûteux et encombrants : on les remplace en pratique par des condensateurs à diélectrique solide. Ces condensateurs diffèrent entre eux par la forme du condensateur et la nature du diélectrique.

Le verre constitue un excellent diélectrique ayant une grande résistance d'isolement et une grande capacité inductive spécifique, mais il est fragile, aussi préfère-t-on employer un condensateur formé de feuilles d'étain superposées séparées par du mica ou du papier paraffiné ou gomme-laqué.

274. Absorption. — Tous les condensateurs à diélectrique solide présentent la propriété de prendre une charge d'autant plus grande que la mise en communication avec la source a une durée plus grande, et de ne pas se décharger entièrement lorsqu'on réunit les armatures en court-circuit.

C'est cette propriété à laquelle on donne le nom d'*absorption*.

En réunissant les armatures un certain temps après les avoir séparées après une première décharge de courte durée, on observe une seconde décharge moins grande que la première et qui constitue le *résidu* ou *charge résiduelle*.

Ce résidu dépend même, dans une certaine mesure, des charges antérieures reçues par le condensateur. On peut ainsi superposer des charges alternativement dans un sens et dans l'autre.

Clausius et Clerk-Maxwell s'accordent à attribuer l'absorption électrostatique à un défaut d'homogénéité du diélectrique.

C'est le mica qui, après le spath d'Islande, présente au plus faible degré la propriété d'absorption et qui doit être employé de préférence dans la construction des condensateurs étalons pratiques. Il importe donc, dans la comparaison des capacités, de bien spécifier le temps de charge, afin de placer les condensateurs comparés dans des conditions équivalentes d'absorption, et de ne définir la capacité inductive spécifique que rapportée à une charge *instantanée*, c'est-à-dire à une charge de très courte durée.

Les condensateurs à diélectrique solide ont ainsi une plus grande résistance à l'étincelle disruptive que les condensateurs à air. Cette propriété est indépendante de la capacité inductive spécifique et constitue une résistance de nature mécanique. Les chiffres permettant de comparer les diélectriques entre eux au point de vue de cette rigidité électrique font encore défaut.

275. Capacité inductive ou pouvoir inducteur spécifique. — Nous avons défini la capacité inductive spécifique en électrostatique (129) et donné quelques valeurs de ce coefficient pour les substances les plus connues, rapportées à des charges de très courte durée.

Le phénomène d'absorption (274) a pour effet de rendre la capacité inductive spécifique fonction du temps de charge, aussi faut-il tenir grand compte, dans les mesures et les comparaisons des capacités, des temps de charge et de décharge des condensateurs formés de diélectriques présentant à des degrés différents la propriété d'absorption. Certaines méthodes de comparaison des capacités sont indépendantes de ce phénomène et devront être employées de préférence lorsque les diélectriques des condensateurs comparés ne sont pas de même nature.

Les recherches de différents savants ont établi que la capacité inductive spécifique est aussi fonction de tous les facteurs physiques capables de modifier l'état moléculaire d'une substance : température, pression, trempe, état des surfaces, changements moléculaires apportés par le temps, etc.

Dans les mesures industrielles, celles relatives aux câbles sous-marins, par exemple, on a bien soin de spécifier à quelle durée de charge correspondent les capacités et les capacités inductives spécifiques, ainsi que la température. Les mesures sont ramenées, en général, à 24°C. pour les températures, et à 1 minute de charge pour les capacités et les isolements.

Capacité inductive spécifique des liquides. — Les capacités sont fonctions de la durée d'électrisation et les chiffres indiqués par différents expérimentateurs ne concordent entre eux qu'à 10 pour 100 près. Les causes de ces différences peuvent être attribuées en partie aux transports que le liquide peut établir entre les charges des armatures. *M. A. Palaz* (1886) a déterminé les capacités inductives pour des durées d'électrisation de 0,02 seconde.

Les expériences ont été faites sur des condensateurs cylindriques, à l'aide d'une méthode constituant une simple modification du pont de Wheatstone. Les deux condensateurs C_1 , C_2 dont on veut comparer les capacités remplacent la résistance à mesurer et la résistance étalon, les deux autres bras du pont sont occupés par deux résistances variables R_1 , R_2 . En plaçant une source de force électromotrice périodique à la place de la pile, et en réglant les résistances R_1 et R_2 pour rendre silencieux un téléphone (237) substitué au galvanomètre, on a la relation évidente :

$$R_1 C_1 = R_2 C_2.$$

Les résistances R_1 et R_2 doivent avoir des coefficients de self-induction (voy. ce mot) très faibles pour que la méthode donne des résultats exacts.

Il ressort des expériences faites par M. A. Palaz sur le benzol, le toluol et le sulfure de carbone que la capacité inductive spécifique des liquides diminue lorsque la température augmente.

276. Condensateurs étalons à diélectrique solide.

— Le verre constitue un excellent diélectrique très employé dans les bouteilles de Leyde et les jarres (130), mais sa fragilité ne permet pas son emploi industriel, et il est difficile de le faire assez mince pour obtenir de grandes capacités sous un petit volume.

En pratique les *condensateurs étalons* sont constitués par des feuilles d'étain collées sur du papier paraffiné, ou du mica, ce dernier ayant l'avantage de pouvoir être clivé en feuilles très minces, d'avoir une grande capacité inductive spécifique (129) et de présenter fort peu d'absorption.

Les condensateurs sont établis dans des *boîtes de capacités*, et couplés en dérivation ou en tension, de façon à réaliser des capacités variables (131).

277. Le produit de la capacité C d'un système par sa résistance d'isolement ρ est constant. — En considérant, par exemple, deux cylindres concentriques indéfinis et en faisant le produit de la résistance d'isolement du système (188) par sa capacité (124) on trouve

$$\rho C = \frac{\alpha k}{4\pi}.$$

valeur indépendante de la forme et des dimensions du système, et ne dépendant que des qualités de la matière isolante.

Cette relation permet de déterminer la résistance spécifique d'un diélectrique lorsqu'on connaît sa capacité inductive spécifique, ou inversement.

La comparaison des capacités s'effectuant le plus souvent par la comparaison des charges que peuvent prendre des condensateurs portés au même potentiel, nous devons indiquer les méthodes qui permettent de comparer des quantités d'électricité *instantanées*, c'est-à-dire traversant un conducteur en un temps très court, comme celles qui caractérisent la charge et la décharge d'un condensateur (272).

Ces méthodes sont connues sous le nom de *méthodes balistiques* :

MÉTHODES BALISTIQUES.

278. Principe du galvanomètre balistique. — Lorsqu'un courant de durée très courte traverse un cadre galvanométrique, il produit à l'intérieur du cadre un champ galvanique dont l'intensité en un point donné est à chaque instant proportionnelle à l'intensité du courant.

Si une aiguille aimantée est suspendue au milieu de ce cadre, elle reçoit une *impulsion*, et se met à osciller. L'amplitude de l'oscillation dépend des conditions de construction de l'appareil, de la quantité d'électricité qui a traversé le cadre, etc.

On peut établir une relation simple entre l'amplitude de l'oscillation initiale et la quantité d'électricité qui a traversé le cadre, à la condition que l'amortissement soit nul ou négligeable, et que la durée d'oscillation de l'aiguille soit assez longue par rapport à la durée du passage de la quantité d'électricité qui produit l'impulsion, pour que l'on puisse considérer l'aiguille comme n'ayant pas subi de déplacement sensible pendant l'impulsion.

L'appareil ainsi établi constitue un galvanomètre *balistique* et les méthodes dans lesquelles on en fait usage sont des *méthodes balistiques*.

279. Théorie du galvanomètre balistique. — Si un courant I traverse un cadre galvanométrique dont la constante ⁽¹⁾ est k , la force exercée sur l'un des pôles m de l'aiguille est égale à kmI . Si ce courant passe pendant un temps élémentaire dt , il lui communique une quantité de mouvement égale à l'impulsion élémentaire de la force,

$$Fdt = kmI dt = mk dQ,$$

en appelant dQ la quantité élémentaire d'électricité qui traverse le cadre pendant le temps dt . L'aiguille oscille sous l'impulsion de cette force en l'assimilant à un pendule simple oscillant sous l'action de la pesanteur, sa vitesse maxima est

$$v = \sqrt{2ga}.$$

En appelant M la masse de la moitié de l'aiguille, on a pour expression de la quantité de mouvement (30),

$$Mv = \sqrt{2gM^2a}$$

et comme Mg est la force agissant sur le pendule, force correspondant à mH , la formule devient

$$Mv = \sqrt{2mH \cdot aM}.$$

Mais, sur la figure 131, en appelant ϵ le demi-angle d'oscillation

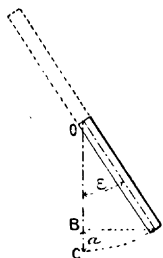


Fig. 131.

$$a = l(1 - \cos \epsilon) = 2l \sin^2 \frac{\epsilon}{2}$$

et

$$Mv = \sqrt{4mHMl \sin^2 \frac{\epsilon}{2}}$$

d'où, en appliquant le principe des quantités de mouvement (30)

$$kmQ = 2 \sin \frac{\epsilon}{2} \sqrt{mHM}$$

et

$$Q = 2 \sqrt{\frac{lHM}{k^2 m}} \sin \frac{\epsilon}{2}.$$

(1) Pour un galvanomètre des tangentes $k = \frac{2\pi n}{r}$.

La quantité d'électricité qui traverse le galvanomètre est donc proportionnelle au sinus du demi-angle d'impulsion, et, pour de petits angles, à l'écart ε .

Les conditions de sensibilité absolue maxima sont : un cadre formant un grand nombre de tours, une aiguille courte, de faible masse, fortement aimantée et un champ magnétique directeur peu intense.

Lorsque le galvanomètre obéit à la loi de tangentes, la formule du galvanomètre balistique peut prendre une autre forme (1). Si on appelle :

Q la quantité d'électricité traversant le galvanomètre balistique dont l'amortissement est nul ;

T le temps périodique d'oscillation de l'aiguille, ou durée d'une oscillation double ;

I l'intensité du courant produisant une déviation de α degrés ;

ε l'écart en degrés produit par la quantité d'électricité Q.

On démontre facilement que

$$Q = \frac{T}{\pi} I \frac{\sin \frac{\varepsilon}{2}}{\tan \alpha}.$$

Dans le cas de faibles déviations, si on appelle α et ε les lectures sur l'échelle divisée, la formule ci-dessus devient :

$$Q = \frac{TI\varepsilon}{2\pi\alpha}.$$

(T en secondes, I en ampères, Q en coulombs).

280. Galvanomètre balistique amorti. — Lorsque l'amortissement est faible, mais non négligeable, on peut en tenir compte en lisant deux élongations successives ε' et ε'' et en prenant pour valeur réelle de ε

$$\varepsilon = \varepsilon' + \left(\frac{\varepsilon' - \varepsilon''}{4} \right).$$

Si λ est le *décroissement logarithmique népérien* du galvanomètre (45), on obtient une correction tenant compte de l'amortisse-

(1) La formule transformée s'obtient en appliquant les lois des oscillations et celles du galvanomètre des tangentes.

ment en multipliant la lecture ε par le facteur $1 + \frac{\lambda}{2}$. La formule exacte devient

$$Q = \frac{TI}{2\pi} \cdot \frac{\varepsilon}{z} \left(1 + \frac{\lambda}{2} \right).$$

Lorsque l'amortissement est grand, la formule devient extrêmement compliquée, il est alors préférable de ne pas utiliser le galvanomètre comme balistique absolu, mais il reste néanmoins exact, et donne des écarts proportionnels aux quantités d'électricité qui le traversent, pourvu que la durée du courant soit courte relativement à la période d'oscillation. Le galvanomètre Wiedemann-d'Arsonval (204) est tout particulièrement approprié aux mesures balistiques.

281. Influence du shunt dans les méthodes balistiques. — Lorsqu'on shunte un galvanomètre balistique, la proportionnalité des écarts aux quantités d'électricité ne paraît plus satisfaite, en tenant compte, bien entendu, du pouvoir multiplicateur du shunt. Cela tient à ce que l'introduction du shunt modifie en général les conditions d'amortissement du galvanomètre, et que la formule n'est rigoureusement vraie que pour un amortissement *nul*. Lorsque l'amortissement est faible, il faut multiplier l'écart par le facteur $\left(1 + \frac{\lambda}{2} \right)$, λ étant le décrement logarithmique du galvanomètre balistique, décrement qui est fonction de la résistance du shunt et que l'amortissement est une fonction de la valeur du shunt.

Enfin, le courant ne se partage en raison inverse des résistances que si l'aiguille reste immobile pendant toute la durée de la décharge, ce qui n'est pas réalisé en pratique et fausse les indications.

M. *Latimer Clark* (1873) a montré le fait en employant deux galvanomètres identiques, le premier shuntant le second. En déchargeant une quantité donnée d'électricité à travers les deux galvanomètres, les deux écarts sont égaux, mais si l'on fixe l'une des aiguilles, et qu'on répète l'expérience, l'écart est moins grand, et il passe une quantité plus grande dans le galvanomètre dont l'aiguille a été immobilisée. Les phénomènes d'induction magnétique expliquent facilement ce fait.

282. Mesure indirecte des quantités d'électricité.

— Lorsque la quantité d'électricité qui traverse un circuit ne passe pas en un temps très court, la méthode balistique n'est plus applicable, il faut alors avoir recours à des méthodes *indirectes*, on a des appareils spéciaux appelés *compteurs* (de quantité) d'électricité.

Lorsque le courant est continu et *constant*, la mesure du temps de passage du courant et celle de l'intensité du courant font connaître par leur produit la quantité d'électricité correspondante, en vertu de la loi de Faraday.

Lorsque le courant est variable, il faut déterminer l'intensité à chaque instant et faire l'intégrale $\int I dt$. Nous en verrons un exemple dans l'étude de la décharge des accumulateurs (chap. IX).

283. Compteurs d'électricité. — On désigne sous ce nom les appareils qui permettent de déterminer industriellement la quantité totale d'électricité qui a traversé un circuit pendant un temps donné : ils effectuent l'intégrale

$$Q = \int_0^T I dt$$

et font connaître Q en coulombs ou en ampères-heure.

Les uns sont fondés sur l'*action chimique* ; nous en indiquons le principe en étudiant l'électrolyse. D'autres constituent des *compteurs-moteurs*, et ne sont qu'un cas particulier des moteurs électriques. Un certain nombre de compteurs (de quantité) d'électricité forment en réalité deux appareils distincts : un mesureur d'intensité et un intégrateur mécanique effectuant l'opération à intervalles fixes ou d'une manière continue.

Les compteurs d'électricité constituant plutôt des appareils industriels que des appareils de mesure seront étudiés à propos des applications industrielles et de la distribution de l'énergie électrique.

APPLICATIONS DES CONDENSATEURS ET DE LA MÉTHODE BALISTIQUE.

284. Comparaison de la force électromotrice des piles. — *Méthode de Law.* — On charge un condensateur

successivement avec deux piles E et E', et on le décharge chaque fois dans un balistique, on a deux élongations ϵ, ϵ' qui donnent

$$\frac{\epsilon}{\epsilon'} = \frac{E}{E'}$$

On peut faire le montage pour ne lire que l'écart produit par la charge seule, la décharge seule, ou, successivement, la charge et la décharge qui, dans ce dernier cas, doivent donner des élongations égales et de sens contraire. La méthode de Law a l'avantage de ne pas polariser les piles à mesurer.

285. Mesure de la résistance intérieure d'une pile. *Méthode de Munro.* — On établit le montage ci-dessous (fig. 132). En appuyant sur la clef K₁, on a une élonga-

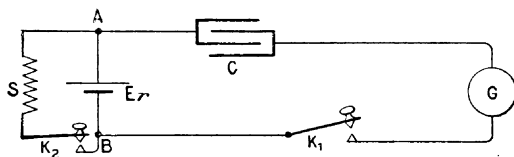


Fig. 132. — Méthode de Munro pour la mesure de la résistance intérieure d'une pile.

tion ϵ proportionnelle à E. On appuie sur la clef K₂ lorsque le balistique est arrêté en tenant la clef K₂ fermée et on lit l'élongation ϵ' en sens inverse proportionnelle à (E - e), décharge partielle du condensateur. On en déduit :

$$r = S \frac{\epsilon'}{\epsilon - \epsilon'}$$

286. Mesure de la résistance d'isolement d'un câble ou d'un condensateur par la perte de charge. — Le câble est chargé au potentiel E₀, et renferme une charge Q₀.

La charge renfermée dans un condensateur abandonné à lui-même au bout du temps t est (273)

$$Q_t = Q_0 e^{-\frac{t}{c_p}}$$

d'où

$$\frac{Q_t}{Q_0} = e^{-\frac{t}{c_p}}$$

En prenant les logarithmes népériens :

$$\frac{t}{C\rho} = \log_e \frac{Q_o}{Q_t}; \quad \rho = \frac{t}{C \log_e \frac{Q_o}{Q_t}}$$

Mais

$$\frac{Q_o}{Q_t} = \frac{CE_o}{CE_t} = \frac{E_o}{E_t} = \frac{\epsilon_o}{\epsilon_t}$$

en appelant ϵ_o l'écart produit par la charge initiale totale, et ϵ_t l'écart produit par la décharge après un temps t . D'où

$$\rho = \frac{t}{C \log_e \frac{E_o}{E_t}} = \frac{t}{C \log_e \frac{\epsilon_o}{\epsilon_t}}$$

Si t est en secondes, et C en microfarads, on a :

$$\rho = \frac{t}{2,3025 C \log_e \frac{\epsilon_o}{\epsilon_t}} \text{ mégohms} = \frac{0,4343 t}{C \log_e \frac{\epsilon_o}{\epsilon_t}} \text{ mégohms.}$$

Perte de la moitié de la charge. — On mesure quelquefois la résistance d'isolement par le temps que met la charge à tomber de moitié. On a alors

$$\log_e \frac{E_o}{E_t} = \log_e 2 = 0,301$$

et

$$t = 0,69314 \rho C.$$

Cette méthode est surtout appliquée pour la mesure de la résistance d'isolement des câbles sous-marins.

287. Mesure des capacités. — On charge deux condensateurs C et C' au même potentiel, et on les décharge dans le galvanomètre balistique en appelant ϵ et ϵ' les élongations :

$$\frac{C}{C'} = \frac{\epsilon}{\epsilon'}.$$

Méthode de de Sauty. — C'est une méthode de réduction à zéro. On établit le montage ci-contre (fig. 133). On fait varier a

et b , jusqu'à ce que la charge et la décharge n'agissent plus sur le galvanomètre. On a alors la relation

$$aC' = bC.$$

On peut substituer à la pile un générateur à courants périodiques et un téléphone au galvanomètre (237).

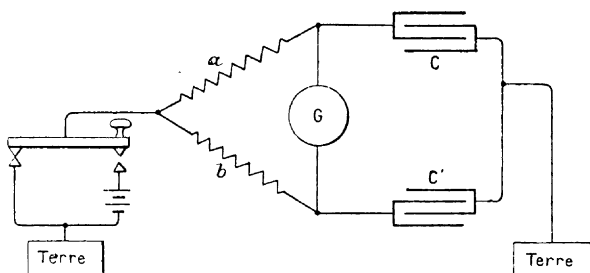


Fig. 133. — Méthode de de Sauty pour la comparaison des capacités des condensateurs.

Méthode de Sir W. Thomson. — Méthode de réduction à zéro. On charge les deux condensateurs C et C' à des potentiels différents (fig. 134), tels que $EC = E'C'$. On mêle les charges

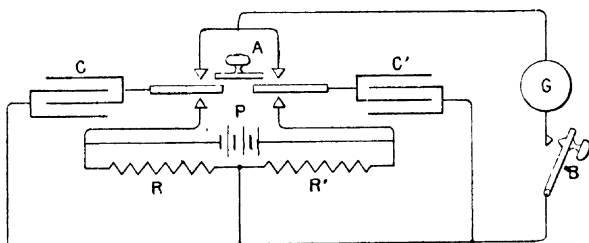


Fig. 134. — Méthode de sir W. Thomson.

et on décharge dans le galvanoscope qui doit rester au zéro. A cet effet, on relie une pile à une résistance $R + R'$, et on cherche entre les deux résistances un point tel que le galvanoscope reste au zéro après le mélange des charges. On a alors

$$CR = C'R'.$$

Cette méthode est surtout employée pour les câbles sous-

marins, et dans tous les cas où les phénomènes d'absorption pourraient fausser la comparaison.

Méthode de Gott. — On fait le montage représenté fig. 135.

On appuie sur la clef A qu'on maintient en position, puis on règle R et R', jusqu'à ce que le galvanoscope reste au zéro en appuyant sur B. On a alors

$$\frac{C}{C'} = \frac{R'}{R}.$$

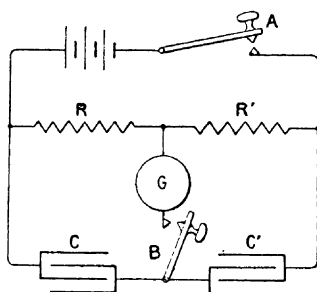


Fig. 135. — Méthode de Gott.

288. Mesure des hauts potentiels. — Étant donnés

deux condensateurs C_1 et C_2 , on

charge le premier à la différence de potentiel à mesurer, on lui fait partager sa charge avec le second condensateur non chargé; on sépare les deux condensateurs, on décharge le second sur lui-même, et on répète n fois l'opération jusqu'à ce que la charge du premier devienne mesurable. En appelant E_0 le potentiel initial, et E_n le potentiel après n partages, il est facile de démontrer la relation

$$E_0 = \left(\frac{C_1 + C_2}{C_1} \right)^n E_n.$$

Si les deux condensateurs C_1 et C_2 ont la même capacité, la formule devient

$$E_0 = 2^n E_n.$$

La méthode permet de ne pas shunter le galvanomètre pour effectuer la mesure du potentiel par la méthode balistique, et de ne pas percer l'isolant par une décharge instantanée trop intense.

On peut aussi employer plusieurs condensateurs de capacités connues montés en cascade (131), sur la différence de potentiel à mesurer. La décharge d'un seul de ces condensateurs permet de calculer le potentiel total à l'aide d'une formule facile à établir.

289. Machine rhéostatique. — L'appareil imaginé en 1877, par *G. Planté* et auquel il a donné le nom de *machine*

rhéostatique a pour but de transformer l'énergie électrique fournie par les piles en augmentant la tension. Il se compose d'une série de condensateurs formés de feuilles de mica recouvertes de feuilles d'étain, disposés de manière à pouvoir être chargés en dérivation et déchargés en tension (fig. 136). Le

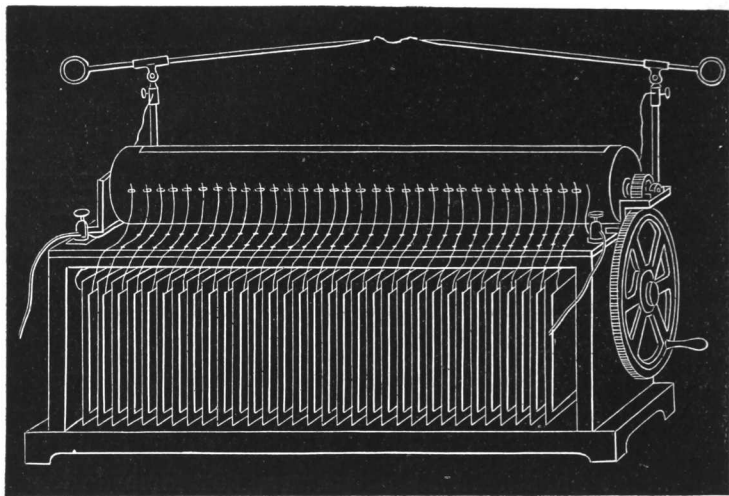


Fig. 136. — Machine rhéostatique de Gaston Planté.

commutateur permettant d'effectuer ces couplages est en ébonite ; les communications avec les condensateurs sont établies à l'aide de lamelles ou fils métalliques en forme de ressorts et de bandes de cuivre fixées sur le cylindre.

En imprimant un mouvement de rotation rapide au cylindre à l'aide d'une manivelle et d'un engrenage, on obtient une série de charges et de décharges successives, dont le potentiel initial est sensiblement égal au produit du potentiel de la pile de charge par le nombre de condensateurs. Ainsi avec 800 éléments secondaires de 2 volts chacun en tension, et 50 condensateurs on peut obtenir un potentiel de

$$800. 2. 50 = 80\,000 \text{ volts}$$

Cet appareil de transformation qui met si bien en évidence la parfaite identité de l'électricité dite dynamique et de l'élec-

tricité dite statique, a conduit Gaston Planté à réaliser un grand nombre d'expériences fort intéressantes, dont l'examen sortirait de notre cadre, et qui sont décrites dans son important ouvrage : *Recherches sur l'électricité*.

**RELATIONS ENTRE
LES GRANDEURS ET LES UNITÉS DES SYSTÈMES
ÉLECTROSTATIQUE ET ÉLECTROMAGNÉTIQUE C.G.S.**

290. Définition de ν . — En désignant respectivement par des lettres minuscules et les lettres majuscules correspondantes, dans les systèmes électrostatique et électromagnétique, les cinq quantités électriques fondamentales : quantité, force électromotrice, intensité, résistance et capacité, en prenant les dimensions de ces quantités dans les deux systèmes et en faisant leurs rapports, on trouve, en désignant par ν une quantité physique particulière ayant les dimensions d'une vitesse, les relations suivantes :

$$\frac{q}{Q} = \nu; \quad \frac{i}{I} = \nu; \quad \frac{c}{C} = \nu^2; \quad \frac{e}{E} = \nu^{-1}; \quad \frac{r}{R} = \nu^{-2}.$$

Les dimensions d'une même quantité physique exprimée dans les deux systèmes ne diffèrent donc que par le facteur ν , ou l'une de ses puissances. C'est ce facteur ν qu'on appelle souvent : le ν de Maxwell.

Il est facile, en partant des relations ci-dessus, de passer d'un système à l'autre et de déterminer, en fonction de ν , les rapports des unités dans les deux systèmes. La détermination expérimentale de ν et la connaissance de sa valeur exacte présente donc un grand intérêt pratique, puisqu'elle permet d'exprimer rapidement la grandeur d'une quantité physique dans un système lorsqu'elle est connue dans l'autre système.

La méthode générale consiste à mesurer une même grandeur physique dans les deux systèmes et à effectuer le rapport des valeurs trouvées. Ce rapport fait alors connaître ν , ν^{-1} , ν^2 ou ν^{-2} , suivant la nature de la grandeur physique mesurée dans les deux systèmes.

Il faut remarquer à ce sujet que les nombres exprimant une même quantité physique dans les deux systèmes d'unités étant en raison inverse des grandeurs des unités elles-mêmes, si l'on

détermine, par exemple, une quantité d'électricité donnée dont les valeurs numériques soient respectivement q et Q dans les deux systèmes, c'est le rapport $\frac{Q}{q}$ qui fera connaître le nombre d'unités électrostatiques renfermées dans l'unité électromagnétique.

Tableau comparatif des systèmes électrostatique et électromagnétique C.G.S.

NATURE des QUANTITÉS PHYSIQUES.	SYSTÈME ÉLECTROSTATIQUE.		SYSTÈME ÉLECTROMAGNÉTIQUE.		NOMBRE D'UNITÉS C.G.S. électrostatiques dans l'unité électro- magnétique.
	Symbole.	Dimensions.	Symbole.	Dimensions.	
Quantité d'électricité.	q	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	Q	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}$	ν
Potentiel ou F.E.M. .	e	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	E	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-2}$	ν^{-1}
Intensité.....	i	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-2}$	I	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	ν
Résistance.....	r	$L^{-1}T$	R	LT^{-1}	ν^{-2}
Capacité.....	c	L	C	$L^{-1}T^2$	ν^2

291. Détermination expérimentale de ν . — On peut instituer cinq séries d'expériences correspondant aux cinq quantités électriques énumérées dans le tableau ci-dessus. Nous indiquerons ici les plus importantes et les plus faciles à réaliser.

a. Mesure d'une quantité d'électricité. — On charge un condensateur dont on détermine le potentiel de charge dans le système électrostatique avec un électromètre absolu, et la capacité par comparaison avec un condensateur à air absolu. On en déduit la valeur de q en unités électrostatiques.

Le même condensateur chargé au même potentiel est ensuite déchargé dans un galvanomètre balistique étalonné qui fait connaître Q en unités électromagnétiques. Le rapport de la seconde valeur à la première est égal à ν .

b. Mesure d'une différence de potentiel. — On établit entre deux points A et B une certaine différence de potentiel, et on y intercale une grande résistance connue. Un électromètre absolu (232) établi entre les deux points A et B donne la différence de potentiel en unités électrostatiques. Le produit de

l'intensité qui traverse la résistance par la résistance elle-même donne la différence de potentiel en unités électromagnétiques. Le rapport de la première valeur à la seconde est égal à ν .

Résultats. — La moyenne des résultats obtenus par différents expérimentateurs conduit à admettre pour valeur la plus probable, ne différant que de quelques millièmes de la valeur réelle

$$\nu = 3.10^{10} \text{ centimètres par seconde.}$$

$$\nu = 300\,000 \text{ kilomètres par seconde.}$$

Cette valeur, très voisine de celle trouvée pour la vitesse de la lumière, semble devoir confirmer une théorie due à *Maxwell* et établissant un lien étroit entre la lumière et l'électricité. Sans entrer dans ces considérations théoriques, nous utiliserons la valeur moyenne de ν indiquée ci-dessus à établir les relations numériques entre les unités électrostatiques et les unités électromagnétiques C.G.S., relations qui nous permettront d'effectuer facilement les transformations nécessaires pour passer d'un système à l'autre, et nous seront fort utiles dans les applications, pour la détermination des capacités des condensateurs en particulier.

Rapports des unités électrostatiques C. G. S. et des unités électromagnétiques C. G. S. pratiques.

Force électromotrice.

$$1 \text{ unité électrostatique} = 300 \text{ volts.}$$

Intensité.

$$1 \text{ ampère} = 3.10^9 \text{ unités électrostatiques.}$$

Quantité.

$$1 \text{ coulomb} = 3.10^9 \text{ unités électrostatiques.}$$

Capacité.

$$1 \text{ microfarad} = 9.10^5 \text{ unités électrostatiques.}$$

$$1 \text{ farad} = 9.10^{11} \text{ unités électrostatiques.}$$

Résistance.

$$1 \text{ unité électrostatique} = 9.10^{11} \text{ ohms.}$$

292. Capacités des condensateurs de formes géométriques en unités électromagnétiques C.G.S. —

Les formules données en électrostatique se transforment et prennent les formes suivantes, lorsqu'on veut en déduire les capacités, non plus en unités électrostatiques C. G. S., mais en microfarads.

Condensateur plan. — Lorsque la distance d des plans est petite par rapport aux dimensions des surfaces.

$$C = k \frac{S}{11,31 \cdot 10^6 d} \text{ microfarads.}$$

S en centimètres carrés; d en centimètres; k capacité inductive spécifique.

Cylindre de longueur l et de rayon r à une distance d d'un plan indéfini (l , r et d en centimètres).

$$C = k \frac{l}{1,8 \cdot 10^6 \log_e \frac{2d}{r}} \text{ microfarads.}$$

Condensateur cylindrique. — Cas de cylindres concentriques de rayons R et r , et de longueur l en centimètres.

$$C = k \frac{0,2413l}{10^6 \log \frac{R}{r}} \text{ microfarads.}$$

Ces formules sont très employées dans l'étude des câbles sous-marins.

CHAPITRE IX

PHÉNOMÈNES DE CONTACT ÉLECTROCHIMIE

293. Définitions. — Jusqu'à ces dernières années, l'ensemble des phénomènes dans lesquels entre en jeu la transformation de l'énergie d'affinité chimique en énergie électrique et inversement, ont été la cause de longues discussions entre deux écoles scientifiques, l'une ne voulant voir, comme Volta, que l'action du contact, sans considérer le principe de la conservation de l'énergie, l'autre, au contraire, ne voyant exclusivement le siège des forces électromotrices que dans les parties du circuit capables d'exercer entre elles des actions chimiques.

Il semble aujourd'hui à peu près établi que la théorie dite du contact et la théorie dite chimique peuvent se concilier et doivent intervenir toutes deux pour expliquer les phénomènes souvent complexes dont un circuit électrique est le siège.

C'est ce qui paraîtra plus évident lorsque nous aurons indiqué les principes généraux qui régissent les *phénomènes de contact*, et étudié les phénomènes électrochimiques et thermo-électriques dont la séparation nette est, dans bien des cas, si difficile à établir.

PHÉNOMÈNES DE CONTACT.

294. Force électromotrice de contact. — *Volta* a démontré expérimentalement que deux corps de nature différente mis en contact, puis séparés, prennent des charges égales et de signes contraires. L'*électroscope condensateur* convient très

bien à cette démonstration. Une lame composée de zinc et de cuivre est mise en contact par son extrémité cuivre avec le plateau inférieur de l'électroscope, tandis que le plateau supérieur est mis à la terre en le touchant avec le doigt, la lame de zinc étant tenue à la main. Si l'on retire le plateau supérieur, les feuilles d'or de l'électroscope divergent fortement. Cela tient à ce que l'on a communiqué une charge au condensateur formé par les deux plateaux, charge proportionnelle à la capacité du condensateur et à une force électromotrice qui dépend de la température et de la nature des deux métaux en contact. En retirant le plateau supérieur, la capacité a considérablement diminué; la charge restant constante, le potentiel a augmenté. Comme les quantités d'électricité ainsi produites ne dépendent, pour un système donné, que de la capacité du condensateur et de la nature des métaux en contact, il a bien fallu que le point ou la surface de contact des métaux dissimilaires soit le siège d'une force électromotrice à laquelle on a donné le nom de *force électromotrice de contact*, ou d'*effet de Volta*.

La différence de potentiel entre les deux métaux en contact est soumise à une loi que l'on peut énoncer comme loi du contact ou loi de Volta.

295. Loi du contact ou loi de Volta. — *Entre deux corps à la même température et mis en contact, il s'établit une différence de potentiel finie, dépendant de leur nature, mais indépendante de leurs dimensions, de leurs formes, de l'étendue des surfaces en contact et de la valeur absolue du potentiel sur chacun d'eux.*

Les différents métaux peuvent être classés en une série telle que l'un des métaux est toujours positif par rapport à ceux qui le suivent et négatif par rapport à ceux qui le précèdent.

Cette liste, dressée d'abord par Volta, a été complétée par MM. Ayrton et Perry, qui ont déterminé, à l'aide de mesures précises et particulièrement délicates, la valeur *en volts* de la force électromotrice de contact des différents métaux.

La différence de potentiel entre deux métaux quelconques est la somme des différences de potentiel entre les métaux successifs de la série. Le tableau ci-dessous donne les principales

valeurs trouvées par MM. Ayrton et Perry pour les corps les plus usuels :

FORCE ÉLECTROMOTRICE DE CONTACT DES MÉTAUX DANS L'AIR.

	Différences de potentiel en volts.
Sodium	
Magnésium	
Zinc	
Plomb	0,210
Étain	0,069
Fer.	0,313
Cuivre	0,146
Argent	
Or	0,238
Platine	
Graphite	0,113

Par convention, on représente généralement la force électromotrice de contact entre deux corps par le symbole suivant :

$X|Y$.

La valeur numérique de cette force électromotrice indique l'excès du potentiel de Y sur X.

Des forces électromotrices de contact se produisent également entre deux liquides dissemblables, un métal et un liquide, un métal chaud et le même métal froid, et aussi entre les corps non conducteurs de nature dissemblable. Nous en examinerons les principales conséquences au point de vue de la conservation de l'énergie.

296. Loi des contacts successifs. — *Lorsque plusieurs métaux forment une chaîne continue, la différence de potentiel des métaux extrêmes est la même que si ces deux métaux étaient directement en contact.*

Il en résulte la conséquence suivante :

Dans tout circuit métallique dont tous les points sont à la même température, il n'y a jamais de courant, car la somme

des forces électromotrices dues aux contacts successifs est égale à zéro.

La loi de Volta ne cesse pas d'être vérifiée lorsqu'on interpose un liquide dans le circuit, et que ce liquide attaque inégalement les deux lames qui servent à établir la communication avec le circuit extérieur; mais, dans ce cas, le liquide et les métaux en contact avec ce liquide sont le siège de réactions chimiques : les deux métaux, attaqués inégalement, produisent et entretiennent une force électromotrice constante et *positive*, et peuvent alors donner naissance à un courant électrique, si l'on vient à réunir les deux lames par un conducteur extérieur; c'est le principe des piles *hydro-électriques*.

On obtient le même résultat en maintenant l'un des contacts à une température plus élevée ou plus basse que les autres contacts ou soudures. C'est le principe des piles *thermo-électriques*.

Dans le premier cas, l'énergie électrique mise en jeu dans le circuit est empruntée à l'action chimique; dans le second elle provient de la chaleur ou énergie thermique fournie au circuit. Dans un cas comme dans l'autre, le principe de la conservation de l'énergie est satisfait, puisqu'il intervient une source extérieure fournissant au circuit l'énergie qui s'y transforme en chaleur d'après la loi de Joule.

Il n'y a donc aucune incompatibilité entre la théorie dite *du contact* et la théorie dite *chimique*, puisque la loi des contacts successifs doit, pour être appliquée en toute rigueur, tenir compte de *toutes* les forces électromotrices en jeu dans le circuit; les divergences que présentent encore sur quelques points la théorie et l'expérience doivent être attribuées à une connaissance insuffisante des valeurs et des signes de toutes les forces électromotrices qui interviennent dans un circuit aussi complexe que celui d'une pile.

L'action moléculaire spéciale qui produit une force électromotrice de contact entre deux conducteurs sans action chimique réciproque est confinée au voisinage de ce point de contact. En effet, si les deux corps étaient primitivement au même potentiel et présentent une grande capacité électrostatique, il a fallu qu'une quantité d'électricité $Q = EC$ traverse le point de jonc-

tion, et qu'il se dépense une certaine quantité d'énergie pour charger les corps. Évaluons cette quantité d'énergie (1).

Au début, la force électromotrice de contact E , en faisant passer une quantité élémentaire d'électricité dQ d'un corps sur l'autre, dépense une quantité d'énergie $E dQ$ entièrement convertie en chaleur. Un peu plus tard, lorsque la différence de potentiel des deux conducteurs est égale à e , l'énergie dépensée se partage en deux parties, l'une $(E - e)dQ$ sous forme de chaleur, l'autre, $e dQ$, sert à accroître l'énergie potentielle électrostatique du système.

Pour établir la différence de potentiel E entre les deux conducteurs, il faut faire passer une quantité d'électricité égale à Q , et dépenser une quantité totale d'énergie QE ; la moitié de cette énergie est dépensée en chaleur et l'autre moitié augmente l'énergie potentielle du système. Il a donc fallu, en vertu du principe de la conservation de l'énergie, qu'une quantité correspondante d'énergie moléculaire soit absorbée à la jonction, sous une forme encore inconnue. Mais, comme nous pouvons accroître indéfiniment la capacité du système formé par les deux conducteurs, nous pouvons augmenter aussi indéfiniment l'énergie fournie, et la nature de cette énergie doit être telle qu'elle puisse être fournie en quantité indéfinie par un point de contact de grandeur finie maintenu à une température constante. Deux formes d'énergie satisfont seules à cette condition : la chaleur et l'action chimique.

a. Si les corps sont sans action chimique l'un sur l'autre, pour chaque quantité dQ traversant le point de contact dans le sens de la force électromotrice E , cette force électromotrice produit une quantité de travail $E dQ$ et une quantité de chaleur égale est absorbée à la jonction.

Réciproquement, si une quantité d'électricité dQ traverse la soudure en sens inverse, il se dépensera une quantité d'énergie égale à $E dQ$ pour vaincre cette force contre-électromotrice : elle apparaîtra sous forme de chaleur. Nous y reviendrons en *thermo-électricité*, à propos du phénomène de Peltier (348).

b. Si les deux corps peuvent agir l'un sur l'autre, pour

(1) *Philosophical Magazine*, juillet 1888. On electromotive forces of contact, by Charles F. Burton, B. Sc.

chaque quantité dQ qui traverse la jonction, une quantité d'énergie chimique EdQ sera absorbée et une quantité d'action chimique proportionnelle à Q sera produite, ce qui est conforme à la loi de Faraday, comme nous le verrons en électrochimie.

ÉLECTROCHIMIE.

297. Définitions. — *L'électrochimie* comprend l'ensemble des phénomènes dans lesquels entrent en jeu des actions chimiques et des actions électriques. Les systèmes dans lesquels se développent ces actions renferment toujours au moins, en général, un liquide.

Les liquides forment, au point de vue électrique, trois classes distinctes :

1° Les liquides isolants, tels que le pétrole, qui ne se décomposent pas sous l'action d'un courant électrique. Ils constituent des diélectriques.

2° Les liquides conducteurs sans décomposition, tels que le mercure et les métaux fondus, qui agissent comme de simples résistances.

3° Les liquides sur lesquels le courant agit pour modifier leur composition, et qui comprennent les acides étendus, les solutions de sels métalliques et certains composés amenés à l'état de fusion.

Ces modifications de composition se font de deux façons distinctes :

1° Les liquides se combinent à certains corps qu'ils attaquent plus ou moins énergiquement et fournissent de l'énergie électrique. Ce sont les *piles hydro-électriques* ou *piles*.

2° L'énergie électrique fournie à un système modifie la combinaison chimique de ce système. Ce sont les phénomènes d'*électrolyse*.

3° Enfin, certains systèmes peuvent alternativement jouer les deux rôles : ce sont les *piles réversibles*, *piles secondaires* ou *accumulateurs*.

Mais, avant de passer en revue ces différentes formes des actions électrochimiques, nous devons indiquer quelques lois générales qui les régissent toutes.

298. Lois générales des actions électrochimiques.

— Quel que soit le mécanisme intime — et encore inconnu — des actions électrochimiques qui se produisent dans une pile ou dans une cuve électrolytique, il faut que le principe de la conservation de l'énergie soit satisfait.

Dans le cas de la pile hydro-électrique, l'énergie apparaissant dans le circuit est généralement produite par l'énergie chimique de combinaison des substances en présence, et, dans quelques cas, une partie de cette énergie est puisée dans le milieu ambiant.

Dans l'électrolyse, ou séparation des composés par l'action électrochimique, l'énergie potentielle représentée par les corps séparés sera fournie par le courant et, dans quelques cas, une partie de cette énergie sera empruntée au milieu ambiant.

La pile hydro-électrique et la cuve électrolytique ne diffèrent donc l'une de l'autre que par le *signe* des forces électromotrices en jeu et la *nature* de la transformation effectuée.

Les lois qui régissent la pile et la cuve électrolytique au point de vue des quantités d'électricité mises en jeu ont été établies expérimentalement et formulées par *Faraday* (1833).

Les lois de l'électrochimie au point de vue de la conservation de l'énergie et du principe de Carnot résultent d'une série de travaux dus à *Becquerel* (1853), *Favre* (1854), *Raoult* (1864), *Edlund* (1869), *Hirn* (1876), *Braun* (1878), *Thomsen* (1880), *Helmholtz* (1882), etc.

299. Lois quantitatives de l'action électrochimique.

— *La quantité d'action chimique est la même dans tous les points d'un circuit.*

On vérifie cette loi en intercalant dans un circuit plusieurs piles ou voltamètres (317) renfermant des solutions différentes, et en pesant les corps produits ou décomposés. Faraday a appelé *ions* les produits de la décomposition.

La masse d'un corps libéré ou engagé dans une action électrochimique est proportionnelle à la quantité d'électricité qui a traversé le circuit. On le démontre expérimentalement à l'aide de voltamètres (317).

Les masses des corps déposés par une quantité d'électricité donnée sont proportionnelles à leurs équivalents électrochimiques.

On appelle *équivalent électrochimique* d'un ion, le rapport

de la masse de ce ion libérée ou engagée à la quantité d'électricité ayant produit sa libération.

En représentant par z l'équivalent électrochimique, M la masse libérée ou engagée par une quantité Q d'électricité, on a, par définition :

$$z = \frac{M}{Q}$$

Dans le système C.G.S. l'équivalent électrochimique s'exprime en grammes-masse par unité C.G.S. de quantité.

Dans le système C.G.S. pratique, l'équivalent électrochimique s'exprime en grammes-masse ou milligrammes-masse par coulomb.

Lorsqu'on connaît l'équivalent électrochimique de l'hydrogène, on obtient celui de tous les autres corps en multipliant cette valeur de z par l'équivalent chimique de chacun des corps considérés.

La masse M d'un corps libérée ou engagée dans une action électrochimique par un courant d'intensité I passant pendant un temps t est alors :

$$M = zIt.$$

Cette relation est utilisée pour la mesure des courants dans les méthodes *voltamétriques*.

Dans certaines applications industrielles, le coulomb est une unité de quantité trop petite et ne se rapportant pas à l'unité industrielle de temps, l'*heure*; aussi rapporte-t-on les équivalents électrochimiques à l'*ampère-heure* (3600 coulombs).

Voici quelques chiffres relatifs aux équivalents électrochimiques des corps simples les plus usuels :

ÉQUIVALENTS ÉLECTROCHIMIQUES.

	En mg-masse par coulomb.	En grammes-masse par ampère-heure.
Argent	1,11815	4,0250
Cuivre	0,32959	1,1770
Zinc	0,33920	1,2133
Eau	0,09326	0,3357
Hydrogène	0,01036	0,0374
Oxygène	0,08290	0,2983

300. Lois de l'action électrochimique au point de vue de la conservation de l'énergie. — La pile et la cuve électrolytique ne diffèrent que par le signe de la force électromotrice développée à l'intérieur par le fait des actions chimiques.

Dans le cas de la pile hydro-électrique, il y a *production* d'une certaine quantité d'énergie électrique représentée par le produit QE , Q étant la quantité d'électricité produite et E la force électromotrice du générateur électrique.

Dans le cas de la cuve électrolytique, il y a *absorption* d'une certaine quantité d'énergie électrique égale aussi à QE , mais E représente ici une force électromotrice *négative* ou force *contre-électromotrice*, appelée aussi quelquefois *force électromotrice de polarisation*.

L'énergie électrique mise en jeu dans un phénomène électrochimique ne présente généralement qu'une relation assez complexe avec l'énergie chimique qui intervient dans la combinaison : nous y reviendrons plus complètement dans l'étude des piles hydro-électriques.

I. — PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

301. Définitions. — En plongeant dans un liquide deux métaux inégalement attaqués par ce liquide, on constate que le système est le siège d'une force électromotrice, et, si on le ferme sur une résistance extérieure, il produit un courant qui dure autant que l'action chimique elle-même.

L'appareil ainsi constitué est une *pile hydro-électrique*.

Prenons, par exemple, de l'eau acidulée sulfurique, une lame de zinc ordinaire, et une lame de cuivre, de platine ou de charbon plongés dans l'eau acidulée ; on constate une vive attaque du zinc, et il se produit la réaction suivante :



l'hydrogène se dégage et le sulfate de zinc reste en dissolution dans le liquide.

Si le zinc est chimiquement *pur*, il ne se produit une attaque qu'en fermant le circuit extérieur, et l'hydrogène se dégage.

non pas sur le zinc, mais sur le cuivre, le platine ou le charbon. On a alors un *couple*. Avec le zinc impur, les impuretés (fer, arsenic, etc.) forment des *couples locaux* donnant lieu à une action locale et à une consommation de zinc sans énergie électrique équivalente dans le circuit extérieur.

On supprime presque complètement cette action locale par l'*amalgamation du zinc*. Cette amalgamation du zinc produit à sa surface une couche pâteuse dans laquelle certaines impuretés ne se dissolvent pas, le fer par exemple. Elles flottent et sont enlevées par le liquide.

Quelles sont les relations entre l'énergie d'affinité chimique et l'énergie électrique mise en jeu dans le circuit d'une pile, c'est ce que nous allons chercher à établir en indiquant rapidement les transformations nombreuses qu'a reçues la théorie générale de la pile avant de prendre la forme actuelle.

302. Théorie électrochimique de la pile hydro-électrique ⁽¹⁾. — En 1853, M. E. Becquerel avait formulé une proposition établissant l'égalité entre l'énergie électrique traversant le circuit d'une pile et l'énergie chimique dont la pile est le siège pendant le même temps, si la réaction ne produisait aucun courant.

Favre ⁽²⁾ reconnut, à l'aide de son calorimètre, que toute l'énergie due à l'action chimique ne se retrouve pas dans le circuit, et qu'une certaine partie est employée à vaincre une résistance sur la nature de laquelle l'auteur n'osa émettre aucune hypothèse.

M. Raoult (1864), pour justifier ces différences, établissait une distinction entre la chaleur voltaïque et la chaleur chimique, et cherchait à l'attribuer à des réactions parasites.

Eduard (1869) affirma que la quantité de chaleur produite dans les couples par les phénomènes chimiques n'a aucune relation directe avec la chaleur consommée pour produire la force électromotrice, et que cette dernière ne peut être calculée au moyen de la première.

M. Hirn (1876) admit que la chaleur dégagée dans une réac-

⁽¹⁾ P. Duhem, *Le potentiel thermodynamique et ses applications*, 1886. — Lippmann, *Cours de thermodynamique*, 1888.

⁽²⁾ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1858.

tion chimique se compose toujours de deux parties : l'une, transformable en énergie électrique, peut être calculée par la loi de M. E. Becquerel; l'autre est la différence entre la chaleur ou énergie voltaïque et la chaleur ou énergie chimique.

M. Braun (1878) énonça le premier explicitement l'idée que l'on pourrait demander au principe de Carnot la raison de la différence qui existe entre l'énergie voltaïque et l'énergie chimique. Voici les conclusions de M. Braun :

L'énergie électrique se transforme presque intégralement en travail et intégralement en chaleur. L'énergie mécanique se transforme intégralement en chaleur et en énergie électrique. La chaleur ne peut, en général, se transformer intégralement ni en travail mécanique, ni en énergie électrique. On conçoit donc que la force électromotrice d'une pile ne puisse avoir pour mesure la quantité de chaleur dégagée dans la réaction chimique dont cette pile est le siège; cette quantité de chaleur indique seulement la *limite supérieure* de la force électromotrice de la pile.

Parmi les nombreux couples expérimentés par M. Braun, quelques-uns vérifiaient l'égalité indiquée par la loi de Becquerel, mais pour le plus grand nombre, l'énergie chimique était supérieure à l'énergie voltaïque. Pour deux couples cependant l'énergie voltaïque était supérieure à l'énergie chimique :

Argent. — Iodure d'argent. — Iode. — Charbon.

Cadmium. — Iodure de cadmium. — Iode. — Charbon.

Edlund avait aussi trouvé que l'élément argent-sulfate d'argent était dans les mêmes conditions.

C'est à M. von Helmholtz (1882) que revient l'honneur d'avoir établi la théorie complète des phénomènes électrochimiques en s'appuyant sur les principes de la thermodynamique; c'est lui qui en a formulé des lois qui permettent d'expliquer un certain nombre d'anomalies apparentes.

Nous allons donc exposer tout d'abord la théorie chimique pure, telle qu'elle résulte des travaux de Becquerel et de Thomson, et nous indiquerons ensuite la forme nouvelle qu'elle prend en y faisant intervenir les considérations relatives à la thermodynamique dues à M. Helmholtz.

303. Calcul des forces électromotrices par les chaleurs de combinaison. — La force électromotrice de

polarisation représente une production ou une dépense d'énergie suivant que l'énergie potentielle des corps soumis à l'action électrochimique est plus petite ou plus grande qu'avant cette action électrochimique. En supposant une transformation *intégrale* de l'énergie chimique en énergie électrique, on peut calculer la force électromotrice positive ou négative résultant de cette transformation lorsqu'on connaît les états initial et final des corps combinés ou séparés dans l'opération considérée.

Supposons, pour fixer les idées, qu'il s'agisse d'une électrolyse. Soit Q la quantité d'électricité (en coulombs) nécessaire pour séparer une masse M (en grammes) d'une combinaison donnée, et E la force électromotrice de polarisation (en volts). La dépense d'énergie électrique nécessaire pour effectuer cette séparation sera égale à

$$QE \text{ joules.} \quad (1)$$

La masse libérée ainsi est égale à Qz , en appelant z l'équivalent électrochimique du corps considéré (299).

Si, d'autre part, on appelle W la quantité de chaleur (en calories $g-d$) que peut produire le corps en se combinant avec le corps dont il a été séparé pour revenir à l'état initial, cette quantité de chaleur sera égale à W (calories $g-d$);

$$0,425 W \text{ kgm.}; \quad 0,425 \cdot 9,81 W = 4,17 W \text{ joules.} \quad (2)$$

En égalant (1) et (2)

$$QE = 4,17 W; \quad E = 4,17 z \cdot \frac{W}{M}$$

E est la force électromotrice de polarisation en volts.

z l'équivalent électrochimique en grammes-masse par coulomb.

$\frac{W}{M}$ la quantité de chaleur par gramme-masse en calories ($g-d$).

Application à l'électrolyse de l'eau. — Dans ce cas :

$$\begin{aligned} z &= 0,0000105 \text{ gramme-masse par coulomb.} \\ \frac{W}{M} &= 34450 \text{ calories } (g-d) \text{ par gramme-masse.} \\ E &= 1,5 \text{ volt.} \end{aligned}$$

Il faut donc au moins 1,5 volt pour décomposer l'eau, ce qui explique pourquoi un seul élément Daniell ne peut effectuer cette décomposition.

Si la chaleur dégagée est rapportée à l'équivalent en grammes et exprimée en calories (g — d); en appelant W_{eg} cette valeur, la formule précédente se modifie et devient

$$E = \frac{4,17 W_{eg}}{96\,293} = 0,0000433 W_{eg} \text{ volts.}$$

Et si l'on exprime W_{eg} en calories (kg-d) :

$$E = 0,0434 W_{eg} \text{ volts} = \frac{1}{23} W_{eg} \text{ volts.}$$

On obtient *numériquement* la force électromotrice de polarisation en divisant par 23 la quantité de chaleur dégagée par l'équivalent en grammes-masse exprimée en calories (kg-d)⁽¹⁾.

Malheureusement, le calcul que nous venons d'indiquer ne donne de résultats sensiblement exacts que dans un nombre de cas assez restreint.

Parmi les nombreuses causes qui permettent de justifier les divergences entre les forces électromotrices observées et celles déduites de la théorie que nous venons d'exposer, on peut signaler les suivantes ⁽²⁾ :

Réaction effective différant de la réaction théorique supposée. Formation à la surface d'une couche d'oxyde ou de sous-sels plus ou moins faciles à réduire que le sel normal du métal. Effets des gaz dissous, — de l'oxygène en particulier — dans les solutions de sels métalliques. Hydratation ou dissolution des sels formés pouvant, dans certains cas, augmenter ou diminuer la force électromotrice due à la réaction des sels solides. Écarts considérables dans les chiffres donnés jusqu'ici pour représenter les chaleurs de formation de différents corps.

Mais la cause la plus importante est sans contredit celle qui

(1) 1 volt correspond donc numériquement à 23 calories (kg — d), mais ne lui est pas égal, comme on le dit trop souvent, car une force électromotrice ne saurait être égale à une quantité d'énergie.

(2) E. F. Herroun, *Philosophical Magazine*, mars 1889.

résulte des principes mêmes de la thermodynamique, et dont nous allons signaler les principales conséquences.

304. Théorie électrodynamique de la pile réversible. — Le principe sur lequel s'appuie M. Helmholtz pour établir sa théorie de la pile hydro-électrique consiste à considérer une pile comme un système dont l'énergie propre est fonction à la fois et de la quantité d'électricité qui la traverse, et de la température à laquelle elle se trouve portée; la force électromotrice se trouve donc être ainsi une fonction de deux variables indépendantes.

La formule de Thomson et Becquerel se trouve alors modifiée et prend la forme suivante ⁽¹⁾:

$$E = 0,043W_{eg} + \Theta \frac{dE}{d\Theta}.$$

W_{eg} étant la quantité de la chaleur dégagée par la somme des réactions électrochimiques dont la pile est le siège, chaleur en calories ($g-d$) et rapportée à l'équivalent électrochimique en grammes; Θ la température *absolute* de l'élément.

Il résulte de la théorie de M. Helmholtz que tous les éléments dans lesquels il y a excès de l'énergie chimique sur l'énergie électrique ont une force électromotrice qui décroît quand la température s'élève; les éléments dont l'énergie électrique est supérieure à l'énergie électrochimique ont une force électromotrice croissant avec la température.

Dans le premier cas, il y a excès de chaleur produite pendant le fonctionnement et la température s'élève; dans le second cas, l'excès de l'énergie électrique sur l'énergie chimique est emprunté au milieu ambiant: la pile se refroidit par son fonctionnement.

Les expériences de M. *Czapski* ⁽²⁾ et d'autres plus récentes de MM. *P. Chroustchoff* et *A. Sitnikoff* ⁽³⁾ confirment les vues d'Helmholtz, mais l'équation générale qu'il a établie admet des interprétations différentes du phénomène qui concourt à en-

⁽¹⁾ Voyez, pour la démonstration de cette formule, la traduction du mémoire de M. Helmholtz (*Journal de physique*, 1884) et une note de M. *Bouty*.

⁽²⁾ *Journal de physique*, décembre 1885.

⁽³⁾ *Académie des sciences*, séance du 7 mai 1889.

traver la transformation totale de l'énergie chimique en énergie électrique.

L'énergie chimique se compose-t-elle de deux parties bien distinctes, dont l'une seulement, l'énergie *libre*, peut se transformer en énergie électrique, et l'autre partie, l'énergie *liée*, ne peut que se transformer en chaleur, ou bien se produit-il des phénomènes réels, intimement liés à la production du courant et qui contre-carrent la transformation intégrale de l'énergie chimique?

MM. *Chroustchoff* et *Sitnikoff* ont pensé que l'on pourrait trouver l'origine de cette action secondaire dans le *phénomène de Peltier* (voyez ce mot) aux différents contacts des métaux, des liquides et des sels réunis pour former les piles, et ils se sont adressés à l'observation directe pour confirmer ou infirmer leurs prévisions. Ils ont étudié des piles dans lesquelles la force électromotrice observée est plus grande, ou plus petite que la force électromotrice calculée par la formule de Thomson, ainsi qu'une pile dans laquelle la force électromotrice est de signe opposé à la force électromotrice calculée. Il semble résulter de l'ensemble de leurs expériences que l'effet de Peltier donne une valeur de même signe et de même ordre que la différence entre les forces électromotrices calculées et observées, et que c'est à l'intervention des phénomènes secondaires qu'il faut attribuer les différences observées, plutôt qu'à une distinction essentielle entre l'énergie libre et l'énergie liée d'une combinaison électrochimique.

Une pile hydro-électrique est donc, dans les idées modernes, un générateur électrique dont la force électromotrice résultante est la somme algébrique de forces électromotrices produites par les actions chimiques et thermiques. Les incertitudes actuelles résident dans la difficulté que l'on rencontre encore à bien faire le départ entre les deux ordres de phénomènes coexistants.

305. Polarisation. — On désigne sous le nom très général et très vague de *polarisation* l'ensemble des causes d'affaiblissement du courant fourni par une pile donnée travaillant sur un circuit extérieur, affaiblissement qu'il est facile de constater en intercalant un galvanomètre dans le circuit ⁽¹⁾.

(1) M. E. Reynier appelle ce phénomène d'affaiblissement la *fatigue* de la pile.

Les principales causes de cet affaiblissement sont :

1° Dégagement d'hydrogène gazeux qui augmente la résistance intérieure de l'élément.

2° Production d'hydrogène par décomposition de l'eau et produisant une force contre-électromotrice qui se *retranche* de la force électromotrice due à la combinaison.

3° Modification dans la composition *du* ou *des* liquides constituant l'élément, modification qui a pour effet de changer et la nature de l'action chimique, et la résistance intérieure de l'élément.

On combat ces actions nuisibles par des *actions de dépolari-sation* ou des *dépolarisants*, qui forment trois groupes distincts :

a. Actions mécaniques.

b. Actions chimiques.

c. Actions électrochimiques.

a. Dépolarisation mécanique. — Tous les moyens qui facilitent l'échappement des gaz qui se développent à la surface de l'électrode *polarisée* produisent sa dépolari-sation, réduisent la force contre-électromotrice due à la polarisation, ainsi que la résistance intérieure. On obtient ce résultat en remuant la lame positive, en la brossant, en agitant le liquide, en insufflant de l'air ou en faisant circuler le liquide. Ce dernier moyen a l'avantage de conserver l'homogénéité du liquide et de ne pas laisser les parties épuisées en contact avec le métal attaqué. Ces procédés sont aujourd'hui presque totalement abandonnés.

b. Dépolarisation chimique. — Le principe de la dépolari-sation chimique consiste à ajouter à la solution une substance capable d'absorber l'hydrogène résultant de la décom-position de l'eau, et d'empêcher ainsi son dépôt sur le pôle positif (lame négative).

c. Dépolarisation électrochimique. — En entourant la lame négative d'une substance solide ou liquide capable de se décom-poser en absorbant l'hydrogène produit par la décom-position, on réalise une dépolari-sation électrochimique, la force électromotrice de l'élément étant égale à la somme algébrique des forces électromotrices mises en jeu. Dans certains cas, le produit de cette dépolari-sation est un liquide (pile Grove), dans

d'autres un métal solide se déposant sur le pôle positif de l'élément (pile Daniell), ou un oxyde (pile Leclanché).

La nature du dépolarisant et son mode d'emploi peuvent servir de base à une classification des piles résumée dans le tableau ci-dessous. Nous nous contenterons d'indiquer ici le principe des types de chacun des groupes, et ne décrirons avec quelques détails que les *éléments étalons* employés pour la mesure électrique, réservant aux applications les types usuels actuels.

CLASSIFICATION DES PILES.

Suivant la nature plus ou moins complexe des réactions chimiques dont les piles sont le siège, nous les diviserons en plusieurs groupes présentant des caractères communs.

Piles sans dépolarisant, ou à action simple.

Piles à dépolarisant solide.

Piles à dépolarisant liquide.

Piles à deux liquides.

Piles diverses.

306. Piles sans dépolarisant. — La première pile sans dépolarisant est, dans l'ordre historique, la pile classique de *Volta* (1800). Elle se compose, en principe, d'une lame de zinc et d'une lame de cuivre plongeant dans de l'eau acidulée sulfurique. En présence de l'acide et lorsqu'on ferme le circuit, si le zinc est pur ou amalgamé, il se forme du sulfate de zinc et l'hydrogène se dégage sur la lame de cuivre qui ne subit pas d'action notable.

La pile à colonnes ⁽¹⁾, la pile à couronne de lames, les piles de *Cruikshank* (1801), de *Crahay* (1806), de *Children* (1815), la pile en hélice d'*Offershaus* (1821), celle de *Wollaston* (1816), de *Munch* (1841), etc., n'en sont que des modifications ayant pour but d'en faciliter l'emploi, d'en augmenter la durée ou d'en réduire la résistance intérieure.

L'idée d'amalgame le zinc pour empêcher l'action locale appartient à *Kemp* (1820); le zinc amalgamé a été employé pour la première fois dans une pile par *Sturgeon* (1830).

(1) Toutes ces modifications de la pile de Volta sont décrites dans le *Traité théorique et pratique des piles électriques* de A. Cazin et A. Angot, 1881.

On a souvent substitué le charbon au cuivre, et remplacé l'eau acidulée sulfurique par de l'acide chlorhydrique, de l'acide acétique (*Pulvermacher*), du chlorure d'ammonium (*Breguet*), du sel marin (*Duchemin*), etc.

On s'est aussi servi, pour remplacer la lame de cuivre et empêcher l'hydrogène d'adhérer à sa surface, de cuivre pulvérulent (*Poggendorff*, 1840), de platine ou d'argent platiné (*Smée*, 1840), de fer platiné, de charbon platiné (*Walker*, 1859), de plomb platiné (*Ebner*, 1867), etc. Toutes ces dispositions sont aujourd'hui abandonnées en pratique, à cause de l'inconstance du courant fourni par ces différentes piles. La force électromotrice de chacune de ces combinaisons est d'ailleurs assez mal définie, car elle varie avec la durée de fonctionnement qui polarise plus ou moins la lame négative, la composition du liquide qui s'épuise graduellement, etc.

C'est parmi les piles sans dépolarisant que doit figurer l'élément au chlore de *M. R. Upward* (1885) dans lequel le courant est produit par du chlore dissous dans l'eau, et renouvelé par circulation de ce gaz au fur et à mesure de la formation de chlorure de zinc ($E = 2,1$ volts environ).

La pile au sodium et au potassium de *M. Jablochhoff* (1884) est également une pile sans dépolarisant. L'élément est formé d'une lame de charbon et d'un morceau de sodium séparés par une feuille de papier légèrement humide. L'eau qui rend le papier humide est décomposée par le sodium qui s'oxyde et laisse dégager l'hydrogène sur le charbon. La résistance de l'élément et le prix élevé du sodium enlèvent tout intérêt pratique à cette pile. Il en est de même des combinaisons voltaïques dans lesquelles on a cherché à remplacer le zinc par du fer (*de Leuchtenberg*, 1845) ou du charbon (voir Piles diverses). Le zinc est, jusqu'à ce jour, le métal qui se prête le mieux à la production de l'énergie électrique par action chimique, lorsqu'on fait entrer la question économique en ligne de compte.

307. Piles à dépolarisant solide. — Les nombreuses piles formant cette catégorie sont celles dans lesquelles on empêche le développement de l'hydrogène en le fixant chimiquement sur une substance en contact avec la lame négative ou pôle positif. Sous réserve des actions secondaires (304), la force

électromotrice disponible est alors égale à la somme algébrique des quatre forces électromotrices produites par quatre actions électrolytiques distinctes :

1° Combinaison du zinc avec le liquide (+).

2° Décomposition de l'eau (-).

3° Combinaison de l'hydrogène avec le dépolarisant (+).

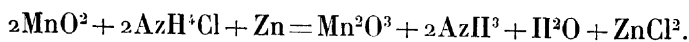
4° Séparation du dépolarisant de la combinaison dans laquelle il est engagé au pôle positif (-).

Le dépolarisant n'aura un effet utile à l'accroissement de la force électromotrice qu'à la condition que la somme des actions électrolytiques (3) et (4) soit positive. Un fait digne de remarque, c'est que dans la première pile à dépolarisant solide due à *A.-C. Becquerel* (1837), dans laquelle le dépolarisant était du sulfate de plomb, et une solution de sel commun, la force électromotrice de la pile ainsi dépolarisée était moindre que celle d'une pile non dépolarisée employant le même liquide excitateur, soit d'environ 0,54 volt avec l'eau salée et 0,49 volt avec l'eau acidulée sulfurique.

De la Rive (1843) a proposé le peroxyde de plomb et le bioxyde de manganèse, avec l'eau acidulée sulfurique comme liquide excitateur; *Warren de la Rüe* et *H. Muller* (1868) emploient le chlorure d'argent avec une solution d'eau salée à 25 grammes par litre, remplacée ultérieurement (1878) par une solution de chlorure d'ammonium.

Leclanché (1868) un mélange de bioxyde de manganèse et de charbon de cornue avec solution de chlorure d'ammonium (fig. 137).

La réaction simple peut, en négligeant les actions secondaires, se représenter par l'équation suivante :



Il se dégage de l'ammoniaque et le peroxyde de manganèse se transforme en sesquioxyde. Lorsque le chlorure d'ammonium est épuisé, il se forme de l'oxyde de zinc au lieu de chlorure et la solution prend un aspect laiteux. Le type à vase poreux a été remplacé par un type à agglomérés, ce qui facilite le remplacement du dépolarisant épuisé. La propriété spéciale à l'élément *Leclanché* de ne rien dépenser à circuit

ouvert en fait un générateur électrique extrêmement précieux pour les usages domestiques, malgré le peu de constance qu'il présente, la dépolarisation s'effectuant pendant les intervalles de repos.

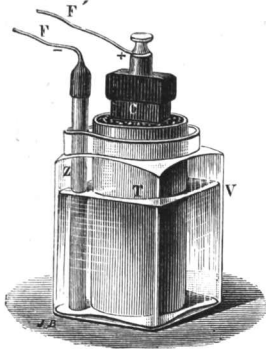


Fig. 137. — Pile Leclanché.

Niaudet (1879) emploie le chlorure de chaux et une solution de chlorure de sodium; *de Lalande et Chaperon* (1882) (fig. 138), du bioxyde de cuivre et une solution de potasse caustique; nous décrirons les types employés en pratique, lorsque nous étudierons les applications industrielles.

308. Piles à dépolarisant liquide. — Le type est la pile de *Poggendorff* (1840) dans laquelle une lame de zinc amalgamé plonge dans une solution de bichromate de potasse dans l'eau

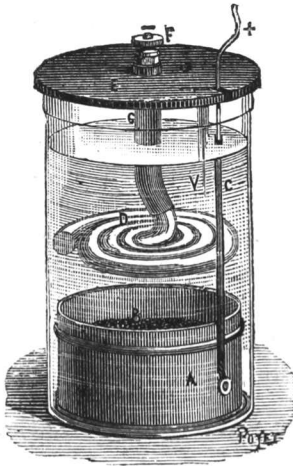


Fig. 138. — Pile de Lalande et Chaperon.

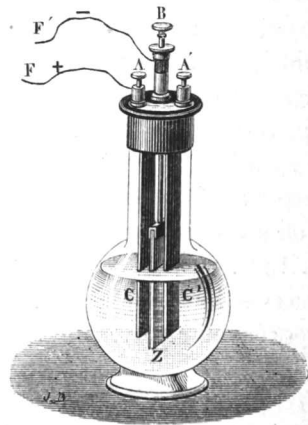


Fig. 139. — Pile au bichromate de potasse. Modèle dit *pile-bouteille* de M. Grenet.

acidulée sulfurique. La force électromotrice est, comme dans les piles à dépolarisant solide, la somme algébrique des forces électromotrices dues aux différentes réactions qui s'effectuent au

sein de l'élément, mais la composition variable du liquide, à la fois excitateur et dépolarisant, fait que la pile est moins constante qu'en séparant les deux liquides, comme dans les piles du groupe suivant.

La pile de Poggendorff a été modifiée dans ses dispositions par M. Grenet (pile bouteille) (fig. 139), MM. Trouvé, GaiFFE, Ducretet (piles à treuil), Dronier (sel solide formé de mélange de bichromate de potasse et d'acide sulfurique), etc. M. Larochelle (1885) emploie un mélange de bichromate de potasse, d'acide chlorhydrique, d'acide sulfurique et d'acide chromique; M. Renard (1886), un mélange chlorochromique formé d'une dissolution d'acide chromique dans l'acide chlorhydrique étendu avec lame négative en argent platiné par laminage et zinc non amalgamé.

309. Piles à deux liquides. — Les piles à deux liquides sont caractérisées par la séparation nettement définie entre le liquide excitateur et le liquide dépolarisant.

La première pile à deux liquides a été construite par A.-C. Becquerel (1829). Un vase de verre était séparé en deux compartiments par une cloison en baudruche. L'un des compartiments renfermait une lame de cuivre et une solution d'azotate de cuivre, l'autre une dissolution d'azotate de zinc et une lame de zinc. Le courant n'était pas très constant, et cette disposition n'est plus employée. La constance d'un élément est d'ailleurs une condition fort difficile à réaliser en pratique, car elle exige que la force électromotrice et la résistance de l'élément restent invariables, c'est-à-dire que la composition des liquides ne change pas pendant le fonctionnement.

L'élément qui réunit le mieux les conditions de constance est la pile Daniell (1836).

Type Daniell. — Sous sa forme actuelle, la pile se compose d'un vase en verre renfermant de l'eau acidulée sulfurique à 5 ou 10 pour 100, une lame de zinc amalgamé et un vase poreux dans lequel est une solution saturée de sulfate de cuivre et une lame de cuivre portant à sa partie supérieure un petit godet en cuivre percé de trous dans lequel on place des cristaux de sulfate de cuivre, pour entretenir la saturation de la solution. Il se forme du sulfate de zinc dans le vase extérieur,

et du cuivre réduit vient se déposer sur la lame placée dans le vase poreux. La réaction peut être représentée ainsi :

Avant l'action :



Après l'action :

Plusieurs modifications ont été apportées à la disposition originale de Daniell. Pour entretenir la richesse de la solution cuivrique, *Vérité* et *Breguet* ont employé un ballon renversé rempli de cristaux et d'une solution de sulfate de cuivre. Pour diminuer la résistance intérieure, *Carré* (1869) emploie un diaphragme en papier parchemin. Pour supprimer le diaphragme, *Meidenger* (1859) et *Callaud* (1861) ont fait une pile à gravité dans laquelle le sulfate de cuivre occupe la partie inférieure de l'élément et le zinc

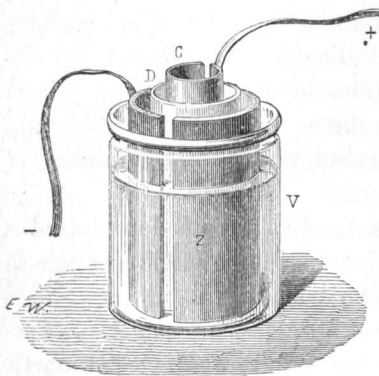


Fig. 140. — Pile Daniell.

la partie supérieure dans de l'eau qui, par le fonctionnement, se charge de plus en plus de sulfate de zinc ; la séparation des liquides s'obtient par la différence des densités. Pour éliminer le sulfate de zinc, *Daniell* (1836) construisait sa pile avec une disposition facilitant l'écoulement du liquide épuisé ; *M. O'Keenan* (1886) a imaginé une disposition ingénieuse remplissant le même but automatiquement.

En remplaçant l'eau acidulée sulfurique par une solution de sulfate de zinc, on obtient une pile assez constante pour servir d'étalon pratique (313).

Le tableau de la page 291 réunissant les principales combinaisons voltaïques indique encore quelques piles à deux liquides dérivées de la pile Daniell et n'en différant que par l'emploi d'autres liquides.

Type Grove. — Dans le type Daniell, la composition du liquide dépolarisant reste invariable ; dans le type Grove, sa composition change avec le fonctionnement de l'élément. La

Forces électromotrices moyennes des combinaisons voltaïques usuelles.

GROUPE.	NOM DE L'ÉLÉMENT.	ANNEE.	LIQUIDE EXCITATEUR.	DÉPOLARISANT.	POLE POSITIF.	FORCE ÉLECTROMOTRICE initiale en volts.
Sans dépolari- sant.....	Volta.....	1800	Eau acidulée sulfurique.	Néant.....	Cuivre.....	0,81
	—	—	—	—	Charbon.....	»
	Upward.....	1885	Chlore dissous.....	—	—	2,10
Dépolarisant solide.....	Warren de la Rue.....	1868	Eau salée.....	Chlorure d'argent.....	Argent.....	1,03
	—	1878	Chlorure d'ammonium..	—	—	1,02
	Leclanché.....	1868	—	Peroxyde de manganèse...	Charbon.....	1,48
	Niaudet.....	1879	Eau salée.....	Chlorure de chaux.....	—	1,60
	De Lalande et Chaperon.	1882	Potasse caustique.....	Bioxyde de cuivre.....	Cuivre ou fer..	0,81
	—	—	Eau acidulée sulfurique.	Peroxyde de plomb.....	Plomb.....	2,35
Dépolarisant liquide....	Poggendorff.....	1840	—	Bichromate de potasse....	Charbon.....	2,00
	Renard.....	1887	Acide chromique.....	Acide chlorhydrique.....	Argent platiné.	?
Piles à deux liquides....	Daniell.....	1836	Eau acidulée sulfurique.	Sulfate de cuivre.....	Cuivre.....	1,10
	Étalon Daniell.....	»	Sulfate de zinc.....	—	—	1,08
	Grove.....	1839	Eau acidulée sulfurique.	Acide azotique.....	Platine.....	1,94
	Bunsen.....	1842	—	—	Charbon.....	1,90
	Latimer-Clark.....	1872	Sulfate de zinc.....	Pâte de sulfate mercurieux.	Mercuré.....	1,435
	Gouy.....	1887	—	Bioxyde de mercure.....	—	1,39

pile de *Grove* (1839) (fig. 141) est une pile à deux liquides dont le dépolarisant est de l'acide azotique dans lequel plonge une lame de platine, remplacée dans la pile de *Bunsen* (1842) par un cylindre creux de charbon artificiel. *Archereau* (1843) a remplacé

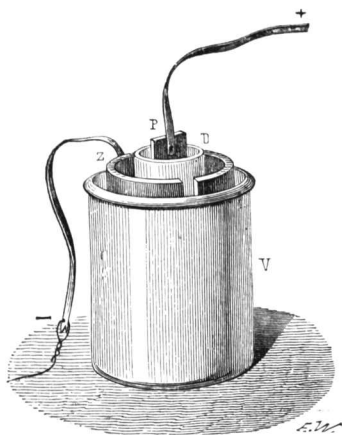


Fig. 141. — Pile Grove.

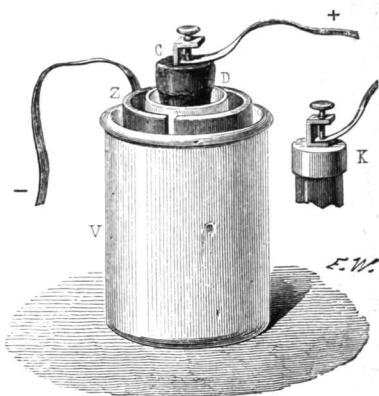
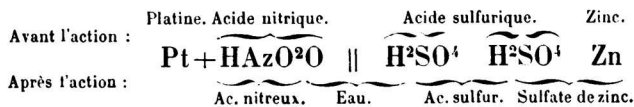


Fig. 142. — Pile Bunsen.

le cylindre de charbon par un prisme de charbon en renversant la disposition de Bunsen et en mettant le dépolarisant au centre, dans le vase poreux (fig. 142). *Ruhmkorff* (1875) a réduit la résistance intérieure de l'élément en lui donnant une forme aplatie, une plaque de charbon dans le vase poreux et un zinc en forme d'U dans le vase extérieur. La réaction dans la pile Grove ou Bunsen peut être représentée ainsi :



Toutes les piles du type Grove ou Bunsen emploient comme pôle négatif du zinc amalgamé et de l'eau acidulée sulfurique comme liquide excitateur. On a essayé de remplacer le zinc par du fer, sans grand succès jusqu'ici. Quant au dépolarisant, on a proposé l'acide chlorhydrique, l'eau régale, les azotates de potasse, de soude et d'ammoniaque, etc., le perchlorure de fer, le chlorate de potasse, etc. Mentionnons encore la pile au sul-

fate de mercure de *M. Latimer-Clark* (1872) qui constitue un étalon aujourd'hui assez répandu (311).

Enfin, l'acide chromique et les solutions de bichromate de soude ou de potasse dans l'eau acidulée sulfurique constituent d'excellents dépolarisants donnant une force électromotrice élevée, n'émettant pas de vapeurs désagréables et dangereuses comme la pile Bunsen, et n'ayant que peu d'action locale en circuit ouvert, à la condition de bien amalgamer le zinc.

310. Piles diverses. — Il n'est pas indispensable d'employer un métal attaqué par la solution pour obtenir un courant électrique. *Volta* avait remarqué que deux liquides et un seul métal pouvaient produire un courant. En 1837 *A.-C. Becquerel* a étudié la question et réalisé une pile à deux liquides et un seul métal. Un vase de verre contenait de l'acide azotique et un vase poreux rempli d'une dissolution de potasse. En plongeant deux lames de platine dans les deux liquides et en les réunissant par un conducteur, on obtenait un courant dû à la combinaison de la potasse avec l'acide azotique. *Wöhler* et *Weber* (1841) ont obtenu un courant avec deux lames de fer plongeant l'une dans l'acide sulfurique concentré, l'autre dans l'acide azotique étendu, etc.

En 1855 *Becquerel* a réalisé une pile à un liquide dans laquelle le corps attaqué est du charbon. Elle se compose d'un creuset de platine rempli d'azotate ou de chlorate de potasse maintenu fondu dans lequel plonge une baguette de charbon. Celui-ci brûle aux dépens de l'oxygène du bain en fusion et l'on obtient un courant en reliant le creuset de platine au charbon par un conducteur. Cette idée a été reprise par *M. Jablochhoff* (1877) et par *M. le D^r Brard* (1882) sans donner de résultats.

Pile à gaz. — En 1842, *Grove* ⁽¹⁾ a construit une pile dans laquelle les éléments actifs sont des gaz capables de se combiner et renfermés dans des tubes de verre au milieu desquels est plongée une lame de platine, les deux tubes étant ouverts à la partie inférieure et plongeant dans un même réservoir renfermant de l'eau acidulée sulfurique.

(1) *Philosophical Magazine*, décembre 1842.

La pile à gaz de Grove peut fonctionner comme accumulateur en décomposant au préalable l'eau acidulée à l'aide d'un courant électrique. En réunissant ensuite les deux lames entre elles et en intercalant un galvanomètre dans le circuit, on constate le passage d'un courant qui dure autant que les gaz eux-mêmes, courant dû à la recombinaison lente des deux gaz à travers l'élément pour reformer de l'eau. Cet appareil présente un grand intérêt scientifique, car il montre la réversibilité du phénomène de décomposition et de recomposition de l'eau, mais la résistance intérieure étant très grande, le débit est faible, ce qui lui enlève toute valeur pratique.

Les piles dites *sèches* doivent aussi figurer parmi les piles diverses. La plus ancienne est celle de *Zamboni* (1812). Elle était constituée par des disques de papier recouverts d'étain sur une face et de bioxyde de manganèse fixé à la colle sur l'autre face. Ces piles ont une grande durée parce que leur résistance intérieure énorme ne leur permet de produire qu'un très faible courant, et de n'épuiser les produits qu'au bout d'un temps très long.

Nous avons signalé toutes ces combinaisons voltaïques pour montrer qu'il est presque toujours possible, théoriquement, d'obtenir un courant électrique en mettant à profit une réaction chimique : parmi les nombreuses combinaisons expérimentées, proposées ou possibles, il n'en est qu'un petit nombre qui ont survécu à cause des commodités qu'elles présentent dans les applications, bien que la production directe de l'énergie électrique par l'action chimique soit l'un des moyens les plus coûteux actuellement connus.

Nous ne décrivons ici que les piles servant aux mesures, réservant aux applications les piles qui ont reçu quelques emplois industriels.

ÉTALONS DE FORCE ÉLECTROMOTRICE.

Pour comparer les forces électromotrices des piles entre elles, il faut un étalon. Cet étalon est, en pratique, constitué par une pile dont on cherche à rendre la force électromotrice aussi constante que possible, en employant des produits purs et des solutions de composition chimique bien connue. Des expé-

riences précises ont fixé, pour chacun des types de pile employé comme étalon, sa force électromotrice en volts légaux à une température donnée ainsi que la variation de cette force électromotrice avec la température.

311. Étalon Latimer Clark. Forme en H. — La forme la plus simple, la plus commode et la plus pratique de l'étalon Latimer Clark est probablement celle connue sous le nom de *pile en H* ⁽¹⁾. L'une des jambes de l'H est remplie en partie d'un amalgame de zinc A obtenu en mettant du zinc pur dans du mercure pur distillé dans le vide ; l'autre jambe M renferme du mercure pur, distillé de même et recouvert de sulfate mercurieux MS.

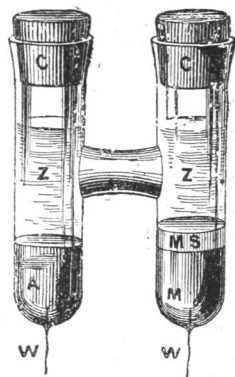


Fig. 143. — Étalon Latimer Clark, forme en H.

Le tout est alors rempli jusqu'au-dessus du tube horizontal d'une solution saturée de sulfate de zinc pur à laquelle on ajoute quelques cristaux pour éviter la sursaturation. On s'oppose à l'évaporation par des bouchons paraffinés C ; les contacts sont établis avec l'amalgame A et le mercure M à l'aide de fils de platine WW soudés dans le verre. On peut aussi employer de la glu marine ou, mieux, fermer hermétiquement les tubes à la lampe.

D'après les expériences de Lord Rayleigh, cette pile donne une force électromotrice très constante, après quelques semaines de repos, à la condition de ne l'utiliser qu'avec l'électromètre ou pour la charge de condensateurs de faible capacité.

Sa force électromotrice est :

$$E_0 = 1,438 [1 - 0,0077 (\theta - 15)] \text{ volt légal.}$$

θ étant la température de l'élément en degrés centigrades.

312. Étalon de M. Gouy ⁽²⁾ (1887). — Cet élément est formé de zinc, sulfate de zinc, mercure et bioxyde de mercure. La forme la plus convenable est celle d'un flacon dont le fond

⁽¹⁾ W.-E. Ayrton, *Practical Electricity*.

⁽²⁾ *Académie des sciences*, séance du 7 mars 1887.

est occupé par le mercure, en couche de 2 à 3 cm. ; un fil de platine scellé dans un tube de verre y pénètre et forme le pôle positif. Le mercure est recouvert d'une couche mince de bioxyde de mercure, et le flacon est rempli de la solution de sulfate de zinc (densité 1,06 correspondant à 10 pour 100 de sulfate cristallisé), dans laquelle plonge un bâton de zinc. On peut rendre l'élément transportable, en enfermant le zinc dans un tube de verre percé d'une très petite ouverture, ou fermé par un fragment de terre poreuse. Ce dispositif donne à l'élément une assez grande résistance, ce qui paraît avantageux dans la pratique. Le zinc distillé pur et le sulfate de zinc pur du commerce peuvent être employés; il est préférable que le zinc soit amalgamé. Le mercure doit être purifié par digestion avec l'acide azotique étendu, soigneusement lavé et filtré. Le bioxyde de mercure jaune, préparé par voie humide, au moyen du bichlorure et de la potasse, paraît le plus convenable. Avec des produits de diverses origines, on obtient une concordance satisfaisante, à 0,001 près. Toutefois, les éléments ne prennent leur force électromotrice normale qu'après un délai de quelques jours, qui paraît nécessaire pour amener le mercure à un état défini. Les éléments peuvent être hermétiquement fermés ou laissés à l'air libre, sans différence appréciable. Ils ne paraissent pas s'altérer avec le temps. La force électromotrice diminue quand la température s'élève; cette variation est comprise entre 0,002 et 0,004 pour l'intervalle de 0 à 30 degrés C., soit environ 0,0001 par degré C. On peut donc négliger toute correction de température, dans les limites usuelles, et adopter 1,39 volt légal, le chiffre des millièmes étant réservé. Ces éléments conviennent aussi très bien à la charge des électromètres.

313. Étalon du Post-Office de Londres. — Cet étalon appartient au type Daniell. Il se compose (fig. 144) de trois vases distincts renfermés dans une boîte : le vase de gauche contient une lame de zinc plongée dans l'eau, celui de droite un vase poreux plat et rectangulaire, C contient une lame de cuivre, le vase poreux plonge dans l'eau. Ces deux vases ne servent que lorsque la pile est au repos. Le vase du milieu renferme une solution à moitié saturée de sulfate de zinc et au fond un petit cylindre

de zinc X dans un petit compartiment spécial. Lorsqu'on veut se servir de la pile, on retire le vase poreux de sa place de repos ainsi que le zinc et on les met tous deux dans le vase du milieu; la pile est alors prête à fonctionner. On les retire et on les met dans leurs vases de repos respectifs lorsqu'on a fini de s'en servir; le peu de sulfate de cuivre qui a traversé le vase poreux pendant le travail vient se déposer sur le cylindre de zinc X; la solution reste ainsi toujours très claire. La force électromotrice de cet élément aux températures moyennes est de 1,08 volt légal.

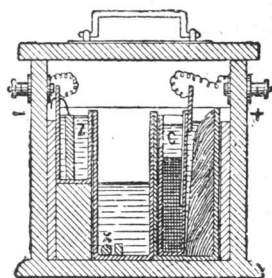


Fig. 144. — Pile étalon du Post-Office de Londres.

314. Étalon Daniell normal, du D^r J.-A. Fleming (1885). — A un tube en U de 18 à 20 mm. de diamètre et de 50 cm. environ de longueur totale, sont soudés quatre ajutages; les deux supérieurs A et B correspondent à deux réservoirs, les deux autres C et D à des tubes de vidange fermés par des robinets en verre. Supposons maintenant qu'il s'agisse de former un élément Daniell avec des solutions de sulfate de zinc et de cuivre, et que la solution de sulfate de zinc soit la plus dense. Le réservoir de gauche est rempli avec la solution de zinc et le réservoir de droite avec la solution de cuivre. Les électrodes sont des crayons de zinc et de cuivre traversant des bouchons en caoutchouc P et Q qui assurent une fermeture hermétique aux extrémités du tube en U.

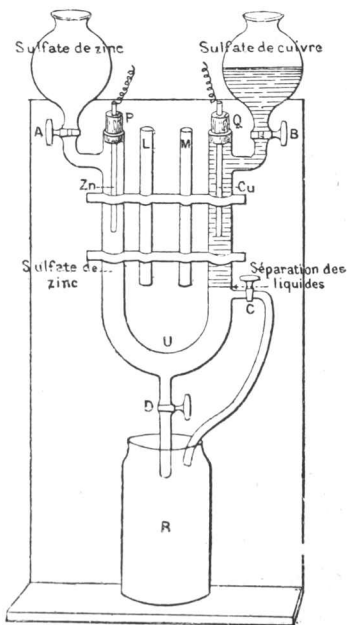


Fig. 145. — Étalon de M. Fleming-Jenkin.

Pour amorcer la pile, on ouvre le robinet A et on remplit le tube de la solution la plus dense;

ou introduit la tige de zinc et on fixe le bouchon en caoutchouc P. En ouvrant le robinet C, le niveau du liquide descend dans la branche de droite : dès qu'il commence à baisser, on ouvre un peu le robinet B, et la solution de sulfate de cuivre coule lentement pour remplacer le sulfate de zinc ; on peut mener l'opération de telle façon que la ligne de séparation des deux liquides reste parfaitement définie et atteigne le niveau du robinet C. A ce moment, tous les robinets sont fermés et la tige de cuivre mise en place sur le tube de droite.

Il est impossible d'empêcher la diffusion de produire un mélange lent des liquides à la surface de séparation ; mais lorsque cette surface cesse d'être nettement définie, le liquide mélangé peut être retiré par le robinet C et de la solution neuve puisée dans les réservoirs. On peut ainsi maintenir la solution pure et non troublée autour des deux électrodes. Lorsque la pile n'est pas en service, les tiges de zinc et de cuivre peuvent être retirées et mises dans les tubes d'essai L et M remplis de leurs solutions respectives. Le robinet inférieur D sert à vider la pile.

Les électrodes sont formées de zinc et de cuivre le plus purs possible ; les tiges ont 10 cm de long et 6 mm de diamètre. Le zinc le meilleur est celui qui a été distillé deux fois et coulé en baguettes ; le cuivre est obtenu par dépôt électrolytique sur un fil de cuivre fin jusqu'à l'épaisseur voulue.

M. J.-A. Fleming monte la pile avec deux solutions de densités différentes, que nous désignerons par A et B :

Solution A. — Solution de sulfate de cuivre sensiblement saturée à 15° C. ; densité : 1,2. Solution de sulfate de zinc de densité égale.

Solution B. — Solution de sulfate de cuivre de densité 1,1 à 15° C. Solution de sulfate de zinc de densité 1,4.

M. Fleming a étudié successivement l'influence de la nature de la surface du cuivre et de celle du zinc, l'influence de la densité des solutions, ainsi que celle de la température. Les résultats trouvés par M. Fleming montrent bien la confiance qu'on peut accorder à l'étalon Daniell, auquel il donne le nom d'étalon normal (solution B).

Pour une différence de température de 20 degrés centigrades,

l'expérience a montré une petite chute de force électromotrice dans l'élément chauffé. Cette chute ne dépasse pas *trois millièmes* pour une différence de 20 degrés. C'est une variation *cinquante* fois moins grande que celle de l'élément Latimer Clark pour une même différence de température.

On peut donc dire que, *pratiquement*, la force électromotrice de l'élément Daniell est indépendante de la température, dans les limites naturelles à l'air de nos climats. Cette qualité de l'élément Daniell normal est très importante, et lui permet de soutenir la comparaison avec son rival, l'étalon Clark.

L'élément normal de M. Fleming, construit avec du zinc pur amalgamé, du cuivre électrolytique fraîchement déposé, des liquides non mélangés, donne les résultats suivants (moyenne de 50 observations) :

Solution A.	1,102 volt légal.
— B.	1,072 —

Les chiffres donnés par M. Fleming, comparés à ceux trouvés précédemment pour des éléments analogues par M. Raoult, sir William Thomson, Lord Rayleigh, Latimer Clark, Alder Wright n'en diffèrent que de quelques millièmes. On peut donc, dans la pratique, adopter cet étalon en lui attribuant une force électromotrice de 1,1 volt légal avec la solution A et 1,07 volt légal avec la solution B.

315. Étalon Gaiffe (1885). — Le couple zinc — chlorure de zinc — chlorure d'argent a une force électromotrice dépendant de la température et de la concentration de la solution, les liqueurs les plus concentrées donnant les forces électromotrices les plus faibles. Les différences observées par différents expérimentateurs étaient dues à l'emploi de produits impurs, ainsi qu'aux variations de température dont l'influence, très légère vers 18° C., va s'accroissant de plus en plus à mesure qu'on approche du zéro de l'échelle centigrade. A cette dernière température, E ne vaut plus que 0,98 volt environ.

En opérant avec du zinc bien amalgamé, du chlorure d'argent fondu pur, des solutions limpides de chlorure de zinc pur, aussi neutres que possible, et à la température de 13° C, la même solution donne toujours la même force électromotrice.

C'est la liqueur de densité 1,07 qui semble donner le volt légal. Avec le couple au chlorure d'argent on doit, lorsqu'on veut faire des déterminations exactes, expérimenter sur des résistances considérables, 5 000 ohms au moins : 1° à cause de la polarisation ; 2° à cause de l'échauffement des lames constituant le couple qui résulte du courant même.

316. Constantes de débit et éléments de fonctionnement pratique des piles. — La *force électromotrice* d'une pile ne dépend que de la nature des éléments qui la composent, et non de leurs formes et de leurs dimensions. On le démontre en opposant deux éléments de grandeurs différentes : un galvanomètre intercalé dans le circuit indique un courant nul.

La *résistance intérieure* est fonction de la nature des éléments en présence, de la forme des électrodes, de leurs dimensions, de leur rapprochement, de la température, du degré d'épuisement ou de concentration des solutions, etc.

En parlant des générateurs électriques parfaits (245) nous avons étudié l'influence de ces deux facteurs, force électromotrice E et résistance intérieure r supposés constants : nous n'y reviendrons pas.

La quantité totale d'électricité fournie par une pile ainsi que l'énergie disponible ne dépendent que des masses de matières actives que renferme l'élément, et, par suite, de ses dimensions et de la concentration des solutions.

L'étude d'une pile ou d'un accumulateur se fait en construisant des courbes de *décharge* dans lesquelles on porte, en fonction du temps, les valeurs de la force électromotrice E , la résistance intérieure r , la différence de potentiels utile e , l'intensité du courant I , et la puissance utile eI .

On y adjoint quelquefois les indications d'un thermomètre pour les variations de température et celles d'un densimètre pour les variations de densité du ou des liquides, variations qui ont une si grande influence sur les *constantes de débit* de la pile.

La valeur de $\int Idt$, depuis l'origine du temps jusqu'à la fin de la décharge, intégrale que l'on détermine par un planimètre ou en mesurant la surface du papier quadrillé sur lequel les

courbés sont tracées, donne la quantité totale d'électricité fournie par la pile pendant la décharge. On peut en déduire la quantité théorique de zinc nécessaire à l'action électrochimique : deux pesées de zinc avant et après la décharge donnent, par différence, la masse de métal réellement consommée dans l'élément, et permettent d'apprécier ainsi l'influence de l'*action locale* pendant la décharge.

Certains éléments tels que l'élément Leclanché (307), celui de MM. de Lalande et Chaperon, ne sont le siège d'aucune action locale sensible, non seulement pendant la décharge, mais même lorsqu'ils restent très longtemps montés et abandonnés à eux-mêmes à circuit ouvert : ils représentent une somme d'énergie électrique disponible à volonté à intervalles de temps irréguliers répartis sur une très longue durée — plus de dix ans pour l'élément Leclanché.

D'autres éléments, au contraire, tels que ceux au bichromate de potasse ou de soude à un liquide (308), sont le siège d'une action locale énergique, même à circuit ouvert ; aussi ne doit-on plonger le zinc dans la solution active qu'au moment de l'emploi, pour ne pas épuiser prématurément et inutilement la pile.

La valeur de $\int eI dt$ fait connaître de même la quantité totale d'énergie électrique *utile* fournie par la décharge. Une pile donnée ne renfermant qu'une quantité définie et limitée de matières actives dont le travail électrochimique modifie à chaque instant la composition, le courant de décharge et la puissance utile sont représentés par des courbes indiquées sur l'axe des temps, et présentant une chute assez brusque vers la fin de la décharge.

Lorsqu'on veut obtenir des courants constants et continus de longue durée, pour la charge des accumulateurs par exemple, il faut avoir recours aux piles à deux liquides et à dépolarisant liquide, et procéder au renouvellement continu ou périodique de la solution active et de la solution dépolarisante.

On réalise alors des *piles à écoulement* dans lesquelles on met à profit, pour le triage des liquides neufs et épuisés, les variations de densité apportées aux solutions par leur épuisement.

II. — ÉLECTROLYSE.

317. Définitions. — *Faraday* a donné le nom d'*électrolyse* à l'ensemble des phénomènes dans lesquels on produit la décomposition des corps composés par une dépense d'énergie électrique. Les corps décomposés sont des *électrolytes*. L'appareil dans lequel se produit la décomposition est une *cuve électrolytique* ou *voltamètre*.

Le courant est amené au voltamètre par des *électrodes*, formées par des lames conductrices plongeant dans l'électrolyte.

Le courant entre par l'*anode* (pôle +) et sort par la *cathode* (pôle -).

Les produits de la décomposition sont des *ions*.

Ceux qui vont à l'anode sont des *anions*.

Anions.	ἀνίον, en haut; ἰών, allant.
Anode.	ἀνίον, — ἑδός, route.

Ceux qui vont à la cathode sont des *cathions*.

Cathions	κατιόν, en bas; ἰών, allant.
Cathode.	κατιόν, — ἑδός, route.

On appelle quelquefois les anions, corps électro-négatifs, parce qu'ils sont attirés au pôle positif, et inversement, mais ces appellations basées sur les anciennes théories de deux fluides prêtent à confusion. Du reste, les corps ne sont pas *absolument* anions ou cathions, ils ne le sont que relativement, et forment une série dans laquelle chacun d'eux est anion par rapport à ceux qui le suivent, et cation par rapport à ceux qui le précèdent.

318. Polarisation des électrodes. — Lorsqu'on met en communication avec une source électrique donnée un voltamètre composé, par exemple, de deux lames de platine plongées dans de l'eau acidulée sulfurique, le courant, assez intense au début, diminue et prend un régime normal correspondant à un certain état de la surface des lames qui, paraissant absorber les gaz au début, les laissent alors dégager normalement avec une rapidité qui dépend de l'intensité du courant.

Ce phénomène est désigné sous le nom de *polarisation des électrodes*. Cette polarisation se produit d'une façon graduelle et correspond à une force électromotrice qui varie depuis zéro — si les deux lames étaient à un état initial identique — jusqu'à un certain maximum fonction de l'état des lames, de leur nature, de leur surface, de la densité du courant qui les traverse, de la nature de l'électrolyte, etc.

Le produit de cette force contre-électromotrice de polarisation par la quantité d'électricité qui a traversé le circuit représente l'énergie fournie par la source extérieure pour produire l'électrolyse, c'est-à-dire la séparation des corps primitivement combinés; l'énergie totale fournie par la source à la cuve électrolytique se trouve augmentée du produit RI^2t , représentant la quantité d'énergie électrique transformée en chaleur pendant le temps t pour vaincre la résistance électrique R du bain. Cette quantité de chaleur peut d'ailleurs être très petite si l'on emploie des bains peu résistants et des courants faibles.

319. Mesure de la force électromotrice de polarisation. — La force électromotrice de polarisation d'un électrolyte est fonction de l'intensité du courant. On la mesure à l'aide des deux méthodes suivantes.

Méthode de Wheatstone. — On intercale dans un circuit de très grande résistance une pile dont la force électromotrice est plus grande que la force électromotrice de polarisation à mesurer, et un galvanomètre qui mesure ainsi E . On intercale ensuite dans le circuit le système dont on veut déterminer la force électromotrice de polarisation. On obtient une nouvelle déviation proportionnelle à E' . La force électromotrice de polarisation est alors égale à $E - E'$.

Méthode de M. G. Chaperon (1884). — La dépolarisation par diffusion (**320**) modifie très rapidement la force électromotrice d'un système polarisé, il faut donc pouvoir mesurer sa polarisation dans une durée extrêmement courte, à partir de l'ouverture du courant primaire. A cet effet, M. G. Chaperon place le voltamètre à étudier alternativement dans le circuit d'une pile P variable et dans un second circuit renfermant un condensateur C d'assez grande capacité (1 microfarad). Dans la position de repos les électrodes à polariser sont dans le cir-

cuit primaire, un coup frappé sur la clef met les électrodes en communication avec le condensateur pendant un instant très court. Après quelques coups de clef, la différence de potentiel des armatures du condensateur est la même que celle des électrodes du voltamètre. On la mesure par un électromètre à quadrants (225), ou par la décharge du condensateur dans un galvanomètre balistique étalonné.

On peut ainsi étudier tous les systèmes d'électrodes oxydables dont la polarisation se dissipe rapidement.

320. Capacité de polarisation. — Dépolarisation par diffusion. — Lorsqu'un voltamètre est relié à une pile de faible force électromotrice, il ne se produit aucun dégagement de gaz, le courant initial s'affaiblit rapidement et devient sensiblement nul en un temps très court; les électrodes du voltamètre sont *polarisées*, et leur force électromotrice rapidement croissante atteint bientôt celle de la pile.

Il faut donc, pour polariser un voltamètre, une certaine quantité d'électricité qui est restituée lorsqu'on ferme le voltamètre sur lui-même par un circuit métallique.

Le phénomène présente de grandes analogies avec celui de la capacité électrostatique des condensateurs à diélectrique solide. La question de savoir si la *capacité de polarisation* d'un voltamètre est *constante*, comme celle d'un condensateur, a été étudiée par C.-F. Varley (1871), F. Kohlrausch et Nippoldt (1869), H. Herwig (1877), Wiettlisbach (1877); les résultats acquis ont été résumés par M. René Blondlot ⁽¹⁾ et l'étude de la question complétée.

M. Blondlot a déterminé la plus petite quantité d'électricité nécessaire pour communiquer, par polarisation, à une électrode une force électromotrice donnée, et cherché les lois qui lient les charges électriques à la force électromotrice de polarisation.

En reliant un voltamètre polarisé à un électromètre Thomson, on observe que la force électromotrice diminue avec le temps, il se produit une dépolarisation spontanée, dissipation de la polarisation ou dépolarisation par diffusion d'autant plus rapide

(1) *Journal de physique*, t. X, 1881.

que la polarisation est elle-même plus grande. Ce fait justifie la nécessité d'un courant de charge continu de faible intensité lorsqu'on relie une pile à un voltamètre, courant ayant pour effet de réparer les pertes dues à la dépolarisation par diffusion.

En étudiant expérimentalement le phénomène, en dehors de toute hypothèse sur sa nature intrinsèque, M. Blondlot a formulé les lois suivantes :

La capacité de polarisation, ou rapport de la charge à la polarisation, est fonction de la force électromotrice : il y a donc une capacité de polarisation spéciale pour chaque force électromotrice.

La capacité initiale est indépendante du sens de la polarisation, ainsi que de la nature de l'électrolyte, et ne dépend que de la force électromotrice.

La capacité initiale d'une électrode de platine plongée dans de l'eau acidulée sulfurique ($\frac{1}{6}$ d'acide en volume) est de 7,77 microfarads par centimètre carré. Pour un voltamètre formé de deux électrodes d'égale surface, la capacité initiale serait moitié moindre, soit 3,88 microfarads par cm^2 .

Ce chiffre est d'ailleurs variable avec la nature de la surface plus ou moins poreuse, plus ou moins attaquable, et, dans le plus grand nombre des cas, il est difficile de séparer la capacité de polarisation de la capacité électrochimique dont la nature est toute différente.

321. Exemples d'électrolyse. — La découverte de l'électrolyse est contemporaine de celle de la pile de Volta : en 1800, *Carlisle et Nicholson* décomposèrent l'eau ; en 1806, *Davy* décomposa les alcalis ; les lois quantitatives furent formulées par *Faraday* de 1831 à 1840.

Les décompositions des corps composés par l'électrolyse sont innombrables et en quelque sorte indéfinies, nous nous contenterons d'indiquer à titre d'exemples les plus importantes.

Décomposition de l'eau. — L'appareil qui sert à cette décomposition a reçu de Faraday le nom de voltamètre, nom étendu aujourd'hui à tous les appareils dont on utilise les actions électrolytiques à la mesure des courants. Le voltamètre se compose d'un vase en verre (fig. 146) traversé à sa partie infé-

ricure par deux fils de platine, soudés dans le verre ou fixés dans de la cire à cacheter. Le vase est rempli d'eau légèrement

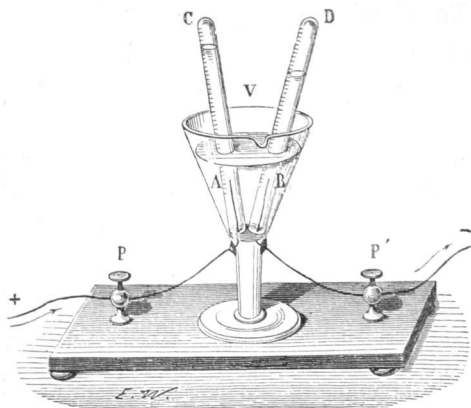


Fig. 146. — Voltamètre à gaz.

acidulée et les fils de platine recouverts de deux éprouvettes, CD, remplies d'eau. Dès que le circuit est fermé, on voit de petites bulles gazeuses se dégager à la surface des fils de platine, avec une rapidité d'autant plus grande que le courant est plus intense. A pression égale, le volume d'hydrogène dégagé sur la cathode B

est très sensiblement double du volume d'oxygène dégagé sur l'anode A.

Décomposition des métaux alcalins. — Davy est le premier qui ait effectué la décomposition des métaux alcalins avec une batterie de 100 éléments zinc-cuivre, en reliant un morceau de potasse ou de soude humide au pôle positif, en y perçant une cavité et en y introduisant un globule de mercure relié au pôle négatif (fig. 147). Il se forme un amalgame et le mercure augmente considérablement de volume. En 1837, *Golding Bird* a réussi à obtenir des amalgames de potassium, de sodium et d'ammonium sous la forme cristalline avec le faible courant produit par un seul élément Daniell (¹), en électrolysant du chlorure de sodium. *Bunsen* a obtenu du barium, du strontium et du calcium en électrolysant leurs chlorures, vers 100° C., sous forme d'une pâte composée d'eau légèrement acidulée par l'acide chlorhydrique, la cathode étant formée d'un fil de platine amalgamé.

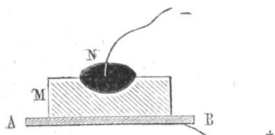


Fig. 147. — Électrolyse de la potasse.

(¹) *Philosophical Transactions*, 1837.

Décomposition des sels métalliques. — Les phénomènes de décomposition des sels métalliques sont très complexes : ils varient avec la nature de la base et celle des électrodes. Le plus souvent, le métal se dépose à la cathode, et de l'oxygène se dégage à l'anode si elle est insoluble, ou une quantité sensiblement égale s'y dissout si l'anode est formée du même métal que le sel. Le résultat final est alors un simple transport électrolytique du métal de l'anode sur la cathode *dans le sens du courant*. La galvanoplastie et les dépôts électrochimiques (argenteure, dorure, nickelage, etc.) sont des applications industrielles importantes de ces phénomènes de décomposition.

En décomposant du *sulfate de potasse* (fig. 148) on forme du potassium à la cathode, mais celui-ci s'oxyde aussitôt pour reformer de la potasse. En colorant la solution avec de la teinture de violettes, on observe que la teinture est rouge en A par l'acide mis en liberté, tandis que la branche B verdit sous l'action de la potasse formée à l'anode, alors que l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau se dégage.

Nous pourrions multiplier les exemples relatifs à ces décompositions, mais leur étude est plus particulièrement du domaine de la chimie. Nous nous contenterons de signaler l'isolement du fluor, qui est l'une des plus remarquables

décompositions électrolytiques réalisées pendant ces dernières années.

Isolement électrolytique du fluor. — En 1886, M. Moissan est parvenu à séparer le fluor en décomposant l'acide fluorhydrique par le courant électrique ⁽¹⁾.

(1) Rapport fait à l'Académie des sciences, par M. Debray, au nom de la section de chimie, séance du 8 novembre 1886.

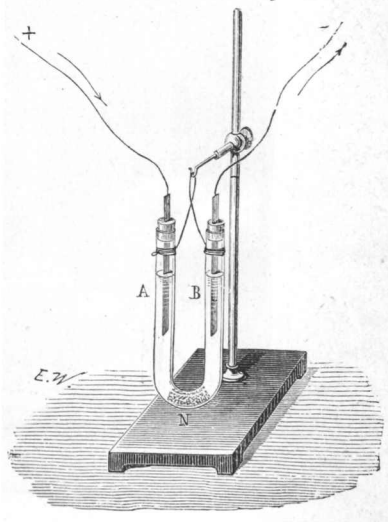


Fig. 148. — Décomposition du sulfate de potasse.

« M. Moissan a opéré sur l'acide fluorhydrique pur, préparé par la méthode de M. Fremy. Cet acide avait été condensé dans un tube en U en platine, dont les deux extrémités sont fermées par deux bouchons à vis. Chacun de ces bouchons est formé par un cylindre de spath fluor bien serti dans un cylindre creux de platine, dont l'extérieur porte le pas de vis. Chaque cylindre

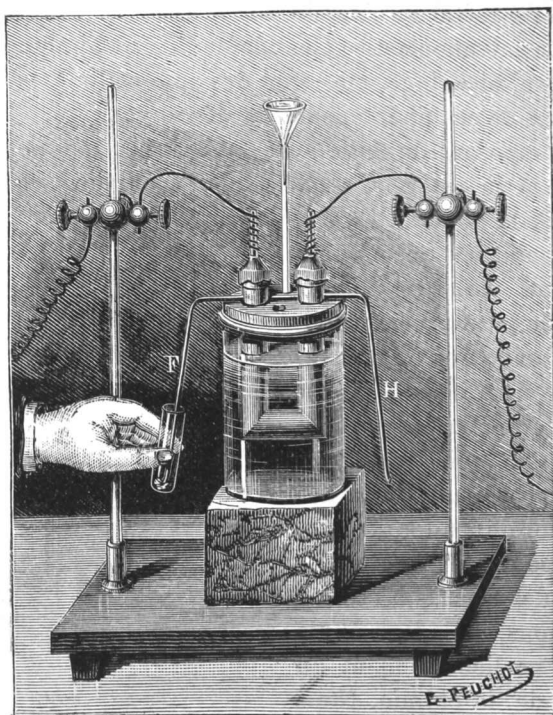


Fig. 149. — Appareil d'isolement du fluor.

de spath fluor laisse passer en son axe un gros fil de platine iridié (à 10 pour 100 d'iridium), moins attaquant que le platine pur. Ces fils, plongeant par leur extrémité inférieure dans le liquide, servaient d'électrodes. Enfin deux ajutages en platine soudés à chaque branche du tube, un peu au-dessous des bouchons, au-dessus du niveau du liquide, permettaient aux gaz dégagés par l'action du courant de s'échapper au dehors.

« Le tube en U plongeait à sa partie inférieure dans du chlo-

rure de méthyle, dont on activait l'évaporation par un courant d'air sec. On maintenait ainsi l'acide fluorhydrique liquide à une température toujours inférieure à -23° (température d'ébullition normale du chlorure) et pouvant atteindre -50° , température facile à maintenir par le passage d'un courant d'air dans ce liquide. Comme l'acide fluorhydrique anhydre est mauvais conducteur, on le rend propre à l'électrolyse en lui ajoutant un peu de fluorhydrate de fluorure de potassium, facile à obtenir sans trace d'eau. Vingt éléments de Bunsen suffisent alors pour obtenir la décomposition du liquide soumis à l'électrolyse. Un

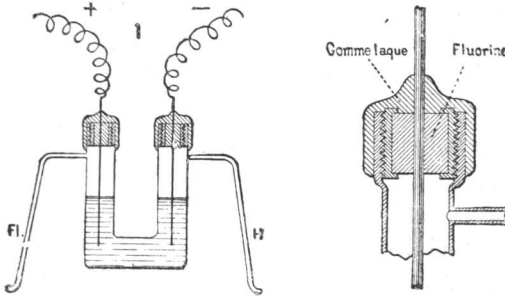


Fig. 150. — Détails de l'appareil de M. Moissan.

ampèremètre placé dans le circuit permet de se rendre compte de l'intensité du courant.

« Avec une telle disposition d'appareil, l'opérateur est mis dans une large mesure à l'abri des effets funestes de l'acide fluorhydrique, et cet acide se trouve également soustrait à l'action hydratante de l'air atmosphérique et des anciens mélanges réfrigérants. Ceux-ci sont d'ailleurs avantageusement remplacés par le chlorure de méthyle au point de vue de la constance et de l'intensité de leurs effets. Aussi l'électrolyse a-t-elle pu facilement être maintenue durant deux ou trois heures, ce qui permet à l'observateur de s'assurer de la constance des effets observés. M. Moissan obtient : au pôle négatif de son appareil, un dégagement régulier d'*hydrogène* entraînant un peu d'acide fluorhydrique ; au pôle positif, un dégagement assez notable d'un gaz qui n'est autre que le fluor.

322. Effets secondaires de l'électrolyse. — Les métaux alcalins et alcalino-terreux, à cause de leur grande affinité

pour l'oxygène, ne se déposent pas à l'état métallique. On ne peut séparer le potassium et le rhodium qu'en électrolysant une solution concentrée et en formant la cathode d'un bain de mercure avec lequel les métaux alcalins s'amalgament au fur et à mesure de leur formation.

En électrolysant l'eau acidulée sulfurique avec des électrodes en zinc, il ne se dégage pas d'oxygène, car ce gaz oxyde le zinc et l'oxyde formé se transforme en sulfate. Dans certains cas, les ions se dégagent sous un état anormal, tel que l'oxygène à l'état d'azone — cause d'erreur dans les voltamètres à gaz (323) —, l'hydrogène à l'état naissant, le cuivre à l'état pulvérulent lorsque la densité de courant est trop grande, etc.

Rhéotome liquide. — Si l'on place dans un circuit un voltamètre à eau acidulée sulfurique dont une des électrodes est en platine et l'autre en aluminium, le courant passe lorsque le platine forme l'anode, mais il est arrêté quand l'aluminium forme l'anode. Il se produit un oxyde mauvais conducteur (alumine). Le fait signalé en 1875 par *G. Planté* a été appliqué par *M. Ducretet* à la construction d'un rhéotome à direction constante. *M. Cael* a reconnu que l'arrêt du courant est plus complet dans une solution de bichromate de potasse ou de soude.

L'électrolyse est aussi appliquée à l'indication des courants très faibles. Une solution d'iodure de potassium à laquelle on a ajouté de l'amidon devient indigo à l'anode dès qu'elle est traversée par le faible courant, qui produit, par électrolyse, des traces d'iode libre. Une solution de sulfate de potasse colorée par du sirop de violettes verdit au pôle négatif (cathode) et rougit à l'anode.

On peut ainsi réaliser un *indicateur de pôles*, comme l'indique *M. A. Guébard* en employant une dissolution d'acétate de plomb, qui, de sa solution incolore, laisse déposer instantanément sur l'électrode *positive*, de platine ou autre métal inoxydable, les magnifiques et très brillants anneaux colorés de peroxyde de plomb en lames minces connus sous le nom d'anneaux de Nobili, tandis que, sur l'autre électrode, ne se produit qu'un dépôt terne ou cristallin de plomb métallique, mêlé ou non de bulles d'hydrogène.

La solution d'acétate de plomb la plus diluée, et par conséquent la plus résistante, produit nettement le phénomène, et il suffit, après emploi, de fermer sur lui-même le circuit de l'électrolyte pour que, très rapidement, les dépôts disparaissent et permettent à l'appareil de resservir indéfiniment *sans perte de substance*.

De très faibles forces électromotrices suffisent pour produire le dépôt des lamelles de peroxyde de plomb, dont la couleur, toujours très brillante, mais variable depuis le brun jusqu'au vert, suivant toute l'échelle des colorations des anneaux transmis de Newton permet, si elle dépasse une certaine limite et atteint le noir mat, d'avoir immédiatement une donnée approximative sur la *grandeur* de la différence de potentiel que l'on cherche à constater. Ces phénomènes ont donné naissance à une industrie spéciale : l'*électrochromie*.

Les phénomènes d'électrolyse constituent une branche importante de l'électricité industrielle sur laquelle nous reviendrons dans le volume consacré aux applications. Nous nous contenterons de signaler ici les applications à la mesure électrique par le *voltamètre*.

VOLTAMÈTRES.

323. Définitions. — On donne le nom de *voltamètres* aux appareils dans lesquels on utilise l'électrolyse pour la détermination des *quantités d'électricité* et, indirectement, des *intensités de courant*. C'est ce point qui constitue la différence essentielle entre un galvanomètre et un voltamètre. Les quantités d'électricité se déduisent de la relation

$$M = zQ \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{M}{z}$$

et l'intensité, lorsque l'électrolyse est produite par un courant d'intensité constante.

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{M}{zt}$$

Les voltamètres forment deux groupes distincts, suivant que les produits de l'électrolyse sont gazeux ou à l'état de dépôt métallique solide.

324. Voltamètres à gaz. — La mesure directe des quantités d'électricité et indirecte des intensités de courant par le voltamètre à gaz s'effectue en déterminant la *masse* de gaz produite par l'électrolyse de l'eau acidulée sulfurique, ou le *volume* des gaz dégagés, en partant des chiffres établis par différents expérimentateurs et réunis dans le tableau suivant :

MASSES ET VOLUMES DE GAZ LIBÉRÉS PAR 1 COULOMB.

	Masse en microgrammes.	Volume en cm ³ à 0°C. et à la pression de 76 cm de mercure.
Hydrogène	10,36	0,1158
Oxygène	82,90	0,0579
Gaz mélangés	93,26	0,1737

Suivant les cas, on fait usage de voltamètres *à pesées*, ou de voltamètres *à volume*, et on mesure tantôt le volume d'un seul des deux gaz, tantôt celui des gaz mélangés ⁽¹⁾. Les phénomènes secondaires produits dans l'électrolyse de l'eau ne permettent pas d'obtenir un grand degré de précision par la méthode de voltamètre à gaz, et l'on préfère en général employer le voltamètre à dépôts métalliques.

325. Voltamètres à dépôts métalliques. — On choisit de préférence un métal dont l'équivalent électrochimique est élevé, comme l'argent, ou de prix peu élevé, comme le cuivre ; le zinc n'est employé que pour les appareils industriels — compteur Edison — qui n'exigent pas une grande précision.

Pour obtenir des dépôts bien homogènes et uniformément répartis sur les électrodes ⁽²⁾, il faut que ces électrodes appartiennent géométriquement à un système de surface équipotentielle dans les limites de la masse liquide où elles plongent. Le système réellement simple et pratique, *le seul qui devrait jamais être employé* dans toutes les expériences d'électrolyse, c'est celui de deux cylindres circulaires concentriques, toujours aussi facile à réaliser que les arrangements de hasard, grâce

⁽¹⁾ *Lessons in practical physics*, par Balfour Stewart et Haldane Gee, vol. II, p. 255.

⁽²⁾ *Adrien Guébard*, Sur le meilleur dispositif d'électrodes dans les expériences électrolytiques, *Électricien* du 16 octobre 1886.

auxquels les expérimentateurs obtiennent, sur les forces électromotrices de polarisation par exemple, des résultats si souvent contradictoires.

Il va de soi que les bords inférieurs des électrodes cylindriques verticales doivent être non pas flottants dans le liquide, mais hermétiquement appliqués sur un fond isolant. On obtient alors sur toute la surface des électrodes des dépôts parfaitement identiques de nature et de quantité.

La précision de la mesure de l'intensité d'un courant par les actions électrolytiques dépend de la valeur de l'équivalent électro-chimique du métal déposé, et de la netteté de la réaction chimique qui accompagne le passage du courant ⁽¹⁾. Avec deux voltamètres, l'un à azotate d'argent, l'autre à azotate de mercure, il n'y a pas de rapport constant entre les masses des métaux déposés. Même avec de faibles densités de courant, il se dépose de 1 à 2 pour 100 moins de mercure que d'argent, en calculant d'après les équivalents électrochimiques. Lorsqu'on emploie une cathode de mercure, par exemple, on observe toujours une polarisation énergique, qui se traduit du reste par des mouvements à la surface de la cathode quand on interrompt ou rétablit le courant; tandis que dans l'électrolyse régulière du sulfate de cuivre ou du nitrate d'argent, la polarisation est insensible; les choses se passent comme si l'hydrogène était réellement produit à la surface de cette cathode, occlus par elle, et détruit par diffusion, ou au moins par la cause qui produit la dépoliarisation spontanée des électrodes; cette hypothèse expliquerait la simultanéité des deux phénomènes, polarisation de la cathode, absence d'équivalence entre le mercure déposé et l'intensité du courant.

La mesure électrolytique de l'intensité d'un courant ne peut donc être considérée comme rigoureuse qu'à la condition que les électrodes ne présenteront aucune trace de polarisation; on admet généralement que cette condition est rigoureusement remplie lorsque les électrodes sont formées du métal dissous; les expériences de M. Potier prouvent qu'il n'en est pas toujours ainsi.

(1) A. Potier, *Académie des sciences*, séance du 25 février 1889.

326. Voltamètre à argent et à cuivre. — M. Gray, à la suite de nombreux essais effectués au laboratoire de l'université de Glasgow, est parvenu à déterminer les conditions requises pour obtenir de bons résultats avec les voltamètres à argent et à cuivre. Voici les principales conclusions auxquelles M. Gray est arrivé :

Les étalonnages sont plus commodes avec le voltamètre à cuivre qu'avec le voltamètre à argent, mais ce dernier permet d'obtenir une plus grande exactitude.

La cathode du voltamètre à argent doit être constituée par deux plaques d'argent pur et disposées de chaque côté et à égale distance d'une autre lame d'argent un peu plus petite, formant l'anode. Les lames doivent être nettoyées avec un grand soin, et leur surface doit être proportionnelle à l'intensité du courant à mesurer. Pour obtenir un dépôt bien adhérent et cristallin, avec une solution de nitrate d'argent à 5 pour 100, la densité du courant doit être comprise entre 0,005 et 0,002 ampère par centimètre carré de la surface sur laquelle le dépôt se produit. On peut aussi mesurer l'intensité du courant par la diminution de poids de l'anode, à condition que le courant soit beaucoup plus faible que celui qui correspond à un bon dépôt sur la cathode : la densité ne doit pas, dans ce cas, dépasser 0,0025 ampère par centimètre carré d'anode. M. Gray recommande les mêmes dispositions pour les électrodes du voltamètre à cuivre.

La perte de poids, par corrosion dans le liquide, introduit une erreur qui est à peu près proportionnelle à la surface immergée, et elle est minima quand la densité du sulfate de cuivre est comprise entre 1,10 et 1,15. La densité du courant ne doit pas dépasser 0,02 ampère par centimètre carré de cathode. La solution de sulfate de cuivre, comme celle de nitrate d'argent, doit contenir une petite quantité d'acide libre qui empêche l'oxydation du métal déposé.

1 coulomb dépose	0,32959	milligramme de cuivre.
1 — — —	1,11815	— — — d'argent.

Les voltamètres à zinc sont plus spécialement appliqués à la construction des compteurs (de quantité) d'électricité électro-

chimiques, le compteur *Edison*, par exemple, dont nous parlerons à propos des applications.

III. — PILES RÉVERSIBLES. — PILES SECONDAIRES ou ACCUMULATEURS.

327. Définitions. — Dès 1801, *Gautherot* reconnut que des fils de platine ou d'argent qui avaient servi à décomposer l'eau salée par la pile jouissaient de la propriété de donner, après avoir été détachés de la pile elle-même, un courant électrique de courte durée. En 1803, *Ritter*, d'Inéa, qui fit les mêmes observations, donna à ce courant le nom de *courant secondaire*.

En 1826, *de la Rive* observa le courant secondaire produit par les lames de platine d'un voltamètre plongeant dans de l'eau faiblement acidulée par l'acide sulfurique. Ce courant était dû aux gaz qui s'étaient développés par l'électrolyse sur les électrodes, et *Grove* (1842) réalisa une véritable pile à gaz en réunissant un certain nombre d'éléments formés de lames de platine plongeant à la fois dans l'eau acidulée sulfurique et dans des éprouvettes d'oxygène et d'hydrogène.

En 1859, *Gaston Planté* ⁽¹⁾ reprit l'étude des courants secondaires produits par les différents métaux en changeant la nature des liquides.

Il reconnut que l'affaiblissement du courant électrique par l'interposition dans le circuit d'un voltamètre à eau acidulée et à électrodes de divers métaux est dû à l'insolubilité et à la mauvaise conductibilité de l'oxyde formé au pôle positif : si l'oxyde est soluble, à la résistance de la couche de liquide salin provenant de sa dissolution, et formant une gaine qui empêche le renouvellement du liquide autour de l'électrode ; à la force électromotrice inverse ou de polarisation, qui tend à se produire ⁽²⁾.

Le courant secondaire observé en séparant le voltamètre et en le fermant sur lui-même est dû aux actions chimiques exercées par les corps primitivement séparés par l'opération inverse et revenant à leur état de combinaison primitif.

(1) *Recherches sur l'électricité*, par M. Gaston Planté, 1879.

(2) *Académie des sciences*, 1859.

C'est Planté qui a utilisé le premier les courants secondaires pour accumuler l'énergie de la pile et créé ainsi, en 1860, le premier couple secondaire ou accumulateur fondé sur le résultat de ses études sur les voltamètres.

328. Couple secondaire Planté (1860). — Le premier appareil était constitué par deux longues et larges lames de plomb roulées en spirale, séparées par une toile grossière, et plongées dans l'eau acidulée sulfurique au dixième en volume (fig. 151). Dans d'autres modèles plus récents, les lames sont séparées par des bandes de caoutchouc présentant l'avantage de ne point s'altérer dans l'eau acidulée et de ne couvrir qu'une très minime partie de la surface des électrodes.

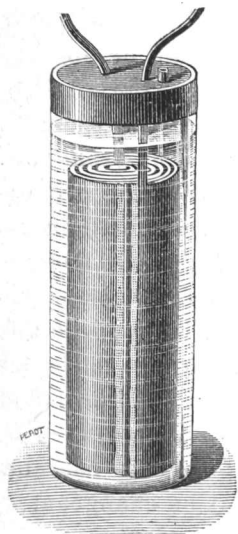


Fig. 151. — Premier couple secondaire de Planté (1860).

Lorsque les lames de plomb sont neuves, et qu'on fait traverser l'appareil par un courant électrique, la lame reliée au pôle positif se recouvre rapidement d'une couche très mince de peroxyde de plomb; la lame reliée au pôle négatif recouverte d'une faible couche d'oxyde due à son exposition à l'air se réduit, et, si l'on continue le passage du courant, des gaz produits par la décomposition de l'eau et qui ne peuvent plus agir sur les plaques ne

tardent pas à apparaître.

En interrompant le courant de charge et en fermant l'accumulateur sur lui-même, on obtient une vive étincelle et un courant intense, mais de faible durée, courant dû à une sulfatation inégale des couches minces de peroxyde de plomb, et de plomb réduit formées à la surface des deux lames ⁽¹⁾.

En recommençant l'opération de charge, on constate que le dégagement des gaz ne se produit qu'après un temps plus long : la peroxydation et la réduction intéressent les couches

⁽¹⁾ Tous les physiciens ne sont pas d'accord sur les vraies formules chimiques représentant les réactions chimiques dont les lames d'un accumulateur Planté sont le siège pendant la période de décharge.

sous-jacentes, les parties actives deviennent plus épaisses et les effets secondaires qui en résultent présentent une plus longue durée. On arrive ainsi, par une série de charges et de décharges successives, et de retournements successifs du courant primaire, à développer à la surface des lames et jusqu'à une certaine épaisseur des couches d'oxyde et de métal réduit, dont l'état de division est favorable au courant secondaire et accroît à chaque opération la *capacité électrochimique* ⁽¹⁾ de l'accumulateur.

Des intervalles de repos entre chaque changement de sens du courant améliorent l'accumulateur en laissant aux dépôts d'oxyde et de métal réduit le temps de prendre une texture cristalline, et une forte adhérence à la surface des lames. Cette série d'opérations constitue la *formation*, facilitée aussi par le séjour prolongé des lames de plomb dans l'eau acidulée avant l'action du courant primaire. La densité du courant joue aussi un rôle : un courant trop peu dense donne de l'oxyde noir, tandis qu'un courant plus dense produit un dépôt brun clair, caractéristique de peroxyde de plomb. C'est donc une sorte de *tannage* électrochimique ⁽²⁾ que subissent les électrodes des couples secondaires : les lames de plomb doivent être pénétrées peu à peu, le plus profondément possible, par les actions oxydantes et réductrices, de manière à modifier complètement leur constitution moléculaire. Dans chaque charge, il faut arrêter l'action du courant dès que les gaz apparaissent, car l'énergie électrique est, à partir de ce moment, dépensée en pure perte à produire l'électrolyse de l'eau acidulée.

Un accumulateur convenablement formé et chargé réalise sensiblement les conditions d'un générateur théorique parfait (244), de grande force électromotrice et de faible résistance intérieure, capable de fournir, sans grandes variations de ses constantes, la plus grande partie de la quantité d'électricité

(1) La *capacité électrochimique* appelée par une abréviation regrettable de langage, la *capacité*, est la quantité d'électricité que l'accumulateur peut fournir pendant une décharge : elle se mesure en coulombs ou en ampères-heure, et n'a aucun rapport avec la capacité électrostatique.

(2) G. Planté, *Recherches sur l'électricité*, § 59.

qu'il renferme. Cette propriété rend l'accumulateur **Planté** fort précieux dans un grand nombre d'applications.

329. Formation rapide. — La méthode de formation indiquée par **Planté** est longue, coûteuse, et ne convient qu'aux laboratoires. Pour abréger le temps de formation, **Planté** a proposé (1881) la formation électrolytique à haute température, dans le but de dilater les pores du métal, et de faciliter par le refroidissement l'agrégation cristalline du peroxyde de plomb et du plomb réduit.

Il a ensuite (1882) proposé de soumettre ⁽¹⁾ les lames à un décapage profond par l'acide azotique étendu de la moitié de son volume d'eau, en les laissant immergées pendant vingt-quatre à quarante-huit heures, pour augmenter la porosité métallique. Les couples sont ensuite vidés, lavés très complètement et soumis à l'action du courant primaire.

Les procédés de formation rapide des accumulateurs plomb-plomb sont très nombreux, **M. Émile Reynier** les a classés en deux groupes ⁽²⁾ : les accumulateurs dans lesquels les matières actives sont issues du métal même des électrodes sont des accumulateurs à *formation autogène* ; les autres sont des accumulateurs à *formation hétérogène*.

Formation autogène. — On peut employer des surfaces très minces et très développées sous forme de lamelles, de fils de plomb, de grenaille, de lames plissées, comprimées ou non par le *foisonnement* ou augmentation de volume pendant la charge. On peut ainsi rendre les plaques perméables soit en fondant les plaques avec un métal auxiliaire éliminé ensuite par action chimique, soit en sulfurant les plaques à leur surface, l'action électrolytique éliminant le soufre et laissant le plomb poreux réduit ou peroxydé.

Formation hétérogène. — **M. Camille Faure** a obtenu des électrodes à couches actives épaisses (1880) en recouvrant la lame de plomb d'une pâte d'oxyde maintenu en place par un cloisonnement en feutre. Une formation relativement courte amène les masses pulvérulentes à l'état de croûtes solides poreuses et conductrices. **M. G. Philippart** (1882) a remplacé les cloi-

⁽¹⁾ *Académie des sciences*, séance du 28 août 1882.

⁽²⁾ *Traité élémentaire de l'accumulateur voltaïque*, 1888.

sonnements par des plaques percées de trous ou alvéoles remplis de plomb très divisé, lames minces, fils ténus ou mousse de plomb.

En remplaçant la mousse de plomb par des oxydes de plomb (minium ou litharge), les plaques percées de trous par des grillages de plomb fondu ou d'un alliage de plomb et d'antimoine, on réalise l'appareil connu sous le nom d'accumulateur *Faure-Sellon-Volkmar*, ou d'accumulateur E.P.S., du nom de la société qui l'exploite (*Electrical Power Storage Co*).

On a aussi construit des accumulateurs à oxydes agglomérés pour diminuer le poids mort des grillages qui sont ainsi supprimés et réduire considérablement la durée de la formation électrochimique.

M. de *Montaud* forme ses lames par dépôt électrochimique dans un bain de plombite de potasse porté à 100° C. environ : il se dépose du peroxyde de plomb adhérent et compact sur les lames positives, de plomb spongieux diffus sur les négatives que l'on soumet à une pression énergique pour l'agglomérer et la fixer sur le support.

Les principaux types d'accumulateurs à formation rapide feront l'objet d'une étude spéciale dans le volume consacré aux applications.

330. Accumulateurs divers. — Bien que, jusqu'à ces dernières années, l'accumulateur *plomb-plomb* créé de toutes pièces par Planté ait été de beaucoup le plus employé, il n'est pas le seul qui permette de réaliser un accumulateur. En principe, toute pile hydro-électrique ne donnant pas naissance, pendant la décharge, à des produits volatils, et régénérable par l'électrolyse, peut constituer un accumulateur.

Certaines combinaisons telles que l'accumulateur plomb-zinc ont même une force électromotrice plus élevée que l'accumulateur plomb-plomb; d'autres ont, à masse égale, une capacité électrochimique (328) plus grande, etc. Nous indiquerons quelques-unes des combinaisons les plus intéressantes.

Accumulateur plomb-cuivre. — En remplaçant l'eau acidulée sulfurique d'un accumulateur plomb-plomb par une solution de sulfate de cuivre, on réalise un voltamètre réversible dont la force électromotrice est de 1,25 volt environ.

Cette disposition proposée par M. *Sutton* (1881) ne présente aucun avantage particulier et a été abandonnée en pratique.

Accumulateur plomb-zinc. — L'accumulateur plomb-zinc a une force électromotrice normale de 2,36 volts. Il a été proposé par MM. d'Arsonval et Carpentier en 1879 et étudié par M. Émile Reynier, qui en a fait quelques applications comme *régulateur* de courant. Malheureusement, cet accumulateur présente un grave inconvénient : il s'y produit une attaque locale spontanée du zinc électrolysé qui dissipe rapidement la charge à circuit ouvert, et ne permet pas de séparer beaucoup le temps de décharge du temps de charge, ce qui limite le champ d'applications.

Accumulateur zinc-chlore. — MM. d'Arsonval et Carpentier (1881) ont proposé d'électrolyser le chlorure de zinc par deux électrodes de charbon, le chlore se liquéfiant sous sa propre pression et le zinc étant recueilli sur un bain de mercure.

Accumulateurs aux zincates alcalins. — La propriété de réversibilité des piles aux zincates alcalins a été signalée dès 1881 par MM. de Lalande et Chaperon, mais le premier accumulateur de ce genre a été réalisé seulement en 1887 par MM. *Commelin, Desmazures et Bailhache* ⁽¹⁾.

L'électrode positive est constituée par du cuivre réduit électrolytiquement et aggloméré à une pression de 500 à 1000 kg par cm². Les positifs, enveloppés de papier parchemin, sont séparés des négatifs par des jarretières en caoutchouc ou des tubes de verre : le tout est plongé dans une boîte en fer-blanc contenant du zincate de potasse ou de soude. Les électrodes négatives sont formées de lames de toiles métalliques de fer étamé.

Pendant la charge, le zinc est réduit et vient se déposer sur les toiles métalliques, tandis que l'oxygène se porte sur le cuivre pour l'oxyder. Pendant la décharge, l'oxyde de cuivre est réduit, le zinc dissous est retransformé en zincate de potasse ou de soude.

La force électromotrice de cet accumulateur n'est guère supérieure à 0,8 volt, mais sa résistance intérieure peut être

(1) *Société internationale des électriciens*, séance du 7 décembre 1887.

rendue très faible, et l'on peut obtenir ainsi un débit spécifique (331) suffisant, compensant l'infériorité de la force électromotrice, bien que la puissance spécifique ne soit pas supérieure à celle des accumulateurs plomb-plomb; la supériorité des accumulateurs aux zincates alcalins réside surtout dans leur grande énergie spécifique qui atteint 20 watts-heure par kg de poids *total*.

Accumulateurs divers. — Plusieurs autres combinaisons, en dehors de celle dont nous venons de parler, ont été proposées et expérimentées sur une échelle plus ou moins grande.

M. E. Peyrusson (1886) a construit des accumulateurs plomb-cadmium et plomb-étain, MM. Fichet et Nodon (1887) ont expérimenté des accumulateurs à l'iodure et au bromure de zinc, etc. Sans qu'on puisse apprécier encore la valeur de ces appareils, il est bon de les signaler pour provoquer de nouvelles recherches sur ce sujet intéressant et d'une grande importance industrielle.

On a réalisé, pendant ces dernières années, certains générateurs électrochimiques régénérables, dans lesquels la régénération s'effectue, non plus par un courant inverse restituant l'énergie électrique dépensée pendant la décharge, mais en fournissant de l'énergie thermique; comme ces appareils transforment l'énergie thermique en énergie électrique, leur étude sera mieux à sa place dans le chapitre suivant, consacré à l'*électrothermie* (355).

331. Facteurs caractéristiques d'un accumulateur.

— On peut définir un accumulateur comme une pile de force électromotrice assez élevée sensiblement constante; de faible résistance intérieure, indéfiniment régénérable par électrolyse; il constitue donc un élément réversible.

Le *débit* est l'intensité maxima I qu'il peut fournir au régime normal.

La *puissance utile* est le nombre de watts utiles aux bornes eI .

La *capacité* voltaïque est la quantité d'électricité fournie pendant une décharge normale

$$Q = It \text{ ampères-heure,}$$

t étant la durée de la décharge en heures.

L'*énergie disponible* est le nombre de watts-heure que peut fournir l'accumulateur dans le circuit extérieur pour une décharge normale.

Le *débit spécifique* est le rapport du débit à la masse des plaques de l'accumulateur : il s'exprime en ampères par kg.

La *capacité spécifique* est le rapport de la capacité à la masse : elle s'exprime en ampères-heure par kilogramme.

La *puissance utile spécifique* et l'*énergie spécifique* sont respectivement les rapports de la puissance utile et de l'énergie disponible à la masse des plaques d'un accumulateur : elles s'expriment respectivement en watts par kg et en watts-heure par kg.

Ces facteurs caractéristiques sont fort importants à connaître dans les applications, car ils permettent de choisir le type à adopter et le nombre d'accumulateurs nécessaires pour une application donnée quelconque, et de résoudre ainsi un grand nombre de problèmes.

Le régime de charge et de décharge dépend, en principe, de la surface des électrodes. M. Montaud indique une densité de 10 ampères par m² pour la charge et 20 ampères par m² pour la décharge, mais ce chiffre se trouve considérablement dépassé dans certains types.

La *capacité* est fonction du poids des plaques et de leur épaisseur. Certains accumulateurs à longue durée ont un faible débit et une faible capacité spécifiques, soit 1 ampère par kg pour le débit spécifique et 4 à 5 ampères-heure par kg pour la capacité spécifique.

Suivant les besoins de chaque application, on modifie la fabrication, la forme, la proportion et les dimensions d'un accumulateur pour satisfaire à ces besoins. De là des types à grand et à petit débit, à grande et à faible capacité, à charge et à décharge rapides, etc.

Le *rendement en quantité* d'un accumulateur est le rapport de la quantité d'électricité fournie pendant la décharge à la quantité dépensée pour la charge. Il atteint 90 pour 100 lorsque les régimes de charge et de décharge sont faibles, et que l'intervalle de temps qui sépare les deux opérations n'est pas trop long.

Le *rendement en énergie* est le rapport de l'énergie fournie par l'accumulateur pendant la décharge à l'énergie dépensée pour la charge. Il varie entre 50 et 80 p. 100, suivant les régimes adoptés. Les charges lentes et les décharges lentes améliorent les rendements des accumulateurs ainsi que leur durée. Ces rendements sont très variables avec la nature de l'appareil et les régimes de charge et de décharge.

332. Étude pratique d'un accumulateur. — La valeur pratique d'un accumulateur se détermine en construisant des

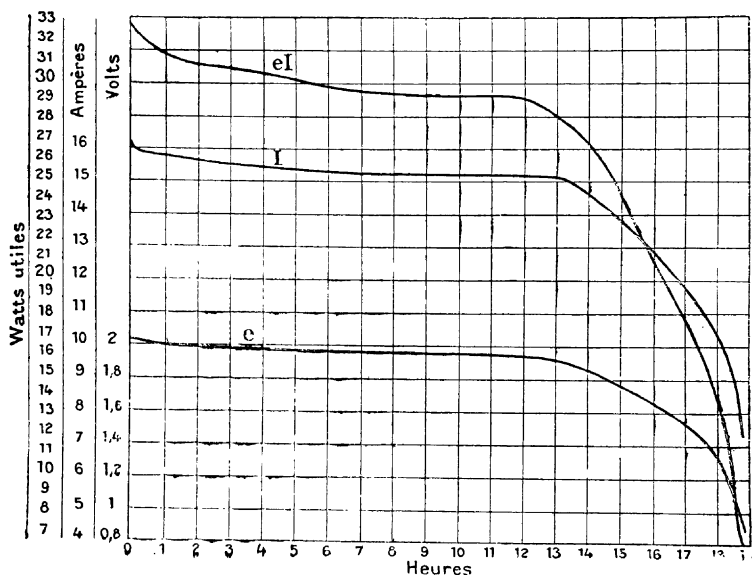


Fig. 152. — Courbes de décharge d'un accumulateur.

courbes de charge et de décharge en fonction du temps. La figure 152 représente, à titre d'exemple, le diagramme de décharge d'un accumulateur plomb-plomb, type Gadot 1888. On mesure périodiquement, à l'aide de méthodes connues, la différence de potentiel e aux bornes de l'accumulateur fermé sur une résistance extérieure constante calculée pour faire débiter à l'accumulateur le régime normal maximum pour lequel il est établi, ainsi que l'intensité I correspondante. On obtient la puissance disponible en faisant le produit eI .

Dans le cas particulier, la décharge normale a duré treize

heures, le reste constitue une *queue de décharge* inutilisable dans les applications.

La capacité (électrochimique) en ampères-heure s'obtient en déterminant la surface limitée par l'axe des temps, l'axe des intensités, l'ordonnée $T=13$ et la courbe de l'intensité. Cette capacité électrochimique est d'environ 100 ampères-heure.

L'énergie en watts-heure s'obtient par une opération analogue en considérant la courbe des puissances eI . Elle est d'environ 400 watts-heure.

L'accumulateur pris pour exemple renfermant 16 kilogrammes de plaques et débitant normalement 30 à 32 watts, est caractérisé par les constantes suivantes :

Débit spécifique.	1 ampère par kg de plaques.
Capacité (électrochimique) spécifique.	6 ampères-heure par kg.
Puissance spécifique.	2 watts par kg.
Énergie spécifique	25 watts-heure par kg.

Les rendements se déterminent en construisant des courbes analogues pour la charge, et en faisant les rapports des capacités et des énergies, comme nous l'avons indiqué (331).

APPLICATIONS DES ACCUMULATEURS.

La découverte de G. Planté a rendu d'immenses services industriels et reçu dans cet ordre d'idées un grand nombre d'applications dont nous réservons l'étude. Nous ne considérerons ici que les applications scientifiques.

333. Transformations de l'énergie électrique. — L'accumulateur donne le moyen de modifier à volonté les facteurs de l'énergie fournie par un générateur électrique à courant continu. Cette énergie a pour expression générale

$$\int eI dt.$$

En l'emmagasinant dans un accumulateur ou une série d'accumulateurs appropriés, on peut augmenter le débit et dépenser en un temps très court toute l'énergie fournie en un temps plus long, et séparer l'époque de la production de celle de l'utilisation; de là le nom de *transformateur différé* donné

quelquefois à l'accumulateur lorsqu'on le considère comme transformateur d'énergie électrique.

De plus, par des couplages appropriés d'éléments, on peut augmenter à volonté l'un ou l'autre des facteurs e ou I aux dépens de l'autre, et réaliser ainsi des potentiels élevés ou des intensités considérables, suivant que ces éléments sont couplés en tension ou en quantité.

C'est ainsi que Planté a pu, en chargeant 800 petits couples secondaires en quantité et en les couplant ensuite en tension, obtenir une force électromotrice de plus de 1 600 volts et alimenter *directement* un tube de Geissler par le courant continu de haute tension fourni par sa pile à travers la résistance considérable du tube.

D'autre part, en accumulant pendant un temps assez long l'énergie fournie par un petit nombre d'éléments de pile à faible débit dans un accumulateur de faible résistance intérieure à grande surface, on peut dépenser toute l'énergie ainsi accumulée en un temps très court, faire rougir et fondre des fils de platine ou de cuivre de plusieurs millimètres de diamètre, et produire des courants intenses et de faible durée.

334. Étalonnage des appareils de mesure à haut potentiel. Recherches scientifiques. — Comme on ne dispose pas toujours dans les laboratoires de générateurs électriques produisant des potentiels élevés, il est commode d'avoir recours à des séries d'accumulateurs chargées en dérivation et couplées en tension qui fournissent alors le potentiel nécessaire à l'étalonnage des appareils de mesure, au fonctionnement de la machine rhéostatique (289), aux divers appareils de démonstration servant à montrer la parfaite identité entre l'électricité dite dynamique et l'électricité dite statique, et à un grand nombre d'autres recherches scientifiques dont on trouvera un remarquable exposé dans l'ouvrage de G. Planté.

CHAPITRE X

ÉLECTROTHERMIE

Nous comprenons sous le titre général d'électrothermie l'ensemble des phénomènes dans lesquels entrent en jeu des actions électriques et calorifiques. L'électrothermie constitue d'ailleurs deux parties essentiellement distinctes, et que nous étudierons dans l'ordre suivant :

1° *Chaleur produite par l'énergie électrique ou actions calorifiques du courant ;*

2° *Énergie électrique produite par la chaleur ou thermo-électricité.*

ACTIONS CALORIFIQUES DU COURANT.

335. Chaleur produite par les courants. Loi de Joule. — Lorsqu'un courant traverse un conducteur qui n'est le siège d'aucune force électromotrice, une partie de l'énergie électrique représentée par le passage de ce courant est transformée en chaleur.

Joule et *Lenz* ont étudié, à l'aide du calorimètre, les lois de ce phénomène et reconnu que la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle :

- 1° A la résistance R du conducteur ;
- 2° Au carré de l'intensité I du courant ;
- 3° Au temps de passage t du courant.

Si les résistances sont exprimées en ohms, les intensités en

ampères et les temps en secondes, l'énergie électrique W a pour valeur

$$W = RI^2t \text{ joules}$$

et, si on l'exprime en calories (g-d),

$$W = 0,24 RI^2t \text{ calories (g-d).}$$

Dans un circuit conducteur qui n'est le siège d'aucune force électromotrice, l'énergie électrique fournie entre deux points d'un circuit est intégralement transformée en *énergie thermique* ⁽¹⁾.

En tenant compte des relations précédemment établies, la formule ci-dessus prend encore les deux formes suivantes :

$$W = EIt \text{ joules} = 0,24 EIt \text{ calories (g-d)}$$

$$W = \frac{E^2}{R} t \text{ joules} = 0,24 \frac{E^2}{R} t \text{ calories (g-d)}$$

Ces relations sont connues sous le nom de *loi de Joule*, en l'honneur du physicien qui l'a formulée le premier. Nous en examinerons les principales conséquences et nous en indiquerons quelques applications à la mesure.

336. Élévation de température. — Lorsqu'un courant traverse un conducteur et qu'il l'échauffe, la température s'élève jusqu'à ce que la quantité de chaleur dissipée par rayonnement et convection en un temps donné soit égale à la

(1) L'expression *puissance calorifique* étant aujourd'hui universellement employée pour désigner le rapport de la chaleur dégagée par la combustion d'une masse donnée de combustible à cette masse, nous croyons qu'il convient d'appliquer le nom d'*énergie thermique* à l'énergie transformée en chaleur dans un conducteur, en vertu de la loi de Joule, et le nom de *puissance thermique* au rapport de cette quantité de chaleur au temps mis à la produire.

Dans le système électromagnétique C.G.S. pratique, l'énergie thermique se mesure en *joules* et la puissance thermique en *watts* (167). En industrie, l'énergie thermique se mesure en calories (g-d) ou en calories (kg-d), la puissance thermique en calories (g-d) par seconde ou en calories (kg-d) par seconde.

Pour passer des unités pratiques aux unités industrielles courantes, calorie (kg-d) et calorie (g-d), ou réciproquement, il suffit de se rappeler que :

$$1 \text{ calorie (kg-d)} = 4169 \text{ joules.}$$

$$1 \text{ calorie (g-d)} = 4,17 \text{ —}$$

$$1 \text{ joule} = 0,24 \text{ calorie (g-d).}$$

quantité de chaleur fournie par le courant pendant le même temps.

La température peut ainsi devenir assez élevée pour que le conducteur rougisse, devienne lumineux et fonde ou brûle, suivant sa nature. On démontre l'influence de la nature des métaux sur leur échauffement à l'aide d'une expérience très élégante connue sous le nom de *chaîne de Children*. Cette chaîne est composée d'anneaux de même section transversale et formés alternativement de cuivre et de platine. En envoyant dans cette chaîne un courant graduellement croissant, on voit le platine atteindre le blanc éblouissant alors que le cuivre rougit à peine. L'élévation de température que subit un conducteur traversé par un courant donné dépend d'ailleurs des facilités de refroidissement qu'il rencontre, et de la nature du milieu qui l'environne. La question peut se traiter par le calcul lorsque l'on considère des conducteurs de différentes sections placés dans les mêmes conditions de refroidissement.

337. Calcul des rhéostats. — Un rhéostat (192) est un appareil ayant pour but d'intercaler dans un circuit traversé par un courant I une résistance R , et de dissiper par rayonnement et convection une puissance thermique correspondante RI^2 sans chauffer dangereusement. Il faut donc calculer la section de chacune de ses parties d'après l'intensité maxima du courant qui doit la traverser. Considérons d'abord un rhéostat à fil de section circulaire. Soient

d et l le diamètre et la longueur du fil en cm ;

s sa section en cm^2 ;

α sa résistance spécifique en ohms-cm ;

R sa résistance en ohms ;

S sa surface de refroidissement en cm^2 .

On a les relations évidentes :

$$s = \frac{\pi d^2}{4} \text{ cm}^2; \quad R = \frac{4\alpha l}{\pi d^2} \text{ ohms}; \quad S = \pi d l \text{ cm}^2$$

et, en appelant P la puissance électrique dépensée dans le rhéostat traversé par le courant maximum

$$P = RI^2 = \frac{4\alpha l}{\pi d^2} I^2 \text{ watts.} \quad (1)$$

Si les conditions dans lesquelles le fil est placé permettent de dissiper par rayonnements k watts par cm^2 , on aura finalement, en écrivant l'égalité entre kS et l'équation (1) :

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\alpha I^2}{k\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{4\alpha}{k\pi^2}} I^{\frac{2}{3}}.$$

Valeurs pratiques de k . — La surface donnée aux rhéostats ordinaires varie entre 0,15 et 0,20 cm^2 par watt à dissiper. Plus on fait k petit, plus le rhéostat est coûteux, mais moins il chauffe. Il y a intérêt à multiplier le nombre des fils d'un rhéostat et à les monter en dérivation, au lieu d'augmenter la section. Des lames plates sont toujours, à section égale, préférables aux fils cylindriques, la surface de refroidissement étant plus grande.

338. Fusion des conducteurs. — Lorsqu'un fil traversé par un courant est assez long pour qu'on puisse négliger le refroidissement dû à la conductibilité des attaches, le courant qu'il peut supporter sans fondre est une fonction du diamètre et d'une constante dépendant de la nature du fil. En appelant a cette constante, et en supposant le rayonnement par unité de surface constant pour une température donnée, on démontre facilement les deux relations :

$$I = ad^{\frac{3}{2}}; \quad d = \left(\frac{I}{a}\right)^{\frac{2}{3}}.$$

M. W.-H. Prece (1888) a déterminé, à la suite d'un grand nombre d'expériences, les valeurs de a relatives à différents métaux pour des fils dont la longueur dépasse 15 cm; voici les valeurs de a suivant qu'on exprime d en cm ou en mm.

	a (d en cm).	a (d en mm)
Cuivre.	2530,0	80,0
Aluminium.	1873,0	59,2
Platine.	1277,0	40,4
Maillechort.	1292,0	40,8
Platinoïde.	1173,0	37,1
Fer.	776,4	24,1
Étain.	405,5	12,8
Plomb.	340,6	10,8
Alliage (2 de plomb et 1 d'étain).	325,5	10,3

Ces chiffres se rapportent à des fils placés dans un air calme et dont la température moyenne est d'environ 15° C.

Application numérique. — Si l'on fait, par exemple, $d=1$ mm, les chiffres de la dernière colonne représentent numériquement l'intensité en ampères du courant produisant la fusion du fil. On voit qu'un fil de cuivre de 1 mm de diamètre peut supporter 80 ampères avant de fondre, et un fil de plomb 10,8 ampères seulement.

Des expériences récentes faites par M. A. Bernstein ⁽¹⁾ ont établi que le nombre de watts par cm² nécessaire pour maintenir un fil à une température donnée est indépendant du diamètre lorsque le fil est placé dans un vide bien fait.

Lorsque le vide est imparfait, et, à fortiori, dans l'air à la pression ordinaire, la convection joue un rôle très important, et les fils les plus fins se refroidissent beaucoup plus que les gros à surface égale et à watts égaux. Ces conclusions sont favorables aux lampes à incandescence à gros filament et aux rhéostats à fils fins.

339. Coupe-circuits. Amorces. — Un *coupe-circuit* est un appareil de sécurité destiné à interrompre automatiquement la continuité d'un circuit lorsque, pour une cause quelconque, accidentelle en général, l'intensité dépasse une certaine limite pour laquelle l'appareil a été établi. Cette interruption est produite, le plus souvent, par la fusion d'un fil métallique ou d'une lame fondant à une température assez basse pour que la chute du métal fondu ne puisse mettre le feu aux matières sur lesquelles il tombe. M. Grassot ⁽²⁾ a reconnu par expérience que dans l'air, à la température ordinaire, il n'y a de relation simple entre le diamètre du fil et l'intensité du courant produisant la fusion, que lorsque la longueur du fil dépasse 8 ou 10 cm. Au-dessous, le refroidissement produit par les attaches joue un rôle important, d'autant plus important que le fil est plus court. La figure 453 montre les résultats obtenus avec du fil de plomb de différents diamètres et de différentes longueurs, tendus *horizontalement* dans l'air dans les mêmes pinces.

La longueur des coupe-circuits étant généralement inférieure

(1) *Centralblatt für Elektrotechnik*, 1889.

(2) *Électricien* du 3 juillet 1886, p. 419.

à 8 ou 10 cm, ces expériences prouvent que la section à donner pour un alliage déterminé mis dans un coupe-circuit de forme donnée ne peut se déterminer par le calcul.

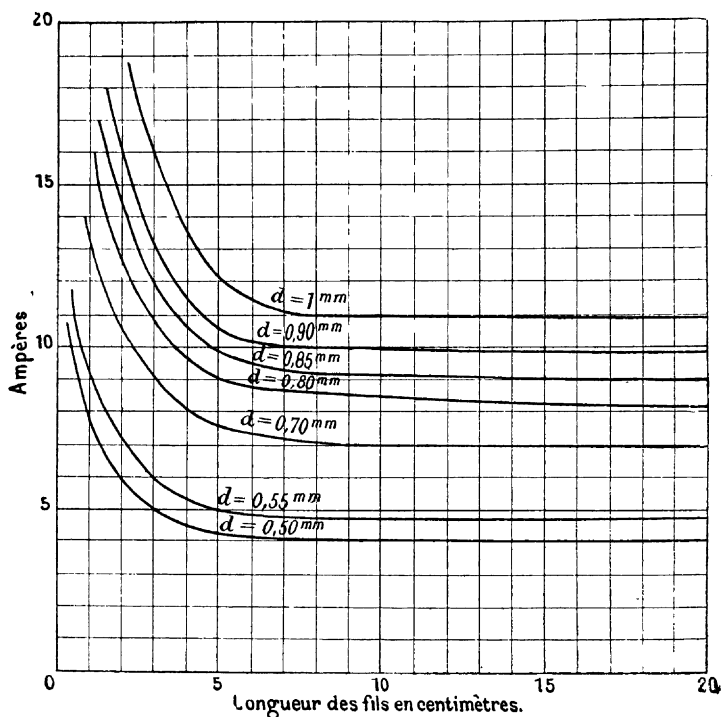


Fig. 153. — Fusion des fils de plomb en fonction du diamètre et de la longueur.

Il en est de même pour les *amorces* en fil de platine ou de platine iridié dont la longueur est très courte et pour laquelle le refroidissement dû aux attaches joue un rôle important ⁽¹⁾. Nous reviendrons sur cette question à propos des applications.

340. Voltmètres thermiques. — L'idée d'appliquer les actions calorifiques d'un courant à sa mesure a été réalisée pour la première fois par *Bréquet*, en 1865, à l'aide de son thermomètre électrique.

M. Geo. Hopkins ⁽²⁾ a décrit sous le nom d'*expansion voltmeter*

⁽¹⁾ MM. V. Brunier et E. Guillemin, *Manuel sur l'inflammation des mines par l'électricité*.

⁽²⁾ *Scientific American* du 9 juillet 1881.

un galvanomètre à fils de platine dans lequel le courant produit la dilatation à deux fils, l'un commandant l'aiguille indicatrice, l'autre déplaçant l'échelle graduée en sens inverse pour augmenter la sensibilité de l'appareil et compenser l'influence de la température. Le premier voltmètre industriel fondé sur les actions thermiques est dû à M. le capitaine Cardew.

Voltmètre de Cardew (1883). — Cet appareil se compose en principe d'un fil de platine-argent ayant environ 0,063 mm de diamètre renfermé dans un tube de laiton. La différence de potentiel à mesurer est appliquée aux extrémités du fil qui est chauffé par le courant à mesurer : le fil se dilate et l'on mesure cette dilatation par un système indicateur et amplificateur approprié. L'appareil s'applique également bien aux courants continus, redressés ou alternatifs (267), mais il importe de remarquer que l'appareil prend une position d'équilibre pour chaque valeur moyenne de E^2 , et que ses indications, après graduation expérimentale à l'aide d'un courant continu, correspondent à $\sqrt{(E^2)_{\text{moy}}}$, et non pas à E_{moy} , c'est-à-dire que l'appareil mesure la racine carrée de la moyenne des carrés des différences de potentiel, et non pas la différence de potentiel moyenne. C'est d'ailleurs un avantage, puisque nous avons établi (267) que c'est seulement la valeur de $\sqrt{(E^2)_{\text{moy}}}$ qu'il importe de connaître.

L'appareil est à lecture directe, apériodique, insensible aux actions magnétiques extérieures et suffisamment transportable, bien que peu portatif. Par contre, il dépense une puissance relativement grande ; le zéro est indéterminé ; il est peu sensible dans la partie basse de l'échelle et assez inexact dans les parties supérieures de la graduation.

MM. *Ayrton* et *Perry* (1887) ont modifié l'appareil de Cardew et l'ont rendu propre à la mesure des faibles différences de potentiel (3 à 4 volts) en le disposant comme nous allons l'indiquer. Un fil fin W (fig. 154) de 17 cm de longueur est tendu entre deux supports rigides A et B : si on lui fait prendre une position légèrement oblique à l'aide d'un ressort amplificateur à double enroulement attaché par un bout au fil et à l'autre à un support fixe S, on a un appareil assez sensible pour que la chaleur de la main produise le déplacement de l'index P.

L'absence de tout engrenage, la fixité des attaches et la

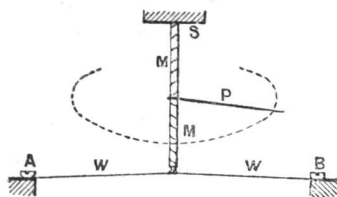


Fig. 154.

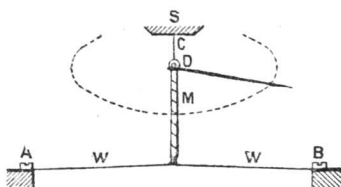


Fig. 155.

finesse du fil rendent le système remarquablement apériodique, et en renfermant le fil dans un petit tube métallique, on a un

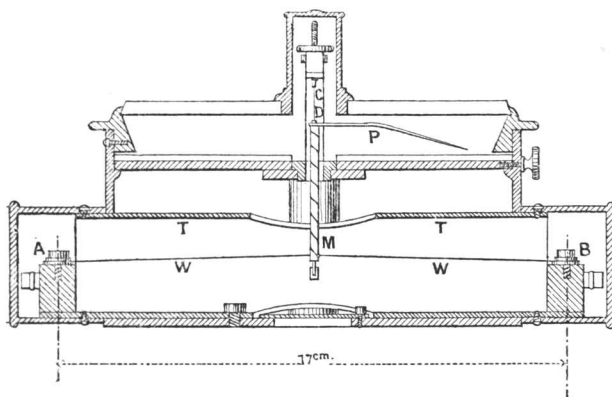


Fig. 156. — Voltmètre thermique de M. Ayrton.

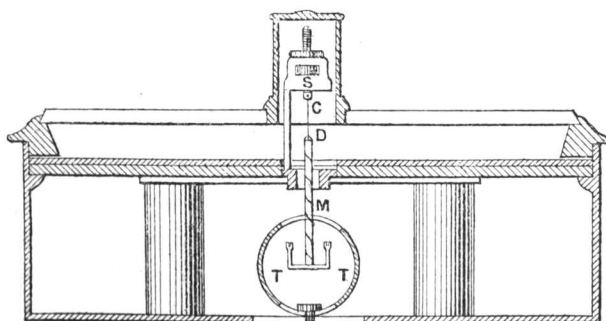


Fig. 157. — Voltmètre thermique de M. Ayrton.

voltmètre mesurant des fractions de volt, avec des lectures bien définies, même très près du zéro. Le ressort à double enroule-

ment avait pour but d'éviter toute torsion du fil W, mais un des assistants de M. Ayrton est parvenu à supprimer la moitié de ce ressort et à rendre l'appareil plus compact en introduisant un morceau de fil fin C D entre le ressort et le fil W, ou entre le ressort et le support S (fig. 155).

Après de nombreuses expériences faites pour déterminer les meilleures proportions à donner à l'appareil, et étudier les dispositions de détail les plus convenables, MM. Ayrton et Perry se sont arrêtés à la forme suivante (fig. 156 et 157). Deux fils W de 0,0035 cm de diamètre, placés dans un tube horizontal T, agissent sur le ressort M à l'aide d'un étrier sur lequel ils appuient.

Pour faire varier la sensibilité de l'appareil, les auteurs ont combiné une disposition à plusieurs fils que l'on peut coupler à volonté en tension ou en dérivation. Ainsi, un appareil à 4 fils donne 39 degrés pour 15 volts, lorsque les fils sont couplés en tension, et 295 degrés lorsqu'ils sont couplés en dérivation. Dans d'autres modèles, les fils sont disposés comme les rayons d'une roue de vélocipède.

341. Ampèremètre thermique. — M. d'Arsonval⁽¹⁾ a réalisé un ampèremètre thermique en disposant un fil traversé par un courant électrique dans une des boules d'un thermomètre de Leslie : l'air enfermé dans la boule s'échauffe et produit une dénivellation du mercure fonction du carré de l'intensité moyenne du courant. Cet appareil n'est pas encore employé industriellement. Il se transforme en voltmètre thermique en faisant le fil de platine long et fin.

M. Geyer-Bristol (1888) a réalisé un ampèremètre enregistreur formé d'une lame de maillechort et d'un fil isolé disposé parallèlement à la lame soudée à l'une de ses extrémités. Le fil isolé et recouvert est rendu solidaire de la lame par des attaches appropriées. Quand un courant traverse le système, le fil s'échauffe plus que la lame, il se dilate davantage, la lame se courbe, et vient tracer une courbe sur un disque de papier animé d'un mouvement de rotation uniforme, à l'aide d'une plume fixée à son extrémité.

(1) *La Lumière électrique* du 18 octobre 1884.

Tous ces appareils exigent une graduation faite à l'aide d'un courant continu, car ils ne fournissent que des indications empiriques.

342. Compteurs d'électricité. — En 1887, M. Geo. Forbes a réalisé un compteur (de quantité) d'électricité basé sur la chaleur dégagée par les courants. Cet appareil se compose essentiellement d'une spirale plate de fil de fer au-dessus de laquelle se trouve un petit moulinet en mica très mince dont l'axe engrène avec un mouvement d'horlogerie.

L'air chaud produit un courant ascendant qui, entre certaines limites, fait tourner le moulinet à une vitesse angulaire proportionnelle à $\sqrt{(I^2)_{\text{moy}}}$. Le nombre de tours totalisé par le mouvement d'horlogerie fait connaître $\int \sqrt{(I^2)_{\text{moy}}} dt$. L'appareil n'est donc pas un *coulombs-mètre* au sens absolu du mot.

M. Frederick J. Smith ⁽¹⁾ a signalé un appareil d'expérience capable de fournir des indications de même nature. ABC (fig. 158) est un tube en U portant une branche en D. La branche C est entourée d'un large tube dans lequel on peut faire circuler, à volonté, de l'eau de refroidissement. La branche A est entourée de coton ou autre corps mauvais conducteur de la chaleur, et renferme une bobine de fil ou deux fils parallèles occupant toute la longueur du tube en U rempli d'huile minérale jusqu'à 0,5 cm du bord supérieur de C. Un courant électrique envoyé dans la bobine de fil chauffe le liquide contenu dans la branche A ; sa densité diminue, sa longueur augmente, et lorsqu'il arrive en D, il s'écoule et retombe en C. Le nombre de gouttes coulant en un temps donné dans certaines circonstances indique la quantité de chaleur fournie au liquide A et, par suite, la quantité d'électricité qui l'a fournie. En donnant 2 m de hauteur à la branche A, on

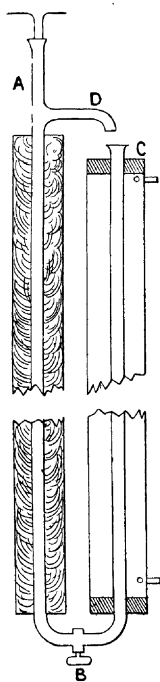


Fig. 158.

(1) *Philosophical Magazine*, janvier 1889.

peut avoir entre D et C une distance suffisante pour y intercaler un mesureur du liquide écoulé. L'appareil fonctionne avec des courants continus ou alternatifs. Le robinet B a pour but d'étrangler le passage du liquide revenant en A et d'arrêter ainsi de brusques oscillations. M. Smith espère arriver à réaliser ainsi un compteur simple et exact.

343. Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur. — Un tube en verre en spirale convenablement isolé au point de vue thermique est traversé par un fil de maillechort ou de platine dans lequel passe un courant d'intensité connue. On peut remplacer le tube en verre par un tube métallique mince traversé par le courant électrique et le courant d'eau. On fait arriver de l'eau par la partie inférieure du tube et on la fait échapper par la partie supérieure. Lorsque le régime d'écoulement est établi, on peut déterminer facilement l'équivalent mécanique de la chaleur (113) par de simples déterminations électriques, une mesure thermométrique et une pesée.

Soient M la masse en g écoulée en t secondes, θ' et θ les températures en degrés centigrades de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'appareil, R la résistance en ohms du tube ou du fil de maillechort et I l'intensité du courant en ampères, si on définit l'équivalent mécanique de la chaleur A comme le rapport de la calorie (g-d) au kilogrammètre, on a :

$$\frac{RI^2t}{981} = M(\theta - \theta')A$$

équation d'où l'on déduit A.

344. Applications diverses. — La chaleur dégagée par les courants électriques constitue une des plus importantes applications de l'énergie électrique sur laquelle nous reviendrons en parlant de l'éclairage électrique par arc et par incandescence, de la soudure électrique, de l'inflammation des amorces, de la fabrication du bronze et alliages d'aluminium, etc.

Nous avons déjà signalé l'influence de la chaleur sur les propriétés électriques des différentes substances (171); nous aurons l'occasion d'en rencontrer d'autres à propos de la thermo-électricité et de l'aimantation due aux courants, phénomènes plus com-

plexes dans lesquels interviennent des actions plus complexes que celles résultant de la simple loi de Joule.

THERMO-ÉLECTRICITÉ.

345. Courants thermo-électriques. — D'après la loi des contacts successifs de Volta (296), chaque point de contact ou de soudure de deux métaux est le siège d'une force électromotrice fonction de la température, et il ne peut y avoir de courant dans un circuit hétérogène dont tous les points sont à la même température, pas plus que dans un circuit homogène dont les divers points sont à des températures différentes.

Si, dans un circuit formé de deux métaux hétérogènes, on chauffe l'une des soudures, les forces électromotrices de contact ne seront plus les mêmes, et le circuit sera alors traversé par un courant.

Ce fait fondamental a été découvert en 1821 par *Thomas Seebeck*. Les phénomènes de cette nature sont des *phénomènes thermo-électriques*, et leur ensemble forme la *thermo-électricité*.

Le sens du courant développé dans un circuit formé de substances hétérogènes dont les soudures sont à des températures différentes dépend de la nature des substances, de la différence de température des soudures et de leur température *moyenne*.

Exemple : Avec un barreau de bismuth dont les extrémités sont réunies par une lame de cuivre, si l'une des soudures est à la température ambiante et que l'on chauffe l'autre soudure à l'aide d'une lampe à alcool ou d'un bec de gaz, le courant va du bismuth au cuivre à travers la soudure la plus chaude; le

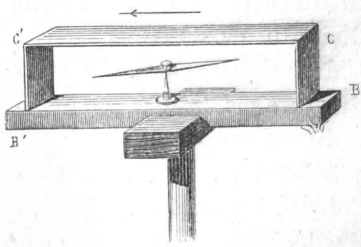


Fig. 159. — Expérience de Thomas Seebeck.

sens de ce courant peut se montrer soit en intercalant dans le circuit un galvanoscope sensible, soit en formant un cadre galvanométrique avec les deux métaux (fig. 159).

L'aiguille aimantée placée au centre du cadre est fortement déviée sous l'action du passage du courant.

Bien que les forces électromotrices ainsi développées soient faibles, le courant est cependant assez intense, à cause de la faible résistance du circuit.

Lorsque deux corps A et B sont tels que l'élévation de température de leur soudure produise un courant allant de A à B à travers la soudure chaude, on dit que A est plus thermopositif que B, et on appelle *température moyenne* du couple, la moyenne arithmétique des températures des deux soudures.

Pour une température moyenne donnée, on peut dresser une liste formant une série continue, dans laquelle chacun des métaux est thermopositif par rapport à ceux qui le suivent et thermonégatif par rapport à ceux qui le précèdent.

On nomme *pouvoir thermo-électrique* de deux métaux la valeur vers laquelle tend le rapport $\frac{dE}{d\theta}$ de la force thermo-électromotrice à la température pour une très petite variation de la température θ . Il est fonction de la température.

Table des pouvoirs thermo-électriques des métaux

PAR RAPPORT AU PLOMB, A UNE TEMPÉRATURE MOYENNE DE 20° C. (Matthiessen).

(Les pouvoirs thermo-électriques sont exprimés en microvolts par degré centigrade)

Bismuth du commerce en fil.	+97,0	Argent pur	— 3,0
Bismuth pur en fil.	+89,0	Zinc pur.	— 3,7
Bismuth cristallisé direction de l'axe.	+65,0	Cuivre galvanoplastique.	— 3,8
Bismuth cristallisé, direction normale à l'axe.	+45,0	Antimoine du commerce en fil.	— 6,0
Cobalt.	+22,0	Arsenic	— 13,56
Maillechort.	+11,55	Fer, fil de piano	— 17,50
Mercure.	+0,418	Antimoine cristallisé, direction de l'axe.	— 22,60
PLOMB	0	Antimoine cristallisé, direction normale à l'axe.	— 26,40
Étain.	— 0,1	Phosphore rouge.	— 29,70
Cuivre du commerce	— 0,1	Tellure.	— 502,00
Platine.	— 0,9	Sélénium	— 807,00
Or	— 1,2		
Antimoine pur en fil	— 2,8		

La table ci-contre donne la valeur en microvolts par degré centigrade des pouvoirs thermo-électriques des différents métaux, le plomb étant pris pour étalon. Le bismuth étant le métal le plus thermopositif et l'antimoine le métal le plus thermonégatif, le courant produit par cette force électromotrice sera dirigé du bismuth à l'antimoine à travers la soudure chaude, et de l'antimoine au bismuth à travers le circuit extérieur.

L'impureté des métaux influe beaucoup sur leur force thermo-électromotrice ; certains alliages et certains sulfures, la galène par exemple, ont une force thermo-électrique très grande ; malheureusement, la résistance électrique s'accroît dans des proportions équivalentes, ce qui compense l'avantage industriel qui pourrait résulter de l'emploi de ces sulfures.

346. Théorie de la pile thermo-électrique. — Le point de contact de deux métaux est le siège d'une force électromotrice dont la valeur est une fonction de la température. La force électromotrice d'un couple est donc la somme algébrique des forces électromotrices développées, par rapport au plomb, aux points de contact. En appelant E_1 et E_2 les forces électromotrices développées aux deux points de contact et R la résistance du circuit

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R}.$$

Il ne peut pas y avoir de courant dans un circuit composé de plusieurs métaux à la même température, parce que la somme des forces électromotrices des contacts successifs est nulle (296). Une pile thermo-électrique peut donc être considérée comme un générateur qui transforme directement la chaleur en énergie électrique, la soudure chaude fournissant, dans un temps dt , une quantité de chaleur égale à $E_1 I dt$, la soudure froide en absorbant une quantité égale à $E_2 I dt$.

La différence entre ces deux quantités d'énergie apparaît dans le circuit extérieur sous forme de chaleur, et a pour valeur $RI^2 dt$.

Dans un circuit thermo-électrique, le courant tend à refroidir la soudure chaude et à échauffer la soudure froide : il faut

donc fournir de la chaleur à la soudure chaude et absorber par une cause de refroidissement extérieure, la chaleur apportée à la soudure froide. C'est un phénomène de *transport électrique de chaleur* dont nous reparlerons à propos de l'*effet Peltier* (349) et de l'*effet Thomson* (350).

Ce simple raisonnement suffit à justifier quatre des cinq lois principales qui régissent les phénomènes thermo-électriques, lois établies expérimentalement et que nous allons énoncer.

Lorsque deux corps A et B ont leurs soudures à des températures θ et θ' , nous représenterons par le symbole $E_{\theta}^{\theta'}$ (AB) la force électromotrice du couple formé, le courant allant de A vers B à travers la soudure la plus chaude.

1° LOI DE VOLTA. — *Dans un circuit métallique quelconque, dont tous les points sont à la même température, il n'y a jamais de courant.* C'est une conséquence directe de la loi du contact (295) et du principe de la conservation de l'énergie.

2° LOI DE MAGNUS. — *Dans un circuit homogène, il n'y a jamais de courant permanent.* Il en résulte que, quelles que soient les distributions des températures dans un circuit homogène, la différence de potentiel entre deux points à la même température est nulle.

3° LOI DES TEMPÉRATURES SUCCESSIVES (Becquerel). — *La force électromotrice d'un couple relative à deux températures θ et θ' est égale à la somme des forces électromotrices qui correspondent à θ et θ_1 d'une part, et à θ_1 et θ' d'autre part, θ_1 étant une température intermédiaire entre θ et θ' .*

4° LOI DES MÉTAUX INTERMÉDIAIRES (Becquerel). — *Lorsque deux métaux A et B sont séparés dans un circuit par un ou plusieurs métaux intermédiaires, tous à la température θ , la force électromotrice est la même que si les deux métaux étaient directement réunis et leur soudure portée à cette température θ .* En particulier, la soudure qui sert à joindre deux métaux ne joue aucun rôle dans les phénomènes thermo-électriques auxquels ils donnent lieu.

La cinquième loi, relative au phénomène découvert par Cumming en 1823, et nommée *inversion thermo-électrique*, ne peut s'expliquer qu'en faisant intervenir des considérations nouvelles qui ont le phénomène d'inversion pour point de départ.

347. Inversion thermo-électrique. Point neutre. —

Lorsqu'on maintient l'une des soudures d'un couple thermo-électrique à une température constante, et que l'on élève la température de l'autre soudure, on constate, suivant la nature des métaux et les températures des soudures, l'un ou l'autre de deux phénomènes bien distincts.

a. La force électromotrice augmente proportionnellement à la différence de température des deux soudures : le couple est dit alors à *marche uniforme*.

b. A partir d'une certaine température, la force électromotrice passe par un maximum, décroît, devient nulle, change de signe, et continue ensuite à augmenter en valeur absolue sans indiquer de nouveau maximum.

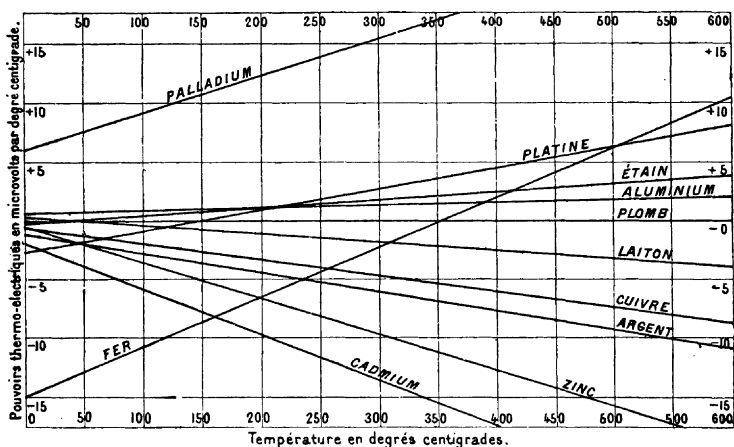


Fig. 160. — Diagramme thermo-électrique de M. Tait.

Le diagramme représentatif de M. Tait (fig. 160) permet de bien se rendre compte de ce phénomène. Dans ce diagramme on a porté en abscisses les *températures moyennes* $\left(\frac{\theta + \theta'}{2}\right)$ des deux soudures d'un couple thermo-électrique, et en ordonnées les pouvoirs thermo-électriques correspondants (345) en microvolts par degré centigrade, par rapport au plomb pris pour étalon.

La distance verticale entre les lignes relatives à deux métaux donnés indique le pouvoir thermo-électrique corres-

pendant des deux métaux pour la température moyenne considérée. Le point d'intersection des deux lignes fait connaître la température moyenne correspondant à l'inversion ou *point neutre*, pour lequel le pouvoir thermo-électrique est nul. A partir de ce point, le pouvoir thermo-électrique change de signe. La surface trapézoïdale comprise entre deux lignes et les deux données correspondant à deux températures données représente la force électromotrice du couple entre ces deux températures.

Considérons par exemple, pour fixer les idées, le couple fer-cuivre, pour lequel le point d'inversion est à 260° C environ. Nous aurons le maximum de force électromotrice en portant l'une des soudures à 260° et l'autre à 0° C. A ce moment, la force électromotrice sera représentée par l'aire du triangle formé par les deux lignes fer et cuivre et l'ordonnée correspondante à la température 0° C. En portant la température de la soudure chaude à 520° C, la force électromotrice du couple sera nulle, étant représentée par la différence des deux triangles égaux. Au delà de 520° , il y aura changement de signe.

Ce mode de représentation est d'autant plus commode à appliquer qu'entre les limites ordinaires pratiques de température, les lignes relatives à chaque métal sont des lignes droites.

Le diagramme montre nettement qu'il ne suffit pas de maintenir une grande différence de température, entre la soudure d'un couple, pour avoir une grande force électromotrice, mais qu'il faut encore faire un choix judicieux des métaux et des températures, afin de toujours rester d'un même côté du point neutre.

Lorsque cette condition est remplie, pour calculer la force thermo-électromotrice d'un couple entre deux températures données, il suffit de multiplier la différence de température par la demi-somme des pouvoirs thermo-électriques des deux métaux aux températures considérées, c'est-à-dire de calculer l'aire du trapèze formé par les deux températures et les deux lignes correspondant aux deux métaux considérés.

Gaugain a imaginé un mode de représentation très net des phénomènes d'inversion, mais d'une réalisation moins simple que le diagramme de Tait, car il faut construire des

hyperboles et des paraboles : nous nous contenterons de le mentionner.

La loi de Volta appliquée à des corps hétérogènes portés à des températures différentes ne suffit pas pour expliquer le phénomène que nous venons de décrire sous le nom d'*inversion*, car on serait alors conduit à admettre la possibilité de réalisation d'un circuit métallique jouissant de la propriété de transporter de la chaleur des points les plus froids sur les points les plus chauds, sans aucune dépense d'énergie, ce qui est en contradiction directe avec le principe de Carnot. La loi de Volta ne suffit à expliquer que les couples thermo-électriques à marche uniforme. Il y a donc dans le circuit des forces électromotrices autres que les forces électromotrices de contact, et pouvant donner lieu à des phénomènes réversibles.

Les effets *Peltier* et *Thomson* sont précisément des cas particuliers de ces forces électromotrices. Leur étude nous permettra d'interpréter facilement le phénomène de l'inversion.

348. Effet Peltier. — Ce phénomène, découvert par *Peltier* en 1834, est l'inverse de l'effet de Seebeck. Un courant électrique traversant la soudure de deux métaux *échauffe* ou *refroidit* cette soudure, suivant le sens dans lequel il la traverse.

Exemple. — Un courant allant du bismuth à l'antimoine à travers une soudure *absorbe* de la chaleur et *refroidit* la soudure. En allant de l'antimoine au bismuth, il dégage de la chaleur et *échauffe* la soudure. L'*effet Peltier* se distingue nettement de la chaleur dégagée par les courants (*effet Joule*), en ce qu'il est proportionnel au courant et réversible, tandis que l'effet Joule, dépendant du carré de l'intensité du courant, n'est pas réversible.

La soudure de deux métaux formant un circuit traversé par un courant électrique est donc le siège d'une force électromotrice constante pour chaque soudure et qu'on nomme *coefficient d'effet Peltier*. Le sens du courant produisant le refroidissement est le même que celui qui produirait l'échauffement de cette soudure. Cet effet tend donc à *affaiblir* le courant, c'est toujours une force *contre-électromotrice*.

Le principe de la conservation de l'énergie rend nécessaire l'existence de cette force contre-électromotrice, car sans cela

un courant accidentel dans un circuit métallique produirait entre la soudure une force électromotrice croissante, qui entre-tiendrait indéfiniment le courant. Dans un circuit dont la soudure chaude est au-dessous du point d'inversion, l'effet Peltier est bien dans ce sens, mais au delà du point neutre, l'effet Peltier doit, au contraire, tendre à augmenter la température de la soudure chaude. Il change de signe au point neutre.

349. Détermination de l'effet Peltier. — Si un courant d'intensité I traverse un circuit formé de deux métaux dans un sens tel qu'il refroidisse la soudure, la quantité d'énergie apparaissant dans le circuit sous forme de chaleur pendant un temps t a pour valeur

$$W_1 = RI^2t - E_p It$$

en appelant E_p le coefficient d'effet Peltier relatif à la soudure. Si on renverse le sens du courant, et qu'on le fasse passer pendant le même temps, il tendra à échauffer la soudure, et l'énergie apparaissant dans le circuit sera

$$W_2 = RI^2t + E_p It.$$

On en déduit

$$E_p It = \frac{W_2 - W_1}{2}$$

et pour le coefficient d'effet Peltier

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{W_2 - W_1}{It}.$$

L'effet Peltier est donc bien une force électromotrice que l'on peut théoriquement déterminer par des mesures calorimétriques, et il est indépendant de la résistance du circuit; mais comme il est toujours compliqué de l'effet Joule, l'effet Peltier ne peut être mis en évidence que pour des courants très faibles. D'après M. J. Joubert ⁽¹⁾, si une soudure fer-cuivre est placée dans de l'eau maintenue à 0° C., et si l'on fait passer un courant de faible intensité du cuivre au fer, il y a absorption de chaleur et l'on voit de la glace se former autour de la soudure. La glace fond quand on fait passer le courant en sens contraire.

(1) J. Joubert, *Traité élémentaire d'électricité*, 1888.

On peut faire les deux expériences en même temps en intercalant un fil de fer entre deux fils de cuivre, et entourant la première soudure d'eau liquide à 0° C, la seconde de glace à 0° C. Il se produit autant de glace autour de la première soudure qu'il s'en fond autour de la seconde.

Le chiffre le plus élevé obtenu pour l'effet Peltier est celui que donne la soudure cuivre et alliage (1 d'antimoine, 10 bismuth). On trouve 0,0219 volt à 25° C. et 0,0274 volt à 100° C.

L'effet Peltier correspond à un transport de chaleur d'un point à un autre du circuit, mais les quantités ainsi transportées étant égales, l'effet Peltier n'intervient pas dans la dépense d'énergie qui se fait tout entière en obéissant à la loi de Joule.

350. Effet Thomson. Chaleur spécifique d'électricité. Transport électrique de la chaleur. — La force électromotrice de contact étant fonction de l'état physique des métaux, et se modifiant avec ses changements moléculaires, Thomson (1856) a été conduit à admettre, en généralisant le principe de Volta, que le point de contact de deux parties d'un même métal à des températures différentes est aussi le siège d'une force électromotrice.

La somme de ces forces électromotrices est nulle dans un fil homogène, mais elle a une valeur finie lorsque les deux métaux, de part et d'autre de la soudure chaude ou froide, sont différents. Dans ces conditions, la force thermo-électromotrice observée se compose des forces électromotrices de contact aux soudures et des forces électromotrices dues aux variations de température le long des métaux. On appelle *effet Thomson* les forces ces électromotrices dues à ces variations de température. Dans conditions, le pouvoir thermo-électrique d'un couple est, pour une température θ_1 , inférieure fixe, égal à la somme des pouvoirs thermo-électriques dus à l'effet Volta et à l'effet Thomson pour la température θ_2 . En désignant respectivement par E_s , E_v , E_T les forces électromotrices dues aux effets Seebeck, Volta et Thomson, on a alors

$$E_s = E_v + E_T$$

et

$$\frac{dE_s}{d\theta_2} = \frac{dE_v}{d\theta_2} + \frac{dE_T}{d\theta_2}.$$

Ces équations permettent de se rendre compte du phénomène d'inversion et de ses conséquences. Nous nous contenterons d'en résumer les principales.

Dans un circuit complexe, on aura évidemment

$$E_S = \Sigma E_V + \Sigma E_T.$$

Le second terme du second membre de cette équation est une fonction de la température. Si on représente par $\int dE_T$ la somme des variations continues de force électromotrice qui se produisent entre deux points d'un conducteur, ces variations ne dépendront que de la nature du conducteur et des températures extrêmes. On peut donc écrire

$$dE_t = f(\theta)d\theta = \sigma d\theta.$$

Sir W. Thomson a donné au facteur σ le nom assez impropre, à notre avis, de *chaleur spécifique d'électricité*. C'est un facteur caractéristique de chaque conducteur et fonction de la température qui permet de calculer le pouvoir thermo-électrique d'une combinaison thermo-électrique donnée.

M. Tait (1871) a admis, ce que l'expérience a confirmé, que la chaleur spécifique d'électricité caractéristique de chaque métal est proportionnelle à la température absolue. Cette hypothèse introduite dans le calcul des pouvoirs thermo-électriques conduit, lorsqu'on rapporte ces pouvoirs thermo-électriques au plomb, dont la chaleur spécifique d'électricité est sensiblement nulle, à représenter les pouvoirs thermo-électriques par des lignes droites inégalement inclinées sur l'axe des températures (fig. 160). Ces droites se coupent entre elles à leurs points neutres correspondants, et la chaleur spécifique d'électricité est l'inclinaison correspondant à chacun des métaux.

L'effet Thomson a pour conséquence un *transport de chaleur* dans un sens ou dans l'autre d'un conducteur homogène porté à une certaine température dans une partie de sa longueur. La répartition de la chaleur, symétrique de part et d'autre du point chauffé, pour un conducteur de section uniforme, devient dissymétrique lorsque le courant passe. Le transport de chaleur est faible et *positif*, c'est-à-dire dans le sens du courant pour le cuivre, plus grand et *négatif*, en sens inverse du courant pour le fer.

M. *Le Roux* a trouvé que l'effet Thomson est proportionnel à l'intensité du courant et sensiblement nul pour le plomb, c'est-à-dire que sa chaleur spécifique d'électricité est nulle. Comme pour l'effet Peltier (349), le transport de chaleur dû à l'effet Thomson n'intervient pas dans la dépense d'énergie qui se fait tout entière en obéissant à la loi de Joule. La considération de ces effets ne présente donc qu'un intérêt théorique, ce qui nous dispense d'insister.

351. Rendement thermodynamique des piles thermo-électriques. -- Dans toutes les piles thermo-électriques connues jusqu'à ce jour, le rendement défini comme le rapport de l'énergie électrique disponible à la quantité de chaleur dépensée pour la produire est toujours resté inférieur à 1 pour 100. La cause principale de ce mauvais rendement provient de la trop grande conductibilité thermique spécifique des éléments, qui laissent passer trop facilement la chaleur des soudures chaudes aux soudures froides, et augmentent ainsi la dépense de chaleur inutilisée. En traitant la question par le calcul, lord Rayleigh ⁽¹⁾ a démontré que le rendement ne dépend pas des valeurs absolues des sections transversales et des longueurs des éléments, non plus que des résistances spécifiques thermique et électrique, mais seulement du rapport de ces résistances. Le rendement serait donc indépendant de la longueur des barreaux et même de la différence de température des soudures ; il serait d'autant plus élevé que le rapport de la *résistance thermique* (en appelant ainsi l'inverse de la conductibilité calorifique) à la résistance électrique serait plus grand. On augmenterait la *puissance* de la pile, en diminuant la longueur des barreaux et en augmentant leur section transversale jusqu'à une certaine limite.

En appliquant les formules établies par lord Rayleigh au couple thermo-électrique fer-maillechoit, entre certaines limites de température, et en comparant la somme d'énergie électrique produite à la somme de travail que pourrait produire une machine thermique parfaite fonctionnant entre les mêmes limites de température, on trouve le nombre 300. Une machine

(1) *British association*, meeting de 1885.

thermique parfaite dépensant une certaine quantité de chaleur produirait donc *trois cents fois* plus de travail mécanique qu'une pile thermo-électrique fer-maillechoit ne produirait d'énergie électrique pour la même dépense de chaleur. La pile thermo-électrique est donc un appareil de transformation très imparfait de l'énergie thermique en énergie électrique.

A ce propos, sir William Thomson a appelé l'attention sur l'influence des variations de la conductibilité thermique et de la conductibilité électrique. Si ces deux conductibilités variaient inégalement, on aurait peut-être là un moyen d'augmenter le rendement. Malheureusement, dans la plupart des métaux, les conductibilités croissent parallèlement, et dans certains métaux propres à constituer des couples thermo-électriques, la conductibilité électrique paraît décroître plus rapidement que la conductibilité thermique, ce qui ne peut avoir qu'une influence fâcheuse sur le rendement.

L'amélioration du rendement des piles thermo-électriques est donc liée à la découverte de corps possédant un pouvoir thermo-électrique élevé, une faible résistance électrique spécifique et une faible conductibilité thermique spécifique.

352. Principaux types de piles thermo-électriques.

— *OErsted* et *Fourier* ont construit la première pile thermo-électrique bismuth-antimoine, modifiée ultérieurement par *Nobili* et appliquée par *Melloni* à son thermo-multiplicateur (356). *Marcus* a employé deux alliages : l'un formé de nickel, cuivre et zinc ; l'autre, d'antimoine, zinc et bismuth. *Pouillet* a utilisé l'élément bismuth-cuivre comme étalon de force électromotrice. En 1865, M. *Edmond Becquerel* a réalisé une pile thermo-électrique formée de sulfure de cuivre artificiel et d'un alliage de cuivre à 10 pour 100 de nickel : la force électromotrice de cette combinaison est assez élevée, mais la grande résistance électrique spécifique du sulfure compense, et au delà, cet avantage.

Tous ces éléments, sauf celui de *Fourier*, sont à peu près abandonnés aujourd'hui. On ne fait usage que de la pile *Noé*, très répandue en Autriche et en Allemagne, et de la pile *Clamond*, employée surtout en France.

353. Pile Noé. — Les métaux employés dans cette pile sont du maillechoit et un alliage zinc-antimoine. A la soudure

chaude, ces métaux sont soudés ensemble sans l'intermédiaire d'aucun métal ; les fils de maillechort pénètrent par leur extrémité dans une petite capsule de laiton qui sert de fond au moule dans lequel on coule l'alliage zinc-antimoine. La figure 161 représente deux éléments en grandeur naturelle ; la petite capsule *c* reste attachée à l'élément et fait partie de l'appareil : une petite tige de cuivre rouge *r* dont l'extrémité se trouve saisie dans le métal fondu amène la chaleur à la soudure chaude par conductibilité. Les extrémités de ces tiges de cuivre forment un petit cercle, saisies entre deux lames de mica et

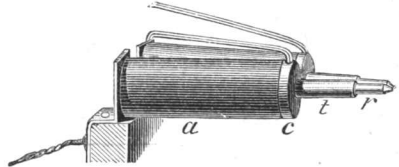


Fig. 161. — Détails d'un élément de la pile Noé.

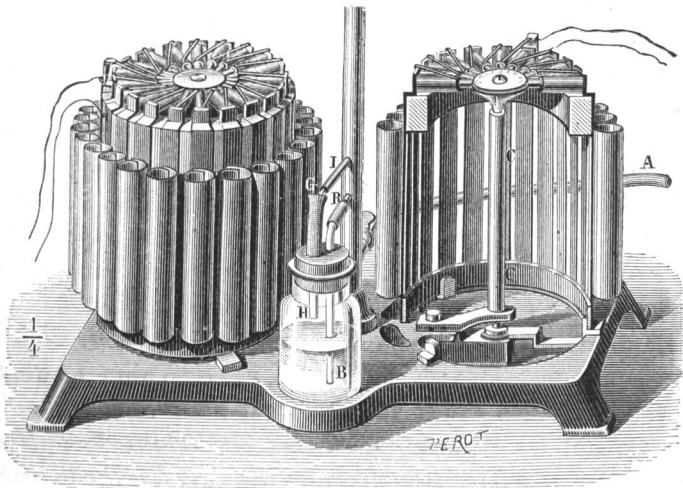


Fig. 162. — Batterie thermo-électrique de Noé.

chauffées toutes à la fois par une flamme unique, bec Bunsen ou lampe à alcool (fig. 162). Pour la soudure froide, le métal fusible est soudé à une plaque de cuivre à laquelle on soude les fils de maillechort de l'élément suivant : cette plaque de cuivre soudée au cylindre vertical présente une grande surface favorable au refroidissement par rayonnement et par convec-

tion. Chaque élément a une force électromotrice de 0,1 volt environ et une résistance intérieure de 0,025 ohm.

354. Pile Clamond (1874). — La pile Clamond est formée d'alliage de zinc et d'antimoine et de lames de fer. L'alliage est

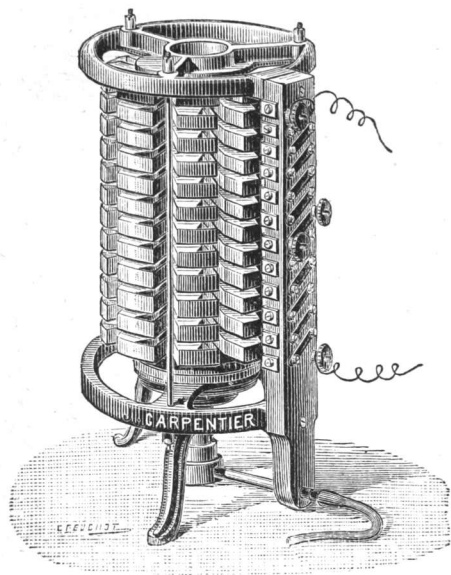


Fig. 163. — Pile Clamond.

coulé en barreaux et les barreaux assemblés en couronnes de 10 éléments que l'on peut, à volonté, coupler en tension ou en dérivation (fig. 163). Ces couronnes superposées sont séparées par des rondelles d'amiante et chauffées au gaz à l'aide d'un tube en terre réfractaire percé de trous par lesquels le gaz mêlé à l'air sort et vient brûler dans l'espace annulaire compris entre le tube et les barreaux. Une pile de 120 éléments en tension a pour constantes en marche normale : $E = 8$ volts ;

$r = 3,2$ ohms. Un autre type de 60 éléments plus gros en tension a pour constantes : $E = 3,6$ volts, $r = 0,65$ ohm. La dépense de gaz varie entre 180 et 200 litres par heure.

En plaçant les éléments dans les conditions de puissance utile maxima (**246**), cette puissance utile est d'environ 5 watts. La production de 1 kilowatt-heure coûte donc au moins

$$\frac{180\ 1000}{5} = 36\ 000 \text{ litres de gaz.}$$

A 0,3 franc le m^3 , prix actuel du gaz à Paris, le kilowatt-heure utile coûterait donc près de 11 francs. Ce prix est prohibitif et suffit à expliquer pourquoi la pile thermo-électrique ne sort pas du domaine du laboratoire et des cabinets de physique.

355. Générateurs thermo-électrochimiques. — Les piles thermo-électriques ne sont pas les seuls appareils de transformation de l'énergie thermique en énergie électrique : cette transformation peut s'effectuer aussi plus ou moins directement à l'aide d'appareils qui font intervenir d'autres actions,

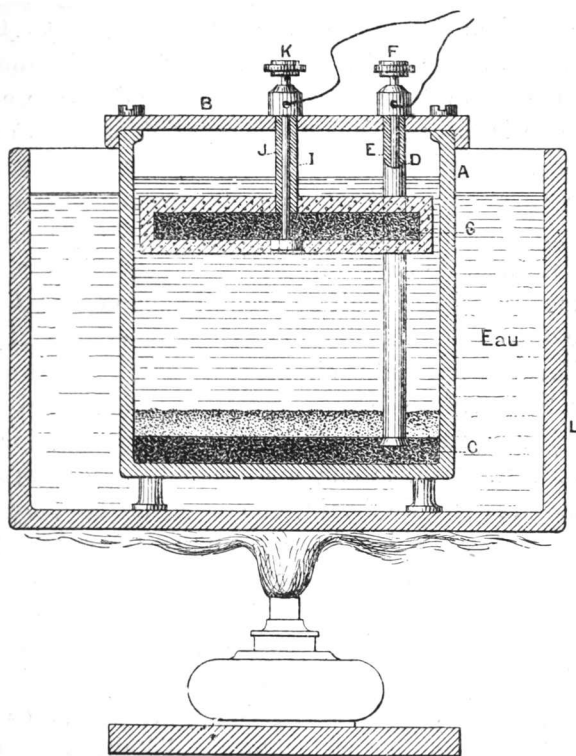


Fig. 164. — Générateur thermo-électrochimique de M. E. Case.

l'action chimique par exemple. Bien que ces appareils n'aient pas encore donné de résultats industriels, il est bon de les signaler pour montrer les voies dans lesquelles on peut espérer rencontrer des résultats nouveaux. Le premier système effectuant une transformation de ce genre a été réalisé par M. *Willard E. Case*, d'Auburn (1886). Son appareil se compose (fig. 164) d'un récipient A, hermétiquement fermé par un couvercle B, et d'une lame de charbon C fixée au fond de ce récipient. Un con-

ducteur D recouvert d'un enduit isolant E sur toute sa longueur est en communication métallique avec la lame de charbon C, et se termine par une borne F formant l'un des pôles de l'élément électrothermique. On place sur la lame de charbon C une couche d'étain finement pulvérisé qui se trouve ainsi en communication électrique directe avec cette lame. Une seconde lame de charbon G est placée à la partie supérieure et communique avec la borne K formant l'autre pôle de l'élément. Cette lame de charbon est entourée d'une couche de matière poreuse telle que de la terre glaise ou une poterie analogue à celle des vases poreux des piles. Le récipient A renferme une solution de chlorure chromique préparée par le procédé bien connu qui consiste à chauffer ensemble de l'acide chromique, de l'acide chlorhydrique et de l'alcool.

L'élément ainsi construit ne produit aucun courant à la température ordinaire, mais dès qu'on chauffe le liquide, le courant se manifeste en fermant le circuit entre F et K. Pour ne pas dépasser la température de 100 degrés centigrades, qui est largement suffisante, l'appareil est placé dans un bain-marie ouvert L. D'après M. E. Case, la chaleur décompose le chlorure chromique, en présence de l'étain, en chlore libre et en protochlorure de chrome : le chlore libre se combine alors avec l'étain et forme du protochlorure d'étain ; un courant électrique s'établit donc par suite de cette réaction à travers le liquide entre l'étain et la lame de charbon G. La plaque C ne sert qu'à établir une communication entre l'étain et la borne F. En maintenant la température constante, le courant continue jusqu'à ce que tout l'étain se transforme en protochlorure d'étain ; toutes les affinités se trouvant alors satisfaites, l'élément se trouve épuisé et le courant cesse.

Mais dès que le liquide se refroidit, le protochlorure d'étain et le protochlorure de chrome réagissent l'un sur l'autre ; il se reforme du chlorure chromique, et l'étain métallique se dépose à nouveau.

L'étain retombe par son propre poids sur la plaque C, et après refroidissement complet, l'appareil se retrouve dans les conditions initiales : il suffit de réchauffer l'appareil à nouveau pour reproduire les mêmes phénomènes. Le but de l'enveloppe

poreuse entourant le charbon G est d'empêcher un dépôt possible d'étain à sa surface. Cet appareil alternativement chauffé et refroidi permet donc de reproduire indéfiniment les mêmes phénomènes et d'obtenir chaque fois une certaine quantité d'énergie électrique sans dépenser autre chose que de la chaleur fournie par une source quelconque : pétrole, charbon, gaz, etc.

En 1886, M. *Legh S. Powel* a signalé aussi un appareil à l'aide duquel il est possible de transformer indéfiniment l'énergie thermique ou l'énergie électrique, l'affinité chimique servant d'intermédiaire dans la transformation.

Lorsqu'un métal est en contact avec un liquide et qu'il existe une différence de température entre le métal et le liquide, il peut se produire soit une action thermo-électrique pure et simple, soit une action thermo-électrochimique, soit enfin une combinaison de ces deux actions. Les actions thermo-électrochimiques présentent, suivant les corps en jeu, des caractères très différents dont l'un d'eux a été nettement mis en évidence par M. *Legh S. Powell*. On remplit un vase à fond plat d'une solution saturée de sulfate de cuivre ne contenant pas d'acide sulfurique libre, et l'on dispose à sa partie inférieure un disque de cuivre plat relié à un fil de cuivre convenablement isolé du liquide. C'est la cathode du couple dont l'anode est formée d'un second disque de cuivre plat disposé au niveau supérieur du liquide, et supporté par un tube de cuivre fixé en son centre. Ce tube est percé d'un certain nombre de trous rayonnants disposés de telle sorte qu'en reliant l'autre extrémité du tube à une prise de gaz on forme un brûleur en rose qui, une fois enflammé, chauffe rapidement le disque. Dès l'allumage, le disque supérieur s'échauffe, et il se développe une force électromotrice entre les deux disques de cuivre : du cuivre se dissout sur le disque chauffé et se dépose sur le disque froid, exactement comme dans une cuve électrolytique, l'action de transport due au courant dans la cuve étant remplacée par un transport de chaleur. D'autres solutions que le sulfate de cuivre donnent des résultats analogues, mais moins bien définis. M. *Powel* fait entrevoir la possibilité d'une pile régénérable fondée sur ce principe en appliquant la chaleur successivement sur les deux électrodes.

La pile thermo-électrique n'est donc pas le seul mode de transformation possible de l'énergie thermique en énergie électrique : la question appelle de nouvelles recherches.

APPLICATIONS DES GÉNÉRATEURS THERMO-ÉLECTRIQUES.

Le prix de revient élevé de l'énergie électrique fournie par la transformation *directe* de l'énergie thermique en énergie électrique s'est opposé *jusqu'à ce jour* au développement industriel des piles thermo-électriques ; malgré la complication des appareils, il est incomparablement plus économique de passer par un intermédiaire, le travail mécanique, à l'aide d'un moteur à vapeur ou à gaz et d'une machine électrique.

Dans quelques cas, où l'on a besoin avant tout d'un générateur commode et parfaitement constant, on utilise avec avantage les piles thermo-électriques. Nous citerons en particulier les analyses électrochimiques et la reproduction galvanoplastique des cartes géographiques. Dans les recherches scientifiques, la pile thermo-électrique est un appareil extrêmement précieux pour la mesure des faibles différences de température, ainsi que pour la détermination de températures élevées.

356. Mesure des températures. — *Nobili et Melloni* ont, dès 1834, appliqué les piles thermo-électriques à la mesure des températures. La pile classique ou *thermo-multiplicateur* de Melloni (fig. 165) se compose d'une série de barres de bismuth et d'antimoine soudées, repliées et superposées de façon à former un faisceau prismatique dans lequel les barreaux sont partout séparés, excepté aux soudures, par l'interposition de petites bandes de papier verni. Les soudures paires forment une *face* de la pile, les soudures impaires l'autre face. Il suffit de très faibles différences de température entre les deux faces pour produire un courant dont on mesure l'intensité par un procédé quelconque, et qui, entre les limites étroites de température pour lesquelles l'appareil est établi, est proportionnel à la différence des températures. Des tubes rectangulaires de cuivre munis d'opercules s'adaptent sur les faces de la pile et s'opposent aux actions du rayonnement latéral.

Sondes thermo-électriques d'Arsonval (1878). — Les aiguilles thermo-électriques formées de deux métaux différents et plongées dans le sang ou le tissu dont on veut déterminer la température sont le siège d'une action chimique qui modifie la force électromotrice. M. d'Arsonval a évité cette action en dispo-

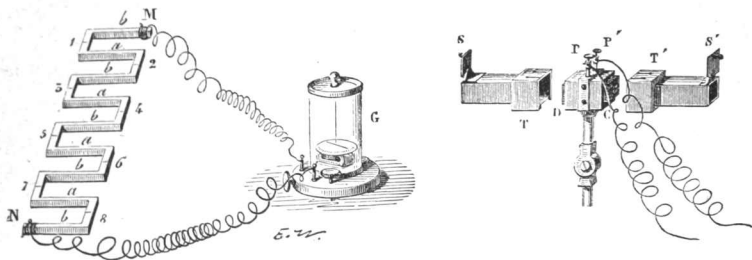


Fig. 165. — Pile thermo-électrique de Melloni. Principe et disposition pratique.

sant un des métaux, sous forme de tube, autour du second métal. Le couple est formé de fer-nickel ou de fer-cobalt donnant une force électromotrice plus élevée que le couple fer-maillechort. On peut employer aussi 'deux fils parallèles (fer-nickel) recouverts, après soudure', d'une couche de nickel déposé par la galvanoplastie.

357. Mesure des températures élevées. — L'emploi des couples thermo-électriques pour la mesure des températures élevées a été proposé dès 1836 par *Pouillet* et *A.-C. Becquerel*. Les expériences de *Regnault* indiquaient des variations notables entre deux expériences successives et celle de *M. Becquerel* une loi complexe reliant les forces électromotrices aux différences de température des soudures.

M. Le Chatelier a repris la question ⁽¹⁾ et établi expérimentalement que le couple *platine pur fondu* — *platine rhodié fondu* à 10 pour 100 est très comparable à lui-même et convient très bien à la mesure des températures.

Les mesures étaient faites avec un galvanomètre à cadre mobile *Deprez d'Arsonval (208)* de 250 ohms de résistance donnant un déplacement de 100 mm sur l'échelle pour 1 centième de volt. La résistance des couples ne dépassait guère 2 ohms.

(1) *Société française de physique*, séance du 7 mai 1886.

CHAPITRE XI

ÉLECTRODYNAMIQUE

358. Définitions. — *L'électrodynamique* comprend l'ensemble des actions des courants sur les courants, actions découvertes par *Ampère* en 1821.

C'est *Ampère* qui a formulé toutes les lois qualitatives et quantitatives de ces actions.

Dans l'état actuel de nos connaissances, on peut, au point de vue qualitatif, réunir toutes les lois relatives aux actions des courants en une seule, préciser le sens de l'action des circuits entre eux en considérant les champs galvaniques (144) produits par chacun des circuits considérés, et formuler cette loi ainsi :

Les actions mécaniques exercées par deux circuits traversés par des courants est telle que le flux résultant devienne maximum, ainsi que l'énergie potentielle, cette position étant celle qui correspond à l'équilibre stable des circuits considérés.

Cas particuliers. — Deux courants parallèles et de même sens s'attirent et tendent à coïncider pour superposer les champs galvaniques qu'ils produisent.

Deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent, puisque, produisant des champs galvaniques opposés, le champ produit par chacun d'eux est d'autant plus grand que l'autre est plus éloigné.

Deux courants angulaires tendent à tourner et à faire passer les courants qui les traversent dans le même sens, puisque c'est la position qui tend à superposer les courants et les flux.

Toutes ces actions sont mises expérimentalement en évidence à l'aide d'un appareil qui porte le nom de *table d'Ampère*, et qui permet de réaliser facilement tous les cas. La règle que nous venons de formuler permet de prévoir, sans expérience préalable, toutes les actions exercées par les circuits entre eux.

Ces actions sont de deux sortes :

1° Les deux circuits tendent vers une portion d'équilibre, les actions sont *directrices* ;

2° Les deux circuits tendent à se déplacer indéfiniment, l'un par rapport à l'autre, et produisent des *rotations électrodynamiques*.

Nous n'étudierons ici que les valeurs des forces exercées entre deux circuits différents ou les différentes parties d'un même circuit. Les mouvements qui se produisent mettent de l'énergie en jeu, et ne pourront être étudiés avec fruit que lorsque nous aurons parlé de l'*induction*, dont les rotations électrodynamiques ne sont que des cas particuliers.

L'étude des *solénoïdes* et des champs galvaniques produits par les courants fera l'objet du chapitre suivant.

359. Action de deux éléments de courant. — *Ampère* a cherché à déduire de l'expérience la loi des actions exercées par deux courants entre eux en la considérant comme la résultante des actions dues à chacun des éléments dans lesquels on peut décomposer le courant. Le problème considéré dans toute sa généralité ne répond qu'à une conception mathématique, mais la méthode reste légitime tant qu'on se propose de déterminer seulement l'action résultante du circuit tout entier, la loi élémentaire étant soumise à la seule condition que l'intégrale relative à un circuit fermé donne, dans tous les cas, un résultat conforme à l'expérience.

Il peut d'ailleurs y avoir plusieurs lois élémentaires satisfaisant à cette condition fondamentale (1). Les principes et faits empruntés à l'expérience sont les suivants :

1° *Égalité de l'action et de la réaction.* — Pas de démonstration fondamentale. Il entraîne comme conséquence que la force exercée entre les deux éléments est dirigée suivant la

(1) MASCART et JOUBERT, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. I, p. 502.

droite qui les joint, proportionnelle à leurs longueurs respectives, à l'intensité du courant qui traverse chacun d'eux, et à une fonction de la distance des éléments et de leurs directions relatives.

2° *L'action change de sens quand on change le sens du courant dans un des circuits ; elle reste de même sens lorsque le sens change à la fois dans les deux circuits.* Fait expérimental résultant aussi de la formule dans laquelle entre le produit des intensités.

3° *Principe de symétrie.* — Il en résulte que l'action de deux éléments a et b , dont l'un est perpendiculaire à l'autre en son milieu, est nulle.

Si l'on considère les deux éléments $a b$ et leurs symétriques (fig. 166) a' et b' par rapport à un plan P parallèle à a et à la

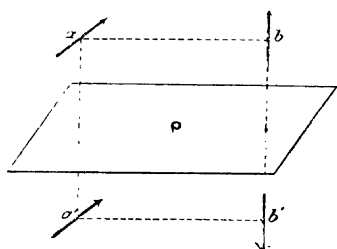


Fig. 166. — Principe de symétrie.

droite joignant $a b$, on voit que les deux forces doivent être égales, mais $a' b'$ n'est pas autre chose que $a b$ dont on a changé le sens du courant dans b . Ces deux forces ne peuvent donc être égales que si elles sont nulles. Il en est de même pour le cas de deux conducteurs perpendiculaires et dans le même plan. L'action est également nulle.

4° *Principe des courants sinueux.* — Deux conducteurs aboutissant aux mêmes extrémités, l'un rectiligne et l'autre sinueux, mais ne s'écartant que très peu du courant rectiligne et traversés par le même courant, mais en sens contraires, ont une action nulle sur un aimant quelconque. Ils forment ce qu'on appelle des *conducteurs adynamiques* (365), le flux de force extérieur résultant étant nul.

Loi élémentaire d'Ampère. — Considérons deux éléments a et b dans une position quelconque (fig. 167), soient dl et dl' leurs longueurs ;

i i' les intensités des courants qui les traversent ;

θ θ' les angles de leurs directions avec la droite qui joint leurs milieux ;

d la longueur de cette droite ;

ω l'angle dièdre des deux plans définis par la droite qui joint les éléments et ces deux éléments.

Prenons pour plan de figure celui qui passe par l'élément de

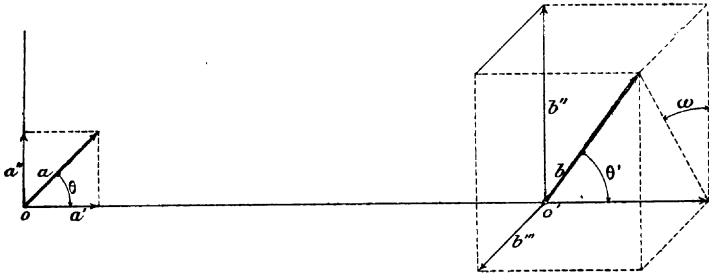


Fig. 167. — Action de deux éléments de courant.

la droite $O O'$, et remplaçons chacun de ces éléments par ses trois projections sur trois axes rectangulaires.

Les projections de l sont :

$$a' = dl \cos \theta; \quad a'' = dl \sin \theta.$$

Les projections de l' sont :

$$b' = dl' \cos \theta; \quad b'' = dl' \sin \theta' \cos \omega; \quad b''' = dl' \cos \theta' \sin \omega.$$

De ces six actions, quatre sont nulles d'après le principe de symétrie. Les seules actions positives sont celle de a' sur b' et celle de a'' sur b'' .

a' sur b' s'exerce suivant des éléments dirigés, suivant une même droite et peut se représenter par

$$ii' dl dl' \cos \theta \cos \theta' . f_1(d).$$

a'' sur b'' s'exerce entre deux éléments parallèles entre eux et perpendiculaires à la droite qui joint leur milieu et peut se représenter par

$$ii' dl dl' \sin \theta \sin \theta' \cos \omega . f_2(d).$$

L'action totale a donc pour valeur

$$dF = ii' dl dl' (\cos \theta \cos \theta' f_1(d) + \sin \theta \sin \theta' \cos \omega . f_2(d)).$$

Dans cette expression, $f_1(d)$ et $f_2(d)$ sont des fonctions tou-

jours positives de la distance d des éléments, ainsi que des intensités i et i' des deux courants. Pour les déterminer, Ampère a considéré l'action de trois courants semblables ⁽¹⁾. La démonstration d'Ampère réduite à ses points essentiels a été reproduite dans les *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, de MM. Mascart et Joubert (t. I, pages 512-521). Lamé, Blanchet et M. Bertrand ⁽²⁾ en ont donné d'autres démonstrations rigoureuses et élégantes, mais dont les calculs sont longs et compliqués. Enfin, M. H. Pellat en 1884 a donné une démonstration qui ne s'appuie que sur des expériences susceptibles d'une grande précision et n'exige, pour être comprise, que les notions les plus élémentaires du calcul des dérivées. Nous renvoyons le lecteur à la note de M. Pellat ⁽³⁾, nous contentant de reproduire la formule finale résultant des démonstrations adoptées par les différents auteurs.

$$d^2F = \frac{ii' dl dl'}{d^2} \left(\sin \theta \sin \theta' \cos \omega - \frac{1}{2} \cos \theta \cos \theta' \right).$$

En appelant φ l'angle des deux éléments dans l'espace, la formule devient

$$d^2F = \frac{ii' dl dl'}{d^2} \left(\cos \varphi - \frac{3}{2} \cos \theta \cos \theta' \right).$$

Cas particuliers. — Lorsque les courants élémentaires sont parallèles et perpendiculaires à la droite qui les joint, la force élémentaire a pour expression

$$d^2F = \frac{ii' dl dl'}{d^2}.$$

Lorsque les éléments de courants sont dans le prolongement l'un et l'autre, d étant la distance de leurs milieux,

$$d^2F = \frac{1}{2} \cdot \frac{ii' dl dl'}{d^2}.$$

(1) Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience, publié dans les *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. VI, p. 175 à 388, daté de 1823, mais paru en 1827. Réimprimé dans la *Collection de mémoires relatifs à la physique*, publiés par la *Société française de physique*, t. III, p. 1-193, 1887.

(2) *Journal de physique*, 1^{re} série, t. III, p. 297 et 335, 1874.

(3) *Journal de physique*, 2^e série, t. III, p. 117-127, 1884.

- La force est *attractive* pour des courants de même sens, *répulsive* pour des courants de sens contraires.

360. Unité électrodynamique d'intensité de courant.

— Considérons deux courants rectilignes parallèles de même sens, et intégrons l'action exercée par un conducteur de longueur l sur un conducteur indéfini placé à une distance d

$$f = \frac{ii'l}{d}.$$

En faisant $f = 1$; $d = 1$; $l = 1$ et $i = i'$, on a $i = 1$, c'est la définition de l'*unité électrodynamique d'intensité* donnée par Weber.

Un courant a une intensité égale à 1 unité électrodynamique lorsque, traversant un fil rectiligne placé parallèlement à un second fil et à une distance égale à sa propre longueur et traversé par un courant de même intensité, il l'attire avec une force égale à 1 unité (1 dyne).

Un système basé sur cette définition pourrait constituer le *Système électrodynamique*. Il a été proposé, mais n'est pas employé en pratique. Il est peu probable, *a priori*, que l'unité d'intensité de courant ainsi définie dans le système C.G.S. par les actions électrodynamiques ait la même grandeur que l'unité C.G.S. d'intensité telle que nous l'avons définie (153) par les actions électromagnétiques.

Nous devons donc tout d'abord chercher à déterminer le rapport de ces deux unités et, si ce rapport est différent de 1, transformer la formule d'Ampère en lui appliquant un coefficient numérique qui rende la formule exacte lorsqu'on y introduit les intensités exprimées en unités électromagnétiques C.G.S. Nous arriverons à cette transformation en considérant un cas particulier pour lequel le calcul est facilement applicable, celui de l'action mutuelle de deux circuits plans placés à une très grande distance l'un de l'autre.

361. Action mutuelle de deux circuits fermés plans placés à une grande distance par rapport à leurs dimensions. — Les deux circuits, supposés carrés (fig. 168) pour simplifier le problème, ont respectivement

pour côtés a et b et sont traversés par des courants d'intensité i et i' (en unités électrodynamiques).

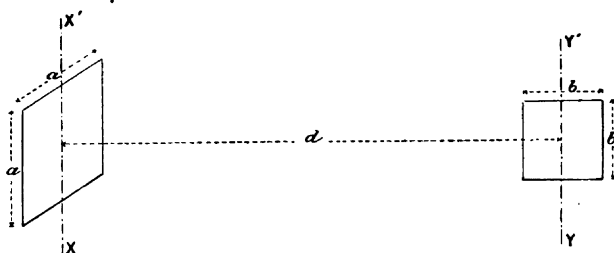


Fig. 168. — Action de deux circuits placés à une grande distance.

Le plan du circuit b est perpendiculaire au plan du circuit a et passe par son centre.

1^{er} cas. — Le circuit a est fixe, et le circuit b mobile autour de l'axe YY' .

En appliquant la formule élémentaire d'Ampère (360), on trouve que l'action du circuit a de surface S sur le circuit b de surface S' se réduit à un couple dont le moment W a pour valeur

$$W = \frac{SS'i'}{d^3}.$$

Unité électrodynamique d'intensité. — En faisant $S=S'=1$ et $i=i'$, on a pour valeur numérique du couple

$$W = \frac{1}{d^3} \quad \text{et} \quad i=1.$$

Un courant a une intensité égale à 1 unité électrodynamique d'intensité lorsque, traversant deux circuits de surface égale à 1, disposés comme ci-dessus, il exerce sur le circuit mobile un couple dont le moment est *numériquement* égal à l'unité divisée par le cube de la distance des centres des deux circuits.

2^o cas. — Si le circuit a est mobile autour de l'axe XX' et le circuit b fixe, le couple a pour expression

$$W = \frac{SS'i'}{2d^3}.$$

Si la disposition des deux circuits est appliquée à un appareil de mesure, on a intérêt à rendre le circuit *b* mobile au lieu du circuit *a*, puisque, toutes choses égales d'ailleurs, le couple est deux fois plus grand et l'appareil deux fois plus sensible.

362. Rapport de l'unité électrodynamique à l'unité électromagnétique d'intensité de courant. — Nous venons d'établir que le couple exercé par un circuit de surface *S* sur un circuit de surface *S'* placé à la distance *d* a pour valeur, en appelant *i* et *i'* les intensités qui traversent respectivement les circuits *S* et *S'*,

$$W_1 = \frac{SS'ii'}{d^3}. \quad (1)$$

Nous savons, d'autre part (196), qu'un courant de surface *S* exerce sur un aimant de moment \mathfrak{M} placé à une distance *d* un couple dont la valeur est, en appelant *I* l'intensité du courant qui le traverse, intensité exprimée en unités électromagnétiques C.G.S.,

$$W_2 = \frac{2SI}{d^3} \mathfrak{M}.$$

D'après le principe des aimants et des courants équivalents, cet aimant de moment \mathfrak{M} peut être remplacé par un courant satisfaisant à la relation

$$\mathfrak{M} = S'I'.$$

Le couple exercé par les deux courants *S* et *S'* s'écrit alors

$$W_2 = \frac{2SS'II'}{d^3}. \quad (2)$$

En égalant les couples, les surfaces et les intensités des courants qui traversent les circuits, nous aurons

$$i^2 = 2I^2; \quad i = I\sqrt{2}.$$

Cette relation montre que pour avoir la valeur du couple il faut multiplier le résultat par 2 si les intensités sont exprimées en unités électromagnétiques C.G.S.

L'unité électromagnétique est égale à l'unité électrodynamique multipliée par $\sqrt{2}$.

La formule d'Ampère donnerait donc des valeurs 2 fois trop petites si les intensités étaient exprimées en unités électromagnétiques C.G.S au lieu de l'être en unités électrodynamiques. Il faut donc multiplier la formule d'Ampère par le facteur 2 pour que les intensités exprimées en unités électromagnétiques C.G.S. donnent la valeur des forces en dynes. On se trouve ainsi conduit à transformer la formule d'Ampère.

363. Transformation de la formule d'Ampère. — La formule élémentaire d'Ampère devient alors, lorsqu'on substitue aux intensités exprimées en unités électrodynamiques les intensités exprimées en unités électromagnétiques C.G.S.,

$$dF = \frac{II' dl dl'}{d^2} (2 \cos \varphi - 3 \cos \theta \cos \theta')$$

ou, en appelant ω l'angle des deux conducteurs :

$$dF = \frac{2II' dl dl'}{d^2} \left(\sin \theta \sin \theta' \cos \omega - \frac{1}{2} \cos \theta \cos \theta' \right)$$

les longueurs étant exprimées en centimètres, les forces le sont en dynes.

Cas particuliers. — Pour deux courants parallèles élémentaires (359) la formule devient

$$dF = \frac{2II' dl dl'}{d^2}.$$

Pour deux courants dans le prolongement l'un de l'autre,

$$dF = \frac{II' dl dl'}{d^2}.$$

364. Actions électrodynamiques de courants de formes géométriques simples. — *Courant indéfini et courant fini parallèles.* La force exercée par un courant indéfini sur un courant parallèle de longueur finie l , placé à une distance d , est égale à

$$F = \frac{2l}{d} II'.$$

(F en dynes, l et d en centimètres, I et I' en unités électromagnétiques C.G.S.)

Deux circuits circulaires plans parallèles. — Deux cercles de rayon r placés à une distance d traversés par des courants I et I', et perpendiculaires à la droite qui joint leurs centres, exercent entre eux une force attractive ou répulsive

$$F = 4\pi \frac{r}{d} II'.$$

Si les deux cercles renferment respectivement N et N' spires,

$$F = 4\pi \frac{r}{d} NN'II'.$$

Deux circuits de forme quelconque. — D'une manière générale, lorsque deux circuits de forme quelconque dont l'un est fixe et l'autre mobile sont maintenus en position par une action égale et opposée à l'action électrodynamique, cette action se traduit par une force ou un couple proportionnel au produit des intensités qui traversent les circuits, et à une constante K qui ne dépend que des formes des circuits et de leurs positions relatives.

Les *électrodynamomètres* et les *puissance-mètres* ou *wattmètres* sont fondés sur ce principe.

365. Conducteurs astatiques et adynamiques. —

Un conducteur est *astatique* lorsqu'un champ magnétique uniforme n'exerce sur lui aucune action directrice.

On obtient ce résultat en réalisant deux circuits fermés d'égale surface. La figure 169 montre quelques formes de conducteurs astatiques. Chacun de ces circuits produit deux flux de force égaux et de signe contraire pour lesquels la résultante de l'action du champ uniforme dans lesquels on les place est nulle.

Un conducteur est *adynamique* lorsqu'il n'exerce aucune action sur des aimants ou des courants et n'est pas influencé par eux. Un fil roulé en double dans lequel le courant va dans un sens et revient dans l'autre en suivant sensiblement le même chemin constitue un conducteur adynamique.

Les bobines de résistance roulées en double, les conducteurs

doubles parallèles ou en torsade réalisent des conducteurs adynamiques. Un conducteur adynamique est toujours astatique, mais un conducteur astatique n'est pas nécessairement adynamique. Dans toutes les mesures de précision, il importe de faire usage de conducteurs adynamiques pour relier entre eux

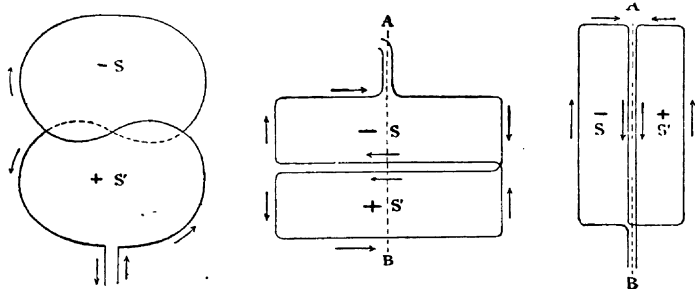


Fig. 169. — Exemples de conducteurs astatiques.

les différents appareils, afin d'éviter les influences électrodynamiques qui ne sont pas toujours négligeables lorsque le courant ne suit pas sensiblement le même chemin à l'aller et au retour.

366. Rotations électromagnétiques et électrodynamiques. — Un courant traversant un conducteur flexible exerce sur lui-même des forces qui tendent à le déformer; un conducteur mobile placé dans un champ magnétique subit des déplacements et peut même prendre un mouvement de rotation continu. Dans tous ces phénomènes, il y a de l'énergie mise en jeu, sous forme de travail mécanique effectué et d'énergie électrique dépensée.

L'étude complète de ces phénomènes sera donc mieux à sa place lorsque nous aurons parlé de l'*induction*, qui tient précisément compte de cette intervention d'énergie.

APPLICATIONS DES ACTIONS ÉLECTRODYNAMIQUES.

Les actions électrodynamiques sont principalement et presque exclusivement appliquées jusqu'ici à la mesure des courants et de la puissance électriques.

Nous décrirons les principaux appareils actuellement employés dans ce but.

367. Electro-dynamomètre. — Tout appareil permettant de mesurer l'intensité d'un courant par ses actions électrodynamiques est un *électrodynamomètre*.

Le plus ancien est dû à *W. Weber* (1846) ⁽¹⁾. Il se compose de deux bobines cylindriques dont les axes sont perpendiculaires. L'une est fixe, l'autre, mobile, est suspendue à un bifilaire qui sert en même temps à lui amener le courant.

Le couple produit par la suspension bifilaire est proportionnel au sinus de l'angle de torsion, le couple électrodynamique est proportionnel au produit des deux courants qui traversent les deux bobines, au cosinus de l'angle des bobines, et à une constante de construction.

On a alors, à une constante près :

$$k \sin \alpha = II' \cos \alpha$$

$$II' = k \tan \alpha.$$

Si les deux courants sont égaux, la formule devient

$$I^2 = k \tan \alpha.$$

Les tangentes des angles de déviation sont proportionnelles aux *carrés* des intensités.

L'électrodynamomètre ne mesure réellement une intensité que dans le cas d'un courant *continu et constant*.

Il importe de remarquer que le couple étant fonction du *carré* de l'intensité ne change pas de sens avec le courant. L'appareil est donc applicable à la mesure des courants *périodiques* (267), redressés ou alternatifs. Il mesure alors, comme nous l'établirons à propos de l'étude des courants alternatifs, la *racine carrée de la moyenne des carrés de l'intensité du courant*, valeur représentée par le symbole $\sqrt{(I^2)_{\text{moy.}}}$.

Suivant le mode d'emploi, les électrodynamomètres forment deux groupes distincts :

Les *électrodynamomètres de torsion* dans lesquels les actions électrodynamiques produisent un couple équilibré par la torsion d'un bifilaire, d'un unifilaire ou d'un ressort.

(1) *Electrodynamische Maasbestimmungen*, Leipzig, *Weidemann'sche Buchhandlung* (1846). Mémoire traduit *in extenso* dans la *Collection de mémoires relatifs à la physique* publiés par la *Société française de physique*, t. III, p. 289-402 (1887).

Les *électrodynamomètres-balances* dans lesquels l'action exercée, force ou couple, est compensée à l'aide de poids. Les appareils du premier groupe ont besoin d'un étalonnage préalable, tandis que ceux du second groupe se prêtent facilement aux mesures absolues.

368. Électrodynamomètre de MM. Siemens et Halske (1879). — Cet appareil, plus spécialement destiné aux

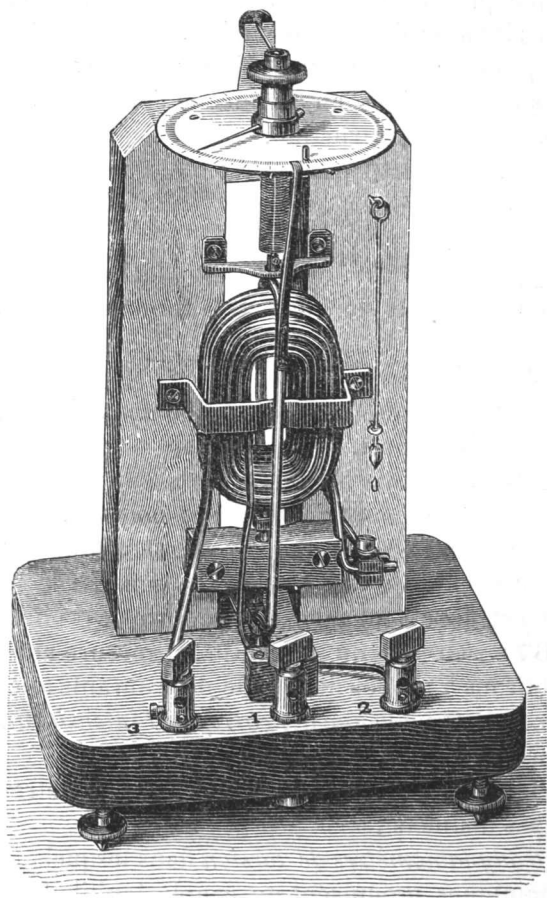


Fig. 170. — Électrodynamomètre de MM. Siemens et Halske.

mesures dans les laboratoires industriels, les ateliers et les salles de machines, se compose de deux circuits en fils de cuivre,

l'un fixe et l'autre mobile, de section suffisante pour ne pas trop chauffer par le passage du courant (fig. 170).

Les mesures se prennent par la méthode de torsion ; à cet effet, la bobine ou plutôt le cadre auquel elle est réduite est suspendu à un fil de cocon, entouré par un puissant ressort en spirale, dont l'extrémité supérieure est fixée à un pivot vertical mobile, et l'extrémité inférieure au cadre extérieur ; les deux extrémités de cette bobine rudimentaire intérieure plongent dans des coupes à mercure reliées à des bornes qui reçoivent elles-mêmes les conducteurs extérieurs.

La bobine intérieure est formée d'un certain nombre d'enroulements circulaires, tandis que la bobine extérieure est constituée par un cadre rectangulaire. Grâce à cette disposition, l'action exercée par la bobine intérieure est supérieure à toute autre influence éloignée, et l'action du magnétisme terrestre peut être négligée.

La bobine intérieure est généralement double, c'est-à-dire formée de deux fils de diamètres différents superposés : l'un gros et court, l'autre fin et long. Ces deux fils de la bobine fixe viennent aboutir respectivement aux bornes 2 et 3 situées sur le socle en bois de l'appareil.

A la partie antérieure de la bobine mobile est fixé un index léger dont la pointe vient contourner le bord d'un cadran divisé horizontal, fixé sur le bâti en bois ; c'est au zéro de cette division que doit toujours se tenir l'index. Le milieu du cadran porte une pièce de cuivre ou tête de torsion à laquelle sont fixés l'extrémité supérieure du ressort à spirale ainsi qu'un second index, mobile à la main et destiné à indiquer l'angle de torsion du ressort en spirale. Pour se servir de l'instrument, on commence par le mettre exactement de niveau au moyen de vis calantes disposées au-dessous du socle de l'appareil, de manière à ce que les deux extrémités de la bobine mobile plongeant dans le mercure jouent bien librement. Un petit fil à plomb fixé le long du bâti vertical facilite ce réglage.

Quand aucun courant ne traverse l'instrument, les deux index doivent se tenir au zéro, leurs deux pointes en regard. Dès que le courant passe, l'index fixé à la bobine intérieure est dévié ; on tourne alors le bouton molleté de la tête de torsion jusqu'à

ce que l'index de la bobine revienne au zéro. La position de l'index de torsion donne ainsi l'angle dont a été tordu le ressort en spirale; cet angle est proportionnel à la moyenne des carrés de l'intensité du courant.

La constante de chaque instrument, qui varie suivant ses éléments de construction, est indiquée sur l'appareil.

L'index mobile à la main est fou sur la tête de torsion qui sert à le manœuvrer; une petite vis de pression permet de le rendre solidaire de cette pièce pour les observations, ou de le ramener au zéro pour la position de repos, c'est-à-dire de le régler si, par une cause quelconque, il se trouve dérangé.

Une autre vis molletée, située à l'arrière du socle en bois, sert à immobiliser le cadre rectangulaire et à soulager ainsi le fil de cocon et le ressort en spirale dans le transport de l'appareil.

L'échelle des indications fournies par un même instrument est assez étendue; il est bon néanmoins d'éviter l'emploi des trop faibles déviations pour lesquelles la moindre erreur de lecture peut entraîner des inexactitudes relativement considérables dans les observations. L'appareil se construit en plusieurs types différents correspondant à des limites variables d'intensités à mesurer.

L'électrodynamomètre peut être approprié à la mesure des courants les plus faibles; mais la construction doit en être modifiée de manière à assurer les contacts tout en diminuant autant que possible le moment d'inertie de la bobine mobile, qui est alors de forme sphérique avec noyau de fer suspendu à un fil de platine extrêmement délié et maintenue en dessous par un ressort en spirale de fil de cuivre très fin; ses oscillations sont amorties au moyen de deux ailettes plongeant dans l'eau, dont le niveau est maintenu constant à l'aide d'un vase de Mariotte. Cet instrument permet de mesurer aisément l'intensité des courants téléphoniques.

369. Électrodynamomètres-balances. — Des appareils de ce groupe ont été construits à différentes époques par *Lallemand* (1851), *Joule* (1864), *Cazin* (1864), *Maxwell* (1868), *Helmholtz* (1881), *Mascart* (1882), etc. Nous décrirons de préférence les types plus modernes appropriés aux mesures directes en unités électromagnétiques C.G.S.

370. Électrodynamomètre absolu de M. Pellat.

— Cet appareil, destiné à l'étalonnage précis d'appareils pratiques, se compose (fig. 171) de deux bobines concentriques à axes rectangulaires : l'une, longue et grosse, a son axe horizontal; l'autre, placée à l'intérieur de la première, a son

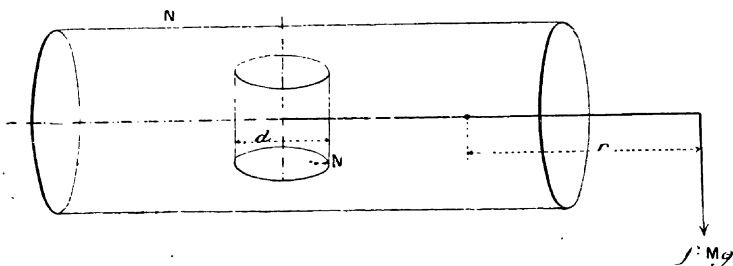


Fig. 171. — Principe de l'électrodynamomètre absolu de M. Pellat.

axe vertical. Le même courant passe dans les deux bobines; la petite, se trouvant placée dans le champ sensiblement uniforme produit par la plus grande, est soumise à un couple qui tend à dévier son axe de la verticale : c'est la mesure de ce couple qui fait connaître l'intensité du courant. Pour cela, la petite bobine est montée sur un fléau de balance qui porte à son extrémité un plateau suspendu à la façon ordinaire. On équilibre le couple électrodynamique par des poids marqués.

Théorie de l'électrodynamomètre de M. Pellat. — Soient

I l'intensité du courant traversant les deux bobines.

N, N' les nombres respectifs de spires des bobines mobile et fixe.

d le diamètre de la bobine mobile.

l' la longueur de la bobine fixe.

Le champ produit au centre de la longue bobine fixe a pour valeur

$$H = \frac{4\pi N'I}{l'}$$

La bobine mobile est équivalente à un aimant (196) de moment magnétique \mathfrak{M} tel que

$$\mathfrak{M} = SI = \frac{\pi d^2}{4} NI.$$

Le couple W exercé par le champ H sur cet aimant est

$$W = \mathfrak{N}H = \frac{4\pi N'I}{l} \cdot \frac{\pi d^2}{4} NI = \frac{\pi^2 d^2 NN'I^2}{l}$$

Ce couple peut être équilibré par un couple fictif $f'r'$, équilibré à son tour par le couple dû à la masse M suspendue à une distance r .

$$\frac{\pi^2 d^2 NN'I^2}{l} = f'r' = Mgr$$

d'où

$$I = \sqrt{M} \sqrt{\frac{grl}{\pi^2 d^2 NN'}}$$

formule qui permet de déterminer I en unités électromagnétiques C.G.S. connaissant N, N' , les longueurs r, l, d en cm, g en unités C.G.S. et M en grammes-masse.

371. Ampère-étalon de M. Pellat (1888). — En raison de ses dimensions et du soin excessif apporté à sa construction,

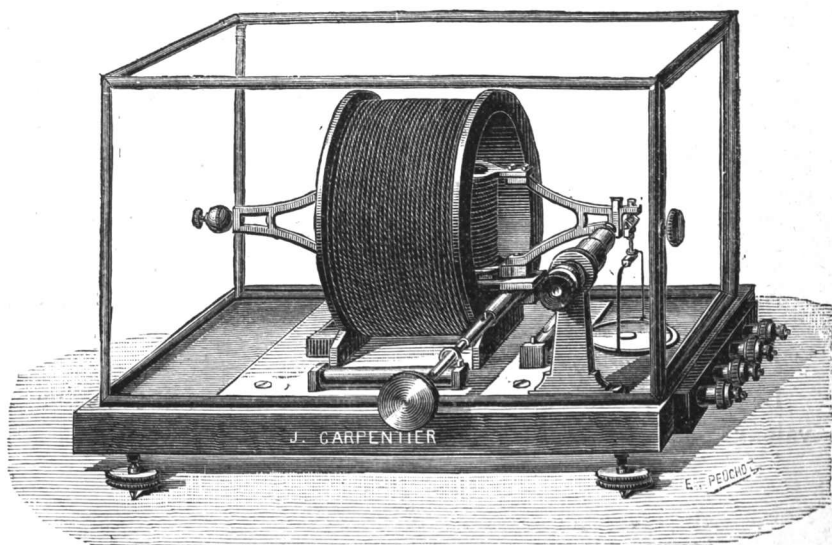


Fig. 172. — Ampère-étalon de M. Pellat.

l'électrodynamomètre absolu est un appareil coûteux avantageusement remplacé, en pratique, par l'*ampère-étalon* (fig. 172) de plus petites dimensions et qui, une fois gradué par compa-

raison avec l'appareil absolu, peut rendre exactement les mêmes services que lui.

En appelant I l'intensité du courant, M la masse en grammes qui produit l'équilibre, g l'accélération due à la pesanteur et A une constante de construction, on a :

$$I = A \sqrt{Mg},$$

ou, en posant $B = A \sqrt{g}$,

$$I = B \sqrt{M}.$$

On obtient donc I par la simple détermination de la masse M mise dans le plateau pour équilibrer le couple électrodynamique. Dans l'appareil représenté fig. 172, un courant de 0,3 ampère est équilibré par un poids de 1,5 g environ. Si on renverse le sens du courant dans la grande bobine pour éliminer l'action du magnétisme terrestre, la différence des deux pesées sera de 3 grammes environ.

Une erreur de 0,5 mg n'entraînerait qu'une erreur de $\frac{1}{12\,000}$ sur l'évaluation de I , et la balance est sensible à 0,1 mg.

L'erreur sur l'intensité absolue des courants mesurés sera la même que celle de l'électrodynamomètre absolu, $\frac{1}{2\,000}$ au plus, erreur moindre que celle commise sur les résistances, l'ohm n'étant connu qu'à $\frac{1}{800}$ près.

372. Balances électrodynamiques de sir W. Thomson (1887). — La principale difficulté que l'on rencontre dans la construction des électrodynamomètres pour la mesure des courants de grande intensité réside dans le procédé employé pour amener le courant au conducteur mobile, excepté dans le cas où l'on a affaire à des courants de très faible intensité.

L'emploi du mercure proposé par Ampère est sujet à de graves objections, car le mercure rend l'appareil peu transportable; d'autre part, l'oxydation et les impuretés lui enlèvent sa flexibilité. Sir W. Thomson a levé cette difficulté en imaginant un joint métallique (fig. 173) appliqué à tous ses appareils électrodynamiques. La partie mobile est en communication avec la partie fixe par deux séries de fils excessivement fins formant

une suspension très flexible, tout en supportant facilement le courant intense pour lequel elle est établie, la finesse des fils de suspension permettant des densités de courant très élevées.

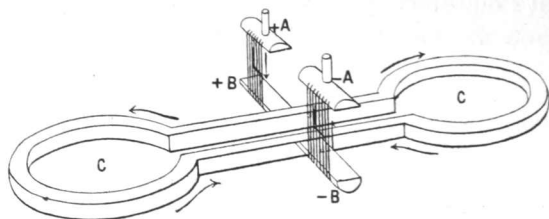


Fig. 173. — Joint métallique à fils fins.

La balance représentée figure 174 comprend quatre bobines fixes et deux bobines mobiles couplées entre elles comme l'in-

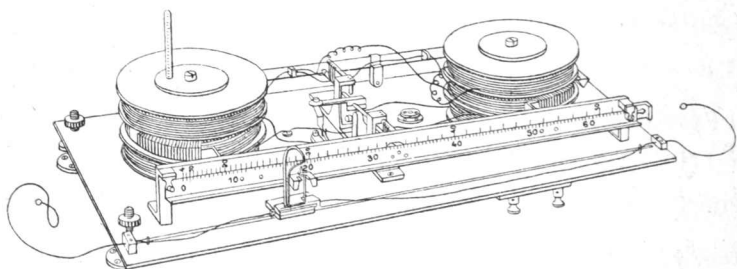


Fig. 174. — Vue d'ensemble de la balance électrodynamique de sir W. Thomson.

dique la figure 175. Le courant traverse les deux anneaux mobiles en sens inverse, pour annuler l'action du champ terrestre.

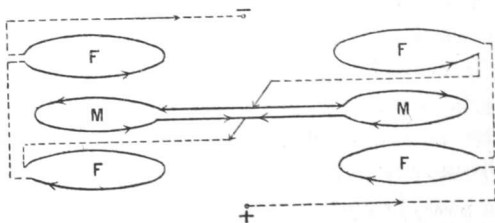


Fig. 175. — Couplage des bobines de la balance électrodynamique.

La position d'équilibre du système mobile est dans un plan horizontal très voisin du plan médian des bobines fixes, et les pro-

portions telles que la force exercée sur chaque anneau mobile reste constante pour un déplacement de 1 centimètre de part et d'autre de la position moyenne. Cette position d'équilibre est choisie pour que les bobines répulsives exercent une action prédominante, condition favorable à la stabilité de l'équilibre. Pour la mesure des courants alternatifs, les bobines sont formées par des câbles dont chaque fil est isolé à la soie, dans le but d'égaliser la distribution dans la section du conducteur. Un poids mobile sur une règle graduée équilibre l'action électrodynamique. Ce poids se

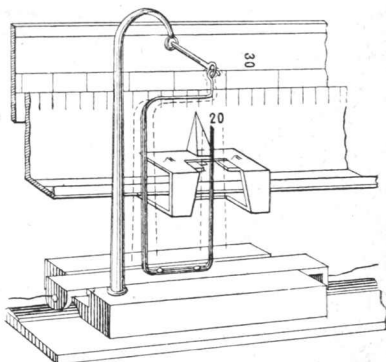


Fig. 176. — Système de déplacement du curseur.

manœuvre, sans y toucher avec les doigts et sans enlever la cage qui recouvre l'appareil et le protège de la poussière, à l'aide d'un dispositif ingénieux qui se comprend à la seule inspection de la figure 176. Un jeu de poids convenablement combiné permet d'étendre l'échelle des indications de chaque appareil entre 1 et 100 fois le plus petit courant que l'appareil peut mesurer avec précision.

Cinq types suffisent pour des courants compris entre 0,01 et 2 500 ampères. Le modèle centi-ampère, muni d'un thermomètre pour connaître la température des bobines et de résistances supplémentaires en platinoïde, permet de mesurer des différences de potentiel depuis 10 volts jusqu'à 200 volts et plus.

Voltmètre à lecture directe. — Cet appareil, basé sur les mêmes principes que les balances, indique les différences de potentiel entre certaines limites sans aucune manipulation ni pesée par une lecture directe : il ne porte que deux bobines à fil fin (fig. 177), l'une fixe, l'autre mobile, montée sur un cadre ou châssis horizontal disposé pour amplifier les moindres mouvements de la bobine et les indiquer sur un cadran convenable-

ment gradué. Si par exemple l'appareil est établi pour 100 volts, la répulsion exercée entre les deux bobines indiquera nettement les différences de potentiel entre 90 et 110 volts.

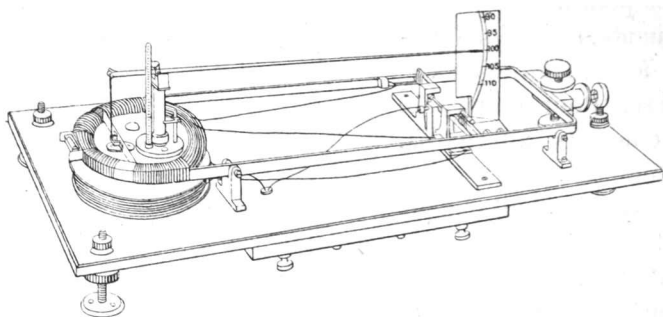


Fig. 177. — Voltmètre à lecture directe.

Suivant la température, on place dans le petit auget représenté à gauche de la figure, et monté sur la bobine mobile, des poids calculés pour effectuer la correction de température.

373. Mesure des courants périodiques. — Lorsqu'un électro-dynamomètre est intercalé dans le circuit d'un courant périodique (267) redressé ou alternatif, dont le temps périodique est court relativement à la durée d'oscillation propre de l'appareil, il prend une position d'équilibre qui varie avec l'intensité du courant. Le couple exercé sur le circuit mobile par le circuit fixe étant proportionnel à chaque instant à I^2 , on voit que l'électrodynamomètre, préalablement étalonné sur un circuit continu, donne, pour un circuit périodiquement variable, non plus l'intensité moyenne, mais bien la racine carrée de la moyenne des carrés de l'intensité, quantité que nous avons désignée ⁽¹⁾ par le symbole $\sqrt{(I^2)_{\text{moy}}}$. Le produit des indications d'un électrodynamomètre par celle d'un électromètre idiostatique (227) branché entre les deux extrémités d'une résistance qui n'est le siège d'aucune force électromotrice donne la vraie valeur de la puissance moyenne dépensée dans cette résistance, quelle que soit la forme du courant.

Lorsque l'appareil d'utilisation n'est plus une simple résis-

(1) Voyez la note de la page 377.

tance, mais est le siège de forces électromotrices d'induction, la puissance moyenne absorbée dans le circuit est une fonction plus complexe que nous étudierons à propos des courants alternatifs.

374. Applications diverses. — Nous avons passé en revue les principaux appareils de mesure fondés sur les actions électrodynamiques, qui constituent l'application de beaucoup la plus importante.

Ces actions ont été utilisées à la mesure de la puissance électrique. Nous y reviendrons dans un chapitre spécial complémentaire consacré aux mesures, dans lequel nous parlerons aussi des applications de l'électrodynamomètre à la mesure des champs magnétiques.

Les solénoïdes et feuillets galvaniques seront étudiés dans le chapitre suivant.

NOTE. — Les vingt-trois premières feuilles de ce volume étaient tirées lorsque le *Congrès international des Electriciens* de 1889 a terminé ses travaux. Dans sa séance générale de clôture tenue le 31 août 1889 il a, comme nous le faisons prévoir page 118, sanctionné le watt et le joule.

Il a aussi, sur notre initiative, donné un nom aux quantités complexes que nous avons désignées jusqu'ici par les symboles

$$\sqrt{(I^2)_{\text{moy}}} \text{ et } \sqrt{(E^2)_{\text{moy}}}$$

et qui prennent le nom d'*intensité efficace* et de *force électromotrice efficace*. Nous adopterons ces nouveaux noms dans tous les chapitres suivants, et particulièrement dans le chapitre consacré aux courants alternatifs.

CHAPITRE XII

COMPLÉMENTS DE MAGNÉTISME AIMANTATION DUE AUX COURANTS

375. Définitions. — Nous n'avons donné jusqu'ici que les notions générales de magnétisme et d'électromagnétisme nécessaires et suffisantes pour l'établissement du système des grandeurs et unités électromagnétiques C.G.S. Nous allons compléter les notions générales qui font l'objet des chapitres I et III en établissant les relations les plus importantes entre les champs magnétiques et galvaniques, les aimants et les courants d'après les idées les plus modernes et les résultats expérimentaux de ces dernières années.

Nous ne reviendrons pas sur les définitions déjà données dans le chapitre I, et auxquelles nous prions le lecteur de se reporter.

MAGNÉTISME.

En assimilant les pôles magnétiques à de petites sphères chargées électrostatiquement, les champs magnétiques aux champs électriques et le potentiel magnétique en un point au potentiel électrique en un point, on arrive facilement à établir une série de relations entre les différentes grandeurs magnétiques, relations semblables à celles obtenues en électrostatique, et qu'il nous suffit d'énoncer pour en faire comprendre le sens et l'utilité.

376. Potentiel magnétique (\mathfrak{P}). — Le potentiel magnétique \mathfrak{P} produit par un pôle d'intensité m en un point donné

est le rapport de l'intensité du pôle m à la distance r de ce point au pôle ⁽¹⁾

$$\mathfrak{P} = \frac{m}{r}.$$

En appelant W l'énergie dépensée pour amener un pôle (nord) d'intensité m' depuis l'infini jusqu'au point considéré, le potentiel magnétique en ce point est aussi le rapport du travail dépensé pour amener le pôle m' au point considéré à l'intensité de ce pôle.

$$\mathfrak{P} = \frac{W}{m'}.$$

Lorsqu'on a plusieurs pôles magnétiques m, m', m'' , à des distances r, r', r'' du point considéré, le potentiel magnétique en ce point est alors :

$$\mathfrak{P} = \sum \frac{m}{r}.$$

Les dimensions du potentiel magnétique \mathfrak{P} dans le système électromagnétique sont $L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$.

La différence de potentiel entre deux points est le rapport du travail qu'il faut dépenser pour amener un pôle m' d'un point à l'autre à l'intensité de ce pôle m' .

Si le champ magnétique est uniforme, la force exercée sur le pôle m' est égale à $m'H$, et si la projection de la distance de deux points sur la direction des lignes de force est l , la différence de potentiel magnétique a alors pour expression

$$\mathfrak{P} = \frac{m'Hl}{m'} = Hl.$$

Le potentiel magnétique est donc le produit d'une intensité de champ par une longueur. Si le champ n'est pas uniforme, la différence de potentiel magnétique entre deux points est l'intégrale $\int H dl$ des différences de potentiel élémentaires.

Tous les points au même potentiel forment une *surface équipotentielle*. Dans un champ magnétique uniforme, les sur-

(1) Certains auteurs parlent du potentiel du pôle en un point. Cette expression nous paraît incorrecte et inexacte.

faces équipotentiellles sont des plans parallèles, équidistants et perpendiculaires à la direction des lignes de force.

377. Densité magnétique (σ_m). — En considérant un pôle d'intensité m d'un aimant uniforme de section s , la densité magnétique σ_m , par analogie avec la densité électrostatique (101), est le rapport de l'intensité du pôle m à la section de l'aimant s

$$\sigma_m = \frac{m}{s}.$$

Mais on a (61)

$$\mathfrak{J} = \frac{\mathfrak{M}}{V} = \frac{ml}{ls} = \frac{m}{s}$$

d'où

$$\mathfrak{J} = \sigma_m.$$

La densité superficielle d'un barreau uniformément aimanté est égale à son intensité d'aimantation.

378. Flux de force (Φ_m). — Si sur une surface équipotentielle on trace un contour fermé, l'ensemble des lignes de force passant par chacun des points de ce contour délimite un volume ou *tube de force*.

La somme $\int H ds$ des produits des intensités du champ magnétique en chaque point par la surface élémentaire qui l'entoure s'appelle le *flux de force magnétique* ou *flux de force* traversant la surface S et contenu dans le tube de force. Les tubes de force et les surfaces équipotentiellles sont orthogonaux.

Lorsque le champ magnétique est uniforme, les tubes de force sont des cylindres droits ayant pour directrice le contour fermé considéré, et comme génératrice une droite parallèle à la direction générale des lignes de force.

Pour un pôle d'intensité m , les tubes de force sont des cônes ayant le pôle pour sommet et les surfaces équipotentiellles des sphères concentriques dont le pôle est le centre commun. Le flux de force total est égal à $4\pi m$ (65).

Ces définitions vont nous être utiles pour l'étude des propriétés des aimants. Nous examinerons seulement les cas accessibles au calcul, c'est-à-dire ceux pour lesquels la distribution magnétique est uniforme et le barreau aimanté peut se

décomposer en *solénoïdes magnétiques* ou en *feuillet magnétiques*.

379. Solénoïde magnétique. — Un aimant de section infiniment petite et constante dont l'intensité d'aimantation \mathfrak{J} est constante et tangente à la direction du filet magnétique est un *solénoïde magnétique simple*; l'aimantation est dite *solénoïdale*.

Un *aimant solénoïdal* est celui qui peut être décomposé en solénoïdes simples.

Le produit de l'intensité d'aimantation \mathfrak{J} d'un solénoïde magnétique par sa section s'appelle la *puissance magnétique du solénoïde*.

$$S\mathfrak{J} = \frac{S.ml}{V} = m.$$

La puissance magnétique d'un solénoïde magnétique n'est donc pas autre chose que son intensité de pôle m . Le potentiel magnétique en un point dû à un solénoïde a pour expression, en appelant r et r' les distances de ses pôles au point considéré

$$\mathfrak{P} = m \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right).$$

Ce potentiel ne dépend que de la distance des pôles au point considéré et non pas de la forme du solénoïde. Si le solénoïde magnétique forme une courbe fermée, le potentiel magnétique extérieur est nul.

Ceci explique pourquoi un aimant fermé sur lui-même ne peut pas attirer un autre aimant ou un morceau de fer doux, puisqu'il ne produit pas de champ magnétique extérieur.

380. Feuillet magnétique. — Un aimant très court, en forme de lame infiniment mince et dont l'intensité d'aimantation est normale à la surface et inversement proportionnelle à l'épaisseur, constitue un *feuillet magnétique simple*.

Le produit de l'intensité d'aimantation du feuillet \mathfrak{J} par son épaisseur l s'appelle la *puissance magnétique du feuillet* (1).

(1) La puissance magnétique d'un feuillet et la puissance magnétique d'un solénoïde ne sont pas des quantités physiques de même nature, car la première est homogène à un pôle magnétique et la seconde à un potentiel magné-

$$\mathcal{F}_m = I\mathcal{J}.$$

Gauss a démontré que le potentiel magnétique dû à un feuillet magnétique en un point donné est le produit de sa puissance magnétique \mathcal{F}_m par l'angle solide ϖ ⁽¹⁾ sous lequel on voit le contour du feuillet.

$$\mathcal{P} = \mathcal{F}_m \varpi.$$

L'aimantation d'un feuillet magnétique est dite *lamellaire* par opposition à celle d'un solénoïde qui prend le nom de *solénoïdale* (379). Un *aimant lamellaire* est celui qui peut être décomposé en feuillets magnétiques simples.

Le potentiel en un point dû à un feuillet magnétique simple est indépendant de sa forme; il ne dépend que de sa puissance et de son contour.

La considération des solénoïdes et des feuillets magnétiques a pour but de simplifier le calcul dans tous les cas où un aimant donné peut être décomposé en solénoïdes ou en feuillets magnétiques simples. Nous signalerons, à titre d'exemple, le cas du calcul du flux d'induction magnétique dans un aimant solénoïdal.

Flux d'induction magnétique dans un aimant solénoïdal. — Si on décompose un aimant en solénoïdes élémentaires, l'induction magnétique dans chacun de ces solénoïdes a pour valeur (66)

$$\mathcal{B} = 4\pi\mathcal{J} + H$$

et le flux élémentaire d'induction qui traverse un solénoïde élémentaire de section dS est

tique. Il est regrettable, pour l'intelligence des phénomènes, qu'elles portent le même nom. Nous éviterons toute confusion d'homogénéité et de notation en les désignant respectivement par m et \mathcal{P} .

(1) *Angle solide.* — Lorsqu'une droite fixée en un point décrit un contour fermé, elle découpe dans l'espace un angle solide. Si l'on conçoit une sphère ayant le point considéré comme centre et un rayon r , le cône limitant l'angle solide découpera sur la sphère une certaine surface S . L'angle solide est défini et mesuré par le rapport

$$\varpi = \frac{S}{r^2}$$

de la surface découpée sur la sphère au carré du rayon de cette sphère. C'est donc un simple facteur numérique.

$$d\Phi = \mathcal{B} dS = (4\pi\mathcal{J} + \mathbf{H}) dS.$$

Si tous les solénoïdes sont fermés, \mathbf{H} devient nul et il reste

$$d\Phi = 4\pi\mathcal{J} dS.$$

Pour un aimant fermé de section uniforme S et de longueur l , le flux d'induction est

$$\Phi = 4\pi \int \mathcal{J} dS = 4\pi(\mathcal{J}l) \int \frac{dS}{l}$$

si l'on admet que, pour chaque filet solénoïdal, $(\mathcal{J}l)$ est une constante.

Anneau de révolution. —

Si x est le rayon d'un solénoïde élémentaire

$$\Phi = 4\pi\mathcal{J}l \int \frac{dS}{2\pi x} = 2(\mathcal{J}l) \int \frac{dS}{x}.$$

Tore. — Si a est le rayon de la section du tore (fig. 178)

et A le rayon de la circonférence décrite par le centre de la section, on a

$$\int \frac{dS}{x} = \pi(A - \sqrt{A^2 - a^2})$$

d'où

$$\Phi = 2\pi\mathcal{J}l(A - \sqrt{A^2 - a^2}) = \frac{\mathcal{B}l}{2}(A - \sqrt{A^2 - a^2}).$$

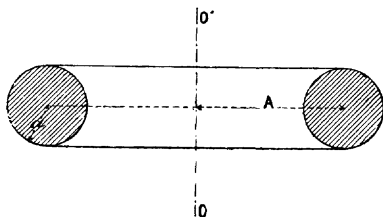


Fig. 178.

ÉNERGIE POTENTIELLE ET INTRINSÈQUE DES AIMANTS.

381. Énergie potentielle, intrinsèque et relative. —

Puisque les aimants et les champs magnétiques exercent entre eux des attractions et des répulsions et peuvent, par suite, produire des quantités de travail essentiellement positives, c'est qu'ils possèdent, soit par eux-mêmes, soit par le fait de leurs positions relatives, une certaine quantité d'énergie fournie par une cause extérieure pour les amener dans les positions ou l'état considérés, énergie *potentielle* qui tend toujours vers un minimum lorsque le déplacement se produit sous la seule influence des actions magnétiques.

L'énergie potentielle d'un aimant isolé est *intrinsèque*, c'est-à-dire propre à l'aimant lui-même, et résulte du fait de son aimantation. L'énergie potentielle d'un aimant placé dans un champ magnétique comprend en outre une autre énergie dite *relative*, qui ne dépend que de la position de l'aimant dans le champ. Elle représente le travail dépensé pour amener l'aimant dans la position considérée et, par suite, celui qui est restitué lorsque l'aimant est éloigné à l'infini. L'énergie relative est positive ou négative, suivant que le travail dépensé dans la première opération et restitué dans la seconde est positif ou négatif.

Nous traiterons quelques cas particuliers dans l'hypothèse d'une aimantation uniforme, lamellaire ou solénoïdale, les autres cas ne se prêtant pas facilement au calcul.

382. Énergie potentielle d'un aimant dans un champ magnétique. — Si l'on appelle m l'intensité d'un pôle placé en un point où le potentiel magnétique produit par un système invariable est \mathfrak{L} , l'énergie potentielle du pôle dans le champ ou énergie de position a pour expression générale

$$W = m\mathfrak{L}$$

et représente le travail qu'il faudrait dépenser pour amener le pôle considéré depuis l'infini jusqu'à la position qu'il occupe.

Dans un champ uniforme d'intensité H , un aimant de moment $\mathfrak{M} = ml$ a pour énergie potentielle totale

$$W = -H\mathfrak{M} \cos \alpha = -H\mathfrak{J}V \cos \alpha$$

en négligeant le supplément d'aimantation due au champ H , α étant l'angle de l'axe magnétique de l'aimant avec la direction du champ et V son volume.

Lorsque la direction d'aimantation du barreau est la même que celle du champ, la valeur de l'énergie potentielle totale du barreau dans le champ a pour valeur

$$W = -H\mathfrak{M} = -H\mathfrak{J}V$$

L'équilibre est stable et le flux de force maximum. Si la direction de l'aimant est opposée à celle du champ, l'énergie potentielle est maxima et égale à $H\mathfrak{J}V$; l'équilibre est instable.

L'énergie potentielle est nulle lorsque les deux directions sont rectangulaires.

383. Énergie relative d'un morceau de fer doux dans un champ magnétique. — Un barreau de fer doux étant attiré dans un champ magnétique et produisant du travail pendant ce déplacement, l'énergie relative est forcément négative.

Si l'aimantation initiale était nulle au début et que le moment de l'aimant produit par induction devienne \mathfrak{M} , le travail produit par le champ pendant l'opération n'a été que *la moitié* de ce qu'il aurait été si les actions magnétiques s'étaient exercées sur un aimant. L'énergie potentielle est dans ce cas

$$W = -\frac{1}{2} \mathfrak{C}\mathfrak{M} = -\mathfrak{C}\mathfrak{V}.$$

En éloignant le barreau à l'infini, et en supposant qu'il ne conserve aucune aimantation permanente, on devra produire une quantité de travail précisément égale à $\frac{1}{2} \mathfrak{C}\mathfrak{M}$ pour restituer au champ l'énergie qu'il a dépensée lui-même pour attirer le barreau. Si le barreau est en acier et conserve une certaine aimantation permanente, il faudra dépenser une plus grande quantité de travail. La différence entre ces deux travaux représente l'énergie intrinsèque d'aimantation.

384. Énergie intrinsèque d'un aimant solénoïdal. — Nous avons établi (382) que le travail dépensé pour enlever un aimant \mathfrak{M} d'un champ \mathfrak{C} et l'amener à l'infini a pour valeur (essentiellement positive)

$$W_1 = \mathfrak{C}\mathfrak{M}$$

tandis que si le barreau n'avait et ne conservait aucune aimantation, nous ne devrions dépenser que

$$W_2 = \frac{1}{2} \mathfrak{C}\mathfrak{M}.$$

La différence représente l'énergie potentielle intrinsèque d'aimantation, énergie dépensée pour communiquer l'aimantation au barreau d'acier.

On peut établir cette valeur de l'énergie intrinsèque en fonction des constantes d'aimantation de plusieurs manières. La plus simple consiste à supposer que les deux pôles m étant infiniment voisins ont été séparés et portés à la distance l . Le travail dépensé pour effectuer ce déplacement a évidemment pour valeur

$$W = \frac{1}{2} m \mathfrak{E} \quad (1)$$

\mathfrak{E} représentant la différence de potentiel magnétique des deux pôles, ou le produit $\mathcal{H}l$ du champ dû à l'aimant par la distance.

$$m = \frac{\Phi}{4\pi} = \frac{\mathcal{B}s}{4\pi}; \quad \mathfrak{E} = \mathcal{B}l; \quad \mathfrak{M} = ml.$$

En remplaçant dans (1), on a

$$W = \frac{\mathfrak{M}\mathcal{H}}{2}. \quad (2)$$

Lorsqu'un aimant attire une armature, l'induction \mathcal{B} augmente, mais le moment \mathfrak{M} diminue ainsi que l'énergie intrinsèque qui tend alors vers zéro.

L'énergie potentielle d'un aimant fermé sur lui-même est nulle, car on a alors $\mathfrak{M} = 0$ et, par suite, $W = 0$.

Si les pôles subissent un écart élémentaire dl assez petit pour que l'aimantation \mathcal{J} n'ait pas varié, le travail élémentaire dW effectué pendant le déplacement sera égal à la diminution d'énergie intrinsèque

$$dW = \frac{d(\mathfrak{M}\mathcal{H})}{2}$$

La force exercée sur l'armature pendant ce déplacement élémentaire a pour valeur

$$F = \frac{dW}{dl} = 2\pi S \mathcal{J}^2 = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi}$$

car l'aimant étant fermé sur lui-même, on a, à la limite :

$$\mathcal{B} = 4\pi \mathcal{J}.$$

Cette formule, démontrée par *Clerk-Maxwell* en partant

d'autres considérations, sera utilisée pour le calcul des électro-aimants (404).

Il faut donc dépenser de l'énergie pour aimanter un morceau d'acier primitivement non magnétique. Dans le cas où on l'aimante avec un autre aimant, l'énergie est dépensée par l'opérateur; si on emploie un courant, c'est le courant qui fournit cette énergie, comme nous le montrerons en traitant de la self-induction.

Considérons le premier cas. Lorsque nous amenons un morceau d'acier non aimanté A à cheval sur les pôles d'un aimant B, ce déplacement mécanique se fait aux dépens de l'énergie intrinsèque de l'aimant B, et nous n'avons à fournir aucun travail. Lorsque nous éloignons le morceau d'acier A devenu un aimant permanent en vertu de sa force coercitive, nous devons *dépenser* un travail *plus grand* que celui produit par l'aimant dans le déplacement précédent. Une partie du travail ainsi dépensé restitue à l'aimant B son énergie intrinsèque initiale, l'autre partie représente l'énergie intrinsèque du morceau d'acier A devenu un aimant.

Exemple numérique. — Un barreau droit de 20 cm de longueur et de 1 cm² de section dont l'intensité d'aimantation est de 500 unités C.G.S., a une énergie intrinsèque de

$$W = 2\pi J^2 V = 6,28.250\,000.20 = 31\,400\,000 \text{ ergs}$$

$$W = 3,14 \text{ joules.}$$

385. Énergie relative d'un feuillet dans un champ magnétique. — Si on appelle Φ le flux de force traversant le feuillet par sa face négative, et par \mathcal{F}_m la puissance magnétique du feuillet (380), l'énergie potentielle a pour expression

$$W = -\mathcal{F}_m \Phi.$$

Elle est minima et correspond à un état d'équilibre stable lorsque le feuillet et le champ magnétique produisent des flux de même sens. Elle est nulle lorsque le feuillet magnétique est parallèle à la direction des lignes de force; elle est maxima et correspond à un état d'équilibre instable lorsque le feuillet et le champ ont leurs lignes de force en sens inverses.

386. Énergie relative de deux feuillets magnétiques.

— En appelant \mathcal{F}_m et \mathcal{F}'_m la puissance magnétique des deux feuillets, l'énergie potentielle du premier par rapport au second est égale à l'énergie potentielle du second par rapport au premier et a pour valeur

$$W = - \mathcal{F}_m \mathcal{F}'_m L_m$$

le coefficient L_m étant le rapport du flux de force magnétique produit par le premier feuillet dans le second à la puissance magnétique du premier feuillet.

Le coefficient L_m a, dans le système électromagnétique, les dimensions d'une longueur et s'appelle le *coefficient de potentiel mutuel de deux circuits*, ou *coefficient de Neumann*.

Ce facteur L_m peut être exprimé en fonction du contour du feuillet. F.-L. Neumann a donné son expression intégrale qui est

$$\iint \frac{\cos \alpha}{r} dl dl'$$

en appelant dl et dl' les longueurs de deux éléments placés à une distance r et faisant entre eux un angle α . Nous nous contentons d'indiquer ici ce résultat, l'application de la formule, même lorsque les circuits ont des formes géométriques simples, conduisant à des calculs difficiles, laborieux et accessibles à l'analyse seulement dans un nombre de cas très restreint.

Mais si le calcul des valeurs des variations de l'énergie n'est pas toujours facile, il est aisé, dans chaque cas, de prévoir le sens de ces actions, et d'établir une loi générale, qualitative en quelque sorte, et qu'on peut formuler ainsi :

Les actions exercées entre un système d'aimants et de champs magnétiques en présence sont de sens tel qu'elles tendent à superposer les flux de force ou d'induction magnétique et à rendre l'énergie potentielle minima, condition d'équilibre STABLE du système soustrait à l'action des forces extérieures.

CHAMPS GALVANIQUES.

Comme nous l'avons vu (144), un champ galvanique ne diffère d'un champ magnétique que par son origine; il est produit par un *courant* au lieu de l'être par un *aimant*. Les solé-

noïdes et les feuillets galvaniques constituent des cas intéressants d'*aimants galvaniques*, car ils se prêtent facilement au calcul.

387. Solénoïde galvanique. — Lorsqu'un courant traverse un solénoïde de grande longueur roulé uniformément, l'intensité du champ uniforme H créé à l'intérieur du solénoïde de N tours et de longueur l par un courant de I unités C.G.S. d'intensité a pour valeur (**194**)

$$H = \frac{4\pi NI}{l}.$$

Le champ étant uniforme, la différence de potentiel magnétique \mathfrak{F} entre ses extrémités est égale à $4\pi NI$, et le flux de force à l'intérieur

$$\Phi = HS = \frac{4\pi NI}{l} \pi r^2.$$

En appelant m l'intensité du pôle

$$\Phi = 4\pi m; \quad m = \frac{\pi r^2 NI}{l}$$

et enfin, en appelant S la surface totale des N spires et \mathfrak{M} le moment magnétique du solénoïde

$$\mathfrak{M} = SI$$

formule déjà établie à propos des aimants et des courants équivalents (**196**).

Un solénoïde galvanique ou cylindre électromagnétique possède toutes les propriétés d'un aimant solénoïdal ou d'un barreau aimanté : il s'oriente dans un champ magnétique, attire et repousse des aimants ou d'autres solénoïdes, etc.

388. Feuille galvanique. — L'action exercée par un courant fermé peut être assimilée à celle d'un feuillet magnétique. Ampère a démontré le théorème suivant relatif au feuillet galvanique produit par un circuit fermé :

L'action magnétique d'un courant fermé est égale à celle d'un feuillet magnétique de même contour.

On a alors, pour un feuillet magnétique dont la puissance est \mathfrak{F}_m ayant le même contour qu'un circuit fermé traversé par

un courant d'intensité I (en unités électro-magnétiques C.G.S.)

$$\mathcal{F}_m = I.$$

Le potentiel en un point dû à un circuit fermé est alors

$$\mathcal{F} = -\omega I$$

ω étant l'angle solide du circuit par rapport au point considéré.

Les faces positive et négative du feuillet sont respectivement celles par lesquelles sortent et rentrent les lignes de force.

La valeur du travail nécessaire pour amener un pôle m en un point quelconque voisin du circuit a pour valeur

$$-\omega m I$$

à la condition que le pôle m n'ait pas traversé le circuit. Dans le cas où il l'a traversé, il faut ajouter à cette valeur autant de fois $4\pi m I$ que le pôle m a traversé le circuit en allant de la face positive à la face négative.

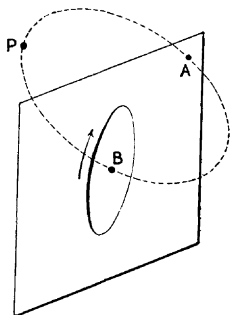


Fig. 179.

Considérons, en effet, un circuit plan, pour fixer les idées, et un pôle m (fig. 179) placé en P traversant le circuit pour revenir au même point. Le pôle m rencontre forcément le plan du circuit en deux points, l'un extérieur A , l'autre intérieur B . De P en A , l'angle solide varie de ω à 2π , le travail correspondant

effectué a pour valeur

$$(2\pi - \omega)mI.$$

De A en B , l'angle varie de $-\pi$ à 0 , le travail effectué augmente de $2\pi m I$.

De B en P , l'angle solide augmente de 0 à ω et le travail effectué augmente de $\omega m I$. Le travail total est donc égal à $4\pi m I$.

En décrivant un chemin fermé sous l'action des forces magnétiques dans le voisinage d'un circuit fermé, le travail produit est nul si le pôle ne traverse pas le circuit et égal à autant de fois $4\pi m I$ qu'il le traverse de fois. Ce travail a pour valeur, en désignant par n le nombre de fois que le circuit est traversé

$$W = mI(4\pi n - \sigma).$$

Si le pôle m est abandonné à lui-même, sous l'action du champ produit par le circuit fermé, il tendra à tourner indéfiniment autour du courant, en suivant la ligne de force passant par sa position initiale, en dépensant chaque fois une quantité d'énergie *empruntée au courant* ⁽¹⁾ et égale à $4\pi mI$ pour un tour complet.

Le sens du mouvement est tel que le flux de force tend à devenir maximum; il est donc impossible d'obtenir le mouvement continu d'un aimant avec un circuit rigide, la position d'équilibre stable correspondant à la position pour laquelle le flux est maximum.

Mais on peut obtenir un mouvement continu si le circuit est déformable, contient des parties liquides, des contacts glissants ou peut être brisé en certains points pendant le déplacement de l'aimant. Nous reviendrons sur la question à propos des rotations électrodynamiques (431).

L'énergie intrinsèque d'un courant ainsi que l'énergie relative de deux courants seront étudiées comme cas particuliers de l'induction.

389. Solénoïde annulaire. — Une série de circuits plans équidistants enroulés sur un tore forment un solénoïde annulaire dont l'action extérieure est nulle, comme celle d'un aimant annulaire (380). Ce tore peut être décomposé en filets solénoïdaux. Soient :

I l'intensité du courant traversant les spires,

N le nombre *total* des spires,

A le rayon du cercle décrit par le centre du cercle engendrant le tore,

a le rayon du cercle engendrant le tore,

S la surface du cercle de rayon a ; $S = \pi a^2$,

Φ le flux de force produit à l'intérieur du tore,

\mathcal{C}_{moy} l'intensité moyenne du champ,

\mathcal{B} l'induction moyenne,

μ la perméabilité.

(1) Le mode d'emprunt de cette énergie au courant sera étudié à propos de l'induction électromagnétique.

On a les relations suivantes :

$$\Phi = \mathcal{R}S = \mu \mathcal{F}S \quad \mathcal{F} = \frac{4\pi NI}{l}$$

d'où

$$\Phi = \frac{4\pi NI}{\frac{l}{\mu} \cdot S}$$

formule applicable à un solénoïde de forme quelconque, pourvu que le flux de force reste toujours à l'intérieur du circuit qui le produit, et qui nous conduit à assimiler les circuits magnétiques aux circuits galvaniques.

LE CIRCUIT MAGNÉTIQUE.

390. Force magnétomotrice (\mathcal{F}). Résistance magnétique (\mathcal{R}). Résistance magnétique spécifique ($\frac{l}{\mu}$).

— On a été conduit depuis quelques années à utiliser, pour le calcul, des analogies signalées pour la première fois par *Faraday* entre le circuit électrique et le circuit magnétique, et à appliquer à ce dernier la loi d'Ohm avec toutes ses conséquences. Bien que certaines objections théoriques puissent s'élever contre cette manière de traiter la question, les simplifications que cette conception introduit dans les calculs sont si nombreuses et les formules d'une application si directe, que nous croyons utile d'en donner ici une idée générale.

Dans la conception du circuit magnétique, le *flux de force* Φ correspond au flux ou intensité de courant I , la cause du flux de force s'appelle *force magnétomotrice* \mathcal{F} et a pour expression $4\pi NI$, en appelant N le nombre de spires roulées sur un solénoïde donné traversé par un courant d'intensité I (en unités C.G.S.), et la *résistance magnétique du circuit* \mathcal{R} est l'équivalent de la résistance électrique R . La formule d'Ohm appliquée au circuit magnétique prend alors la forme :

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}.$$

Si, d'autre part, le circuit magnétique a une longueur connue

et une section constante, en appelant ρ la résistance magnétique spécifique de la substance magnétique du circuit, facteur qui n'est autre chose que l'inverse de la perméabilité μ , on a par analogie avec la formule définissant la résistance électrique spécifique (168),

$$R = \rho \frac{l}{s} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{s}$$

ce qui donne pour l'expression complète du flux de force :

$$\Phi = \frac{4\pi NI}{\frac{1}{\mu} \frac{l}{s}} = \frac{4\pi NI \mu s}{l}$$

La perméabilité magnétique μ étant un simple coefficient, il résulte de cette analogie que la résistance magnétique a pour dimensions, dans le système électromagnétique, l'inverse d'une longueur (L^{-1}).

Comme pour les diélectriques, la résistance magnétique spécifique de l'air sert de terme de comparaison et est prise pour unité. Tous les corps *magnétiques* ont une résistance magnétique spécifique plus petite que celle de l'air et, par suite, une perméabilité magnétique plus grande que 1. Les corps *diamagnétiques* ont, au contraire, une résistance magnétique spécifique plus grande que celle de l'air supposée constante.

L'expérience démontre que la résistance magnétique spécifique des substances magnétiques est une fonction de leur nature, de la force magnétomotrice, de ses variations et de son *histoire magnétique*, c'est-à-dire des états magnétiques qui se sont succédé dans la substance considérée avant son état actuel. Le manque de fixité de la perméabilité magnétique rend l'analogie entre le circuit magnétique et le circuit électrique absolument inexacte au point de vue théorique, mais n'enlève rien à son intérêt pratique : les considérations relatives au circuit magnétique ont considérablement simplifié le calcul des machines dynamos, comme nous le verrons à propos des applications.

Lorsqu'on arme l'aimant par une armature, la différence de potentiel magnétique entre ses extrémités diminue comme diminue la différence de potentiel électrique aux bornes d'une

pile fermée sur un circuit moins résistant, le flux d'induction augmentant à mesure que la résistance magnétique diminue : elle devient même sensiblement nulle ainsi que son énergie potentielle lorsque l'armature est constituée par une grosse pièce de fer doux.

Un morceau de fer doux est attiré par un aimant parce que, se rapprochant de cet aimant, il diminue la résistance magnétique du chemin parcouru par les lignes de force en dehors de l'aimant, le fer étant plus perméable que l'air, etc.

Ces propriétés seront étudiées et complétées à propos de l'aimantation produite par les courants.

AIMANTATION DUE AUX COURANTS.

391. Définitions. — Nous n'avons considéré jusqu'ici que le champ galvanique produit par un courant dans l'air, sans tenir compte de l'influence de ce milieu que nous avons supposé toujours le même, et possédant des propriétés magnétiques constantes. Le champ galvanique produit par un courant se développe dans tous les milieux, avec une énergie plus ou moins grande, dépendant de la nature de ce milieu et des principales conditions physiques dans lesquelles il se trouve.

On distingue, à ce point de vue, les substances *magnétiques* dans lesquelles les actions magnétiques se manifestent avec plus d'intensité que dans l'air, et les substances *diamagnétiques* dans lesquelles les actions magnétiques sont moins intenses que dans l'air ; mais cette propriété est *relative*, et il n'y a pas, à proprement parler, de corps absolument magnétiques ni diamagnétiques, mais une suite ininterrompue de substances relativement plus magnétiques les unes que les autres. L'étude complète des propriétés magnétiques d'un corps dans toutes les circonstances physiques qui peuvent influencer ses propriétés se trouve facilitée lorsqu'on considère l'aimantation produite par les courants, car ces derniers permettent d'obtenir des champs uniformes intenses et variables à volonté, ce qui est presque irréalisable avec des aimants permanents.

L'aimantation produite par les courants a été découverte par *F. Arago* en 1820, peu de temps après la découverte

d'Ørsted. Les premières expériences furent communiquées à l'Académie des sciences, le 25 septembre. Voici un extrait de la note publiée à ce sujet par Arago, et intitulée : *Expériences relatives à l'aimantation du fer et de l'acier par l'action du courant voltaïque* (1).

« La brillante découverte que M. Ørsted vient de faire consiste, on l'a vu, dans l'action que le courant voltaïque exerce sur une aiguille d'acier *préalablement aimantée*. En répétant les expériences du physicien danois, j'ai reconnu que ce même courant *développe fortement la vertu magnétique* dans les lames de fer ou d'acier qui, d'abord, en étaient totalement privées.

« Je rapporterai les expériences qui établissent ce résultat, dans l'ordre, à fort peu près, où elles ont été faites.

« Ayant adapté un fil cylindrique de cuivre assez fin, à l'un des pôles de la pile voltaïque, je remarquai qu'à l'instant où ce fil était en communication avec le pôle opposé, il attirait la limaille de fer doux, comme l'eût fait un véritable aimant. Le fil, plongé dans la limaille, s'en chargeait tout autour, et acquérait, par cette addition, un diamètre presque égal à celui d'un tuyau de plume ordinaire. Aussitôt que le fil conjonctif cessait d'être en communication avec les deux pôles de la pile *à la fois*, la limaille se détachait du fil et tombait.

« Ces effets ne dépendaient pas d'une aimantation préalable de la limaille, puisque des fils de fer doux ou d'acier n'en attiraient aucune parcelle. On les expliquerait tout aussi peu, en les attribuant à des actions électriques ordinaires; car, en répétant l'expérience avec des limailles de cuivre ou de laiton, ou avec de la sciure de bois, on trouve qu'elles ne s'attachent, dans aucun cas, d'une manière sensible au fil conjonctif...

« L'action du fil sur le fer s'exerce à distance : il est facile de voir, en effet, que la limaille se soulève bien avant que le fil ne soit en contact avec elle...

« Le fil conjonctif ne communique au fer doux qu'une aimantation momentanée; si l'on se sert de petites parcelles d'acier, on leur donne parfois une aimantation permanente. Je suis même parvenu à aimanter ainsi complètement une aiguille à coudre.

« M. Ampère, à qui je montrais ces expériences, venait de faire l'importante découverte que deux fils rectilignes et parallèles, à travers lesquels passent des courants électriques, s'attirent quand les courants se meuvent dans le même sens, et se repoussent quand ils sont dirigés en sens contraire; il avait de plus tiré de là, par analogie, cette conséquence que les propriétés attractives et répulsives des aimants dépendent de courants électriques qui circulent autour des molécules du fer et de l'acier, dans

(1) *Annales de chimie et de physique* [2], t. XV, p. 93-102, 1820. — *Collection de mémoires relatifs à la physique*, publiés par la Société française de physique, t. II, p. 55-63, 1885.

une direction perpendiculaire à la ligne qui joint les deux pôles.... Ces vues théoriques lui suggérèrent à l'instant la pensée qu'on obtiendrait une plus forte aimantation en substituant au fil conjonctif droit dont je m'étais servi un fil plié en hélice, au centre de laquelle l'aiguille serait placée...

« Un fil de cuivre roulé en hélice était terminé par deux portions rectilignes qui pouvaient s'adapter, à volonté, aux pôles opposés d'une forte pile horizontale; une aiguille d'acier enveloppée de papier fut introduite dans l'hélice, mais après seulement que la communication entre les deux pôles eut été établie, afin que l'effet qu'on attendait ne pût être attribué à la décharge électrique, qui se manifeste à l'instant même où le fil conjonctif aboutit aux deux pôles. Pendant l'expérience, la portion de ce fil dans laquelle l'aiguille d'acier était renfermée demeura constamment perpendiculaire au méridien magnétique, en sorte qu'on n'avait rien à craindre de l'action du globe terrestre.

« Or, après quelques minutes de séjour dans l'hélice, l'aiguille d'acier avait reçu une assez forte dose de magnétisme; la position des pôles nord et sud se trouva d'ailleurs parfaitement conforme au résultat que M. Ampère avait déduit, à l'avance, de la direction des éléments de l'hélice, et de l'hypothèse que le courant électrique parcourt le fil conjonctif en allant de l'extrémité zinc à l'extrémité cuivre... »

Dans l'état actuel de nos connaissances, l'aimantation produite par les courants a la même origine que celle produite par les aimants : la création d'un champ magnétique ou galvanique dans la direction de l'aimantation, aimantation d'autant plus énergique, toutes choses égales d'ailleurs, que le champ est plus intense.

392. Force magnétisante. — L'aimantation d'une substance placée dans un champ magnétique est fonction de l'intensité du champ ou *force magnétisante* \mathcal{H} , de la température, de l'état physique et des nombreuses modifications moléculaires que peut recevoir la substance par des effets mécaniques ou moléculaires, tels que la tension, la torsion, la compression, la trempe, les vibrations, etc.

Considérons d'abord le cas le plus simple, celui d'une substance magnétique placée dans un champ magnétique uniforme, ayant une grande longueur par rapport à ses dimensions transversales, assez grande pour que l'aimantation puisse être considérée comme *solénoïdale* (379). Un barreau cylindrique dont la longueur est égale à 200 ou 300 fois son diamètre se trouve sensiblement dans ces conditions. Supposons le barreau main-

tenu à une température constante et n'étant soumis à aucune action mécanique intérieure. Nous pourrions soumettre ce barreau à une force magnétisante variable à volonté en le plaçant à l'intérieur d'un solénoïde (194) de grande longueur dont la force magnétisante aura pour valeur

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi NI}{l}.$$

Pour étudier l'aimantation du barreau, traçons une série de courbes en portant en abscisses les valeurs de la force magnétisante \mathcal{H} et en ordonnées ⁽¹⁾ l'intensité d'aimantation \mathfrak{J} , l'induction magnétique spécifique \mathfrak{B} , la perméabilité magnétique μ ou la susceptibilité magnétique κ .

Nous obtiendrons ainsi une série de courbes à l'aide desquelles nous pourrions facilement nous rendre compte de la variation des différents éléments : nous constaterons que, pour chaque substance magnétique, les courbes ont des formes différentes, et n'atteignent pas les mêmes valeurs maxima. Nous énumérons les principaux résultats actuellement acquis par les différents expérimentateurs qui se sont occupés de la question pendant ces dernières années, et ont donné les résultats de leurs expériences en unités C. G. S., ce qui facilite les comparaisons.

Les *constantes d'aimantation* que l'on détermine directement ou indirectement sont :

L'induction magnétique \mathfrak{B} , induite ou résiduelle.

La perméabilité magnétique μ .

L'intensité d'aimantation \mathfrak{J} , induite ou résiduelle.

La susceptibilité magnétique κ .

393. Induction magnétique. — L'induction magnétique d'une substance donnée augmente indéfiniment avec la force magnétomotrice, d'abord très vite, puis plus lentement. Avec un champ de 240 unités C. G. S., M. le Dr Hopkinson n'avait pas dépassé une induction de 20 000 unités C. G. S. M. Ewing a étudié, par des méthodes que nous indiquerons à propos de

(1) Les méthodes de détermination de ces éléments ont été ou seront exposées dans le cours de ce volume.

l'induction électromagnétique, comment varie cette induction pour des champs exceptionnellement intenses (1).

La figure 180 montre les résultats obtenus, parmi un grand nombre d'autres, sur de la fonte et du fer connu sous le nom de fer de Lowmoor.

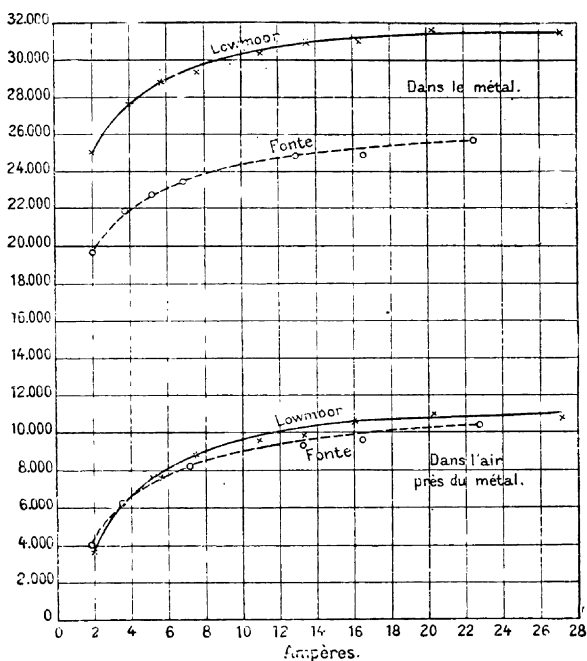


Fig. 180. — Variation de l'induction magnétique en fonction de l'excitation.

Pour le fer de Lowmoor, le champ ayant varié de 3630 à 11180 unités C. G. S., l'induction correspondante a varié de 24700 à 31560 unités C. G. S. Pour un certain échantillon, elle a même atteint 32880. C'est le chiffre le plus élevé trouvé dans ces expériences.

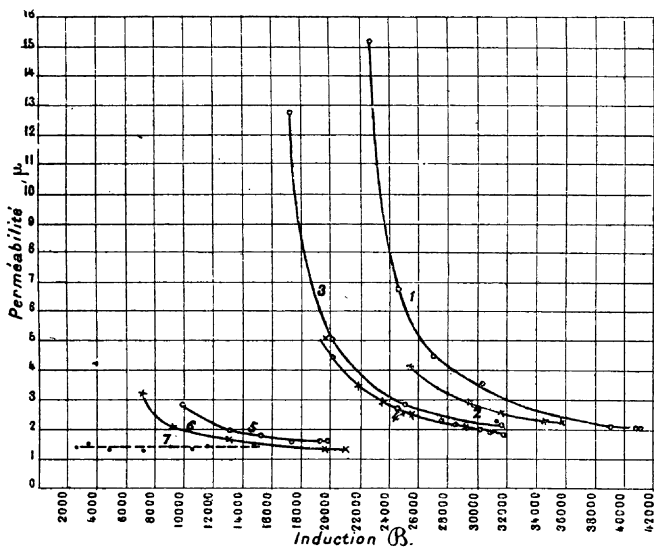
Des expériences faites pour déterminer la valeur du magnétisme résiduel ont montré que, pour des champs variant entre 4000 et 11000 unités C. G. S., le magnétisme résiduel reste

(1) Note présentée à la *Royal Society* le 24 mars 1887, par MM. J.-A. Ewing et William Low (*Électricien* du 18 juin 1887).

presque constant. Il est de 510 unités C. G. S. pour le fer de Lowmoor et de 500 unités C. G. S. pour le fer de Suède.

Pour la fonte, en faisant varier le champ de 3900 à 10610 unités C. G. S., l'induction a varié de 19660 à 25600 unités C. G. S. L'induction résiduelle a sensiblement conservé une valeur constante égale à 400 unités C. G. S.

394. Perméabilité magnétique. — La perméabilité μ est fonction de l'induction β . Elle passe par un maximum pour une certaine valeur de β , et décroît ensuite en tendant vers la valeur asymptotique $\mu=1$.



1. Fer forgé. — 2. Acier de Vicker. — 3. Colbat. — 4. Fonte. — 5, 6. Nickel. — 7. Acier au manganèse.

Fig. 181. — Variation de la perméabilité en fonction de l'induction dans des champs magnétiques intenses.

M. Rowland a étudié les variations de la perméabilité en portant en abscisses les valeurs de β et en ordonnées la valeur de μ correspondante pour chaque métal, et ce mode de représentation est souvent adopté pour l'étude des propriétés magnétiques des différentes substances, mais les courbes publiées par l'auteur et la formule empirique représentative

qu'il en a déduite ⁽¹⁾ sont inexactes parce que, d'après la formule de M. Rowland, la perméabilité pourrait devenir nulle, alors que toutes les expériences ultérieures et celles de M. Ewing en particulier ont montré que la perméabilité des substances magnétiques reste toujours plus grande que 1.

MM. J.-A. Ewing et William Low ⁽²⁾ ont étudié les variations de μ pour de très grandes inductions. La figure 181 résume les résultats de leurs expériences sur les métaux magnétiques les plus employés. La courbe relative à l'acier au manganèse (n° 7) est particulièrement remarquable, car elle montre que ce métal n'est guère plus perméable que l'air, pour lequel $\mu = 1$.

Si l'on avait porté en abscisses, non plus l'induction \mathcal{B} , mais la force magnétisante \mathcal{H} , toutes les courbes — à l'exception des courbes (2) et (7) — seraient sensiblement des hyperboles équilatères ayant $\mathcal{H} = 0$ et $\mu = 1$ pour asymptotes.

395. Intensité d'aimantation. — A température constante, l'intensité d'aimantation \mathcal{J} varie avec la force magnétisante et la

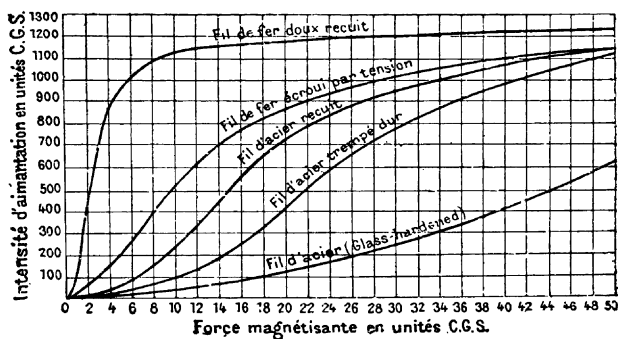


Fig. 182. — Variation de l'intensité d'aimantation en fonction de la force magnétisante.

substance mise dans le champ. La figure 182 montre les valeurs de \mathcal{J} obtenues par M. Ewing en plaçant différentes substances magnétiques dans un champ variant de 0 à 50 unités C. G. S. Dans aucun cas l'intensité d'aimantation n'a dépassé 1 200 unités C. G. S. et il faut des champs exceptionnellement intenses

⁽¹⁾ Mascart et Joubert, t. II, p. 715-718.

⁽²⁾ Phil. Trans. of the Royal Society of London, vol. CLXXX. 1889, A. pp. 221-244.

pour atteindre la valeur de 1600 unités C. G. S. (expériences de M. Shelford Bidwell).

On peut déduire de ces valeurs de \mathfrak{J} les valeurs correspondantes de la susceptibilité magnétique $\alpha = \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}$. Dans des champs très faibles α atteint 150 ; dans des champs exceptionnellement intenses, la susceptibilité magnétique s'abaisse à 0,15.

396. Saturation magnétique. — Sous l'action de forces magnétisantes \mathfrak{H} intenses, l'intensité d'aimantation \mathfrak{J} atteint une valeur constante, ou sensiblement telle dans le fer forgé, la fonte, un grand nombre d'aciers, le nickel et le cobalt. Cette valeur de \mathfrak{H} pour laquelle \mathfrak{J} ne varie plus sensiblement est voisine de 2000 unités C.G.S. pour le fer forgé et le nickel, moindre que 4000 unités C.G.S. pour la fonte et le cobalt. Dans des champs plus intenses, l'induction magnétique est liée à la force magnétisante \mathfrak{H} par la relation :

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + \text{constante.}$$

Dans les spécimens étudiés par M. Ewing, la valeur de cette constante $4\pi\mathfrak{J}$ a les valeurs suivantes :

	$4\pi\mathfrak{J}$
Fer forgé.	21 360
Fonte	15 580
Nickel.	5 030 à 6 470
Cobalt.	16 300

Lorsque l'aimantation se mesure par l'induction \mathfrak{B} , le terme saturation est inapplicable, et il n'y a pas de limite apparente à la valeur de \mathfrak{B} . Mais si l'on considère l'intensité d'aimantation, on atteint une limite définie, une vraie valeur de saturation, obtenue avec des forces magnétisantes relativement peu élevées. Rien ne prouve que cette limite soit asymptotique, mais elle est pratiquement atteinte avec le fer forgé pour $\mathfrak{H} = 2000$ unités C.G.S, et la valeur de \mathfrak{J} ne change plus sensiblement lorsque \mathfrak{H} varie de 2000 à 20000 unités C.G.S.

397. Hystérésis. — Le nom d'*hystérésis* (de ὑστερέω, je reste en arrière) a été donné ⁽¹⁾ par M. le professeur J.-A.

(1) *Proceedings of the Royal Society*, n° 214, 1881.

Ewing à un certain nombre de phénomènes qu'il définit ainsi d'une manière générale :

« Lorsque deux quantités physiques A et B sont telles que des variations cycliques de B produisent des variations cycliques de A, si les variations de A éprouvent un retard par rapport aux variations de B, on dit qu'il y a de l'*hystérésis* entre A et B. »

Nous ne nous occuperons ici, pour la question qui nous intéresse, que d'un cas particulier, celui de l'*hystérésis* dans les substances magnétiques décrivant un cycle magnétique.

Considérons, pour fixer les idées par un exemple concret, un solénoïde droit de très grande longueur l , roulé uniformément d'un nombre total de tours N, et traversé par un courant continu d'intensité I. Ce courant produit un champ magnétique uniforme dont l'intensité \mathcal{H} est (194)

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi NI}{l}.$$

Plaçons à l'intérieur de ce solénoïde une substance magnétique sous forme d'un fil mince, dont la longueur soit égale à 300 ou 400 fois son diamètre. L'intensité d'aimantation \mathcal{J} et l'induction spécifique correspondante \mathcal{B} prendront une série de valeurs dépendant de \mathcal{H} , de la nature de la substance ainsi que des modifications précédentes du champ.

Si, par exemple, nous faisons varier \mathcal{H} depuis une valeur $+\mathcal{H}$ jusqu'à une valeur égale et de signe contraire $-\mathcal{H}$, et inversement, nous ferons décrire au corps placé dans le champ un *cycle magnétique*.

Étudions, par une méthode quelconque ⁽¹⁾, les variations de \mathcal{J} ou de \mathcal{B} en fonction de \mathcal{H} , lorsqu'on fait décrire à la substance un cycle magnétique complet, depuis la valeur $-\mathcal{H}$ jusqu'à la valeur $+\mathcal{H}$, en revenant à la valeur $-\mathcal{H}$ pour fermer le cycle, et portons en abscisses les valeurs de \mathcal{H} et celles de \mathcal{J} ou de \mathcal{B} en ordonnées. Nous obtiendrons (fig. 183) deux

(1) Voy. pour les méthodes de mesure les mémoires de MM. Ewing et Hopkinson, publiés dans les *Philosophical Transactions of the Royal Society*, part II, 1885, ou le chapitre XVII de cet ouvrage, chapitre consacré aux compléments de mesure.

lignes courbes ABCD et DEFA laissant entre elles une certaine surface et montrant, par exemple, qu'à une valeur donnée de $\mathcal{J}\mathcal{C}$ correspondent deux valeurs différentes de \mathcal{B} , suivant que $\mathcal{J}\mathcal{C}$ passe par des valeurs croissantes ou décroissantes. L'hystérésis entre $\mathcal{J}\mathcal{C}$ et \mathcal{B} dans le cycle magnétique se traduit ici par un retard à la désaimantation ou magnétisme résiduel.

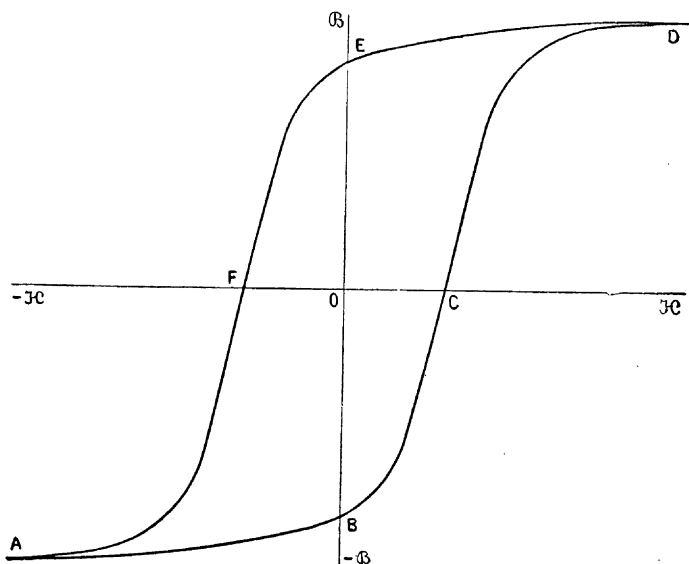


Fig. 183. — Hystérésis.

Nous démontrerons un peu plus loin (chapitre XIV) que ce phénomène correspond à une certaine dissipation d'énergie représentée précisément, à un facteur constant près, par la surface comprise entre les deux courbes ABCD et DEFA.

Toute cause de mouvement moléculaire d'une substance magnétique soumise à l'action d'une force magnétisante $\mathcal{J}\mathcal{C}$ facilite l'aimantation et accroît l'induction \mathcal{B} . Inversement, lorsque la force magnétisante a disparu, toute cause d'ébranlement, choc, élévation de température, etc., diminue le magnétisme rémanent. Les substances qui forment les meilleurs aimants permanents sont celles qui sont le moins sensibles à ces causes de variations. Elles s'aimantent moins facilement, mais elles gardent aussi bien mieux leur aimantation.

Le magnétisme rémanent présente une certaine analogie avec la torsion mécanique : une trop grande torsion mécanique ne permet pas aux molécules de reprendre leur position initiale lorsque les forces exerçant cette torsion ont disparu. L'aimantation résiduelle se manifeste surtout pour des barreaux de très grande longueur relativement à leurs dimensions transversales ou formant des circuits magnétiques fermés. Avec des barreaux courts, le magnétisme résiduel est faible et la désaimantation facile.

Le recuit diminue considérablement le magnétisme rémanent du fer doux et lui donne des propriétés fort appréciées pour la construction des électro-aimants (403), des appareils télégraphiques, et tous appareils qui doivent subir des variations d'aimantation rapides.

La présence d'un joint ⁽¹⁾ transversal entre les deux parties d'un circuit magnétique crée une résistance magnétique spéciale, fonction de l'induction magnétique et diminuant beaucoup à mesure que l'induction croît. Cette résistance existe même avec des surfaces parfaitement dressées et pour de faibles valeurs de \mathcal{H} , elle est presque aussi grande qu'avec des faces brutes. La pression mécanique diminue la résistance magnétique d'un joint à surfaces brutes, mais ne l'élimine pas, alors que cette résistance magnétique disparaît presque entièrement lorsque les surfaces sont polies. Dans ce dernier cas, l'interposition d'une feuille d'or entre les deux faces du joint n'a pas une grande influence.

398. Magnétisme résiduel des barreaux d'acier droits. — Le magnétisme résiduel des barreaux d'acier trempés (*glass-hard*) est une fonction de leur composition chimique ainsi que du rapport de leur longueur à leur diamètre. M. W. Brown ⁽²⁾ a fait quelques expériences pour déterminer ces variations.

Les expériences de M. Brown ont porté sur trois spécimens de 2, 6 à 3 mm de diamètre, et des longueurs variant entre 1

⁽¹⁾ J. A. Ewing et William Low. On the influence of a Plane of Transverse Section on the Magnetic Permeability of an Iron Bar. *Philosophical Magazine*, septembre 1888.

⁽²⁾ *Phil. Mag.*, octobre 1888. *Électricien* du 20 avri. 1889.

et 20 centimètres. Les barreaux étaient trempés en les chauffant au rouge vif dans un tube de fer placé sur un feu de charbon et en les faisant tomber dans un récipient de 1 m. de hauteur plein d'eau à la température de 7° C. Après nettoyage, polissage, dressage des extrémités et mesure de la longueur, les barreaux étaient pesés et aimantés à saturation dans une longue hélice produisant un champ magnétique ou force magnétisante de 1500 unités C.G.S. Le tableau ci-dessous reproduit les principaux résultats trouvés par l'auteur :

l	$\frac{l}{d}$	M	$\frac{\mathcal{M}}{M}$	J
<i>Spécimen n° 1, d = 0,3 cm, D = 7,78.</i>				
20	66,6	11,00	59,9	466,02
15	50,0	8,25	59,0	459,07
10	33,3	5,50	57,0	443,50
8	26,6	4,40	51,9	403,83
6	20,0	3,30	44,8	348,58
4	13,3	2,20	32,5	252,88
2	6,6	1,10	15,2	118,27
1	3,3	0,55	6,96	54,15
<i>Spécimen n° 2, d = 0,265 cm, D = 7,8.</i>				
20	75,5	8,60	90,5	705,90
15	56,7	6,40	83,7	652,80
10	37,7	4,30	71,0	553,80
8	30,2	3,44	64,6	503,80
6	22,6	2,58	53,8	419,60
4	15,1	1,72	41,2	321,30
2	7,6	0,86	12,4	96,70
1	3,8	0,43	5,5	42,90
<i>Spécimen n° 3, d = 0,27 cm, D = 7,86.</i>				
20	74,1	9,00	78,4	616,26
15	55,6	6,75	75,0	589,50
10	37,0	4,50	70,0	550,20
8	29,6	3,60	59,6	468,42
6	22,2	2,70	45,4	356,82
4	14,8	1,80	27,3	214,55
2	7,4	0,90	10,7	84,10
1	3,7	0,45	5,0	39,30

l , longueur de l'aimant en cm ;

d , diamètre de l'aimant en cm ;

M , sa masse en grammes-masse ;

$\frac{\mathfrak{M}}{M}$, le rapport de son moment magnétique à sa masse ;

\mathfrak{J} , son intensité d'aimantation moyenne ;

D , sa densité.

Au point de vue du magnétisme résiduel, le spécimen numéro 2 est le meilleur ; c'est celui des trois échantillons qui contient le plus de phosphore, le moins de silicium, et une quantité de manganèse intermédiaire. C'est le plus dur et le plus élastique ; il est très fibreux, tenace et difficile à redresser.

Ces chiffres parlent d'eux-mêmes et expliquent comment la qualité des aciers et la longueur des aimants peuvent influencer, dans une large mesure, sur leur intensité d'aimantation.

399. Affaiblissement des aimants permanents. —

Les aimants permanents abandonnés à eux-mêmes perdent graduellement leur aimantation. *M. H.-M. Bosanquet* ⁽¹⁾ a fait quelques expériences pour déterminer la rapidité de cet affaiblissement sur un aimant droit de bonne qualité, aussi bien trempé que possible.

L'aimant, fabriqué le 8 février, a été mesuré à différentes époques. Voici les valeurs de son moment magnétique à ces différentes époques, exprimées en unités C.G.S.

8 février.	»
18 février.	12 039
3 mars.	11 822
15 mars.	11 767
8 avril.	11 620
18 septembre.	11 120

Ces chiffres montrent que dans l'espace de sept mois le moment de l'aimant s'est affaibli sensiblement dans le rapport de 12 à 11.

La diminution du moment magnétique est plus rapide au début, et il résulte de ces expériences que la variation est d'autant moins rapide que l'aimant a été fabriqué depuis plus

(1) *Philosophical Magazine*, 1886.

longtemps. Ces variations sont cependant loin d'être insignifiantes, et les possesseurs d'appareils de mesure *étalonnés*, dans lesquels l'aiguille est dirigée par un aimant permanent, devront vérifier *souvent* cet étalonnage, pour pouvoir répondre des indications fournies par ces appareils.

M. *George Hookham* est parvenu récemment ⁽¹⁾ à réaliser des aimants permanents donnant des champs magnétiques constants en proportionnant convenablement leurs dimensions, par analogie avec les propriétés des circuits voltaïques. Si, dans un circuit voltaïque, nous voulons franchir une grande résistance extérieure, nous augmentons le nombre d'éléments en tension, sans nous préoccuper de la résistance intérieure.

Dans un faisceau de barreaux aimantés, l'élément magnétique est constitué par chaque barreau, et la force magnétomotrice est proportionnelle à la longueur du barreau. Pour vaincre la grande résistance magnétique de l'air, il faut que le rapport de la section transversale totale des barres d'acier à leur longueur soit très petit comparé au rapport de la section transversale de l'air à la distance des pièces polaires qui terminent l'aimant. Avec l'acier au tungstène employé par M. *Hookham*, si on appelle

S, la section de l'espace d'air,

L, la distance des pièces polaires,

s, la section transversale totale des barres d'acier,

l, leur longueur,

on doit avoir :

$$\frac{S}{L} = 70 \frac{s}{l}$$

Par analogie avec le circuit voltaïque, ce résultat devrait être obtenu lorsque la résistance intérieure est égale à la résistance extérieure. Avec la proportion de 1 à 70, cette relation est précisément satisfaite en pratique. Les expériences établissent par suite que la résistance magnétique spécifique de l'acier au tungstène — de la qualité employée par M. *Hookham* — est 70 fois plus petite que celle de l'air, et environ 20 fois plus grande que celle du fer doux.

(1) *Philosophical Magazine*, février 1889.

Des résultats non moins importants que simples résultent de l'analogie ainsi supposée entre un aimant permanent et un élément voltaïque. En effet, si on néglige la résistance magnétique des pièces polaires, on voit que l'on peut augmenter l'intensité du champ dans une section constante proportionnellement à la racine carrée du poids des aimants en acier employés. On peut, par exemple, doubler le champ en doublant la longueur ainsi que la section des aimants, car on double la force magnétomotrice sans altérer la résistance totale du circuit magnétique. On peut encore doubler l'intensité du champ en divisant par 2 la surface ainsi que la distance, car on n'a rien changé à la force magnétomotrice ni aux résistances, mais on fait passer le flux dans une section deux fois plus petite. On peut encore doubler la distance et conserver le même champ en doublant la longueur des aimants. En fait, il est très facile de combiner une disposition d'aimants permanents qui, dans de certaines limites, produisent un champ d'une intensité donnée dans un espace d'air donné. Le courant qui produit l'aimantation du circuit doit toujours être appliqué lorsque le circuit magnétique est complet, sous peine d'obtenir de faibles intensités de champ. On aimante à saturation par le courant d'une dynamo, on enlève les bobines et on martèle vigoureusement les aimants. Ce martelage réduit rarement l'aimantation de plus de 1 p. 100.

Des expériences de plusieurs mois ont montré qu'il n'y avait pas d'affaiblissement d'aimantation mesurable pour les aimants ainsi traités.

400. Influence de la température sur l'aimantation.

— Une élévation de température a pour effet de diminuer l'aimantation, et il est toujours possible d'atteindre une température à laquelle les métaux ne manifestent plus aucune propriété magnétique.

Fer. — La plupart des études faites sur les propriétés magnétiques du fer par *Rowland* (1873), *Paloni* (1882), *Mac Rae* (1885), *Berson* (1886), ne portaient pas sur des températures dépassant 35° C.

M. Ledeboer ⁽¹⁾ a étudié les propriétés magnétiques du fer

(1) *Académie des sciences*, séance du 9 janvier 1888.

jusqu'aux températures de 800° C, mesurées à l'aide du couple thermo-électrique de M. Le Châtelier (357). La figure 184 montre les résultats obtenus sur un barreau de *fer doux du Berry*, soumis à des forces magnétisantes de 35, de 100 et de 200 unités C.G.S. On voit qu'à des températures inférieures à 680 degrés, le fer conserve sensiblement les mêmes propriétés

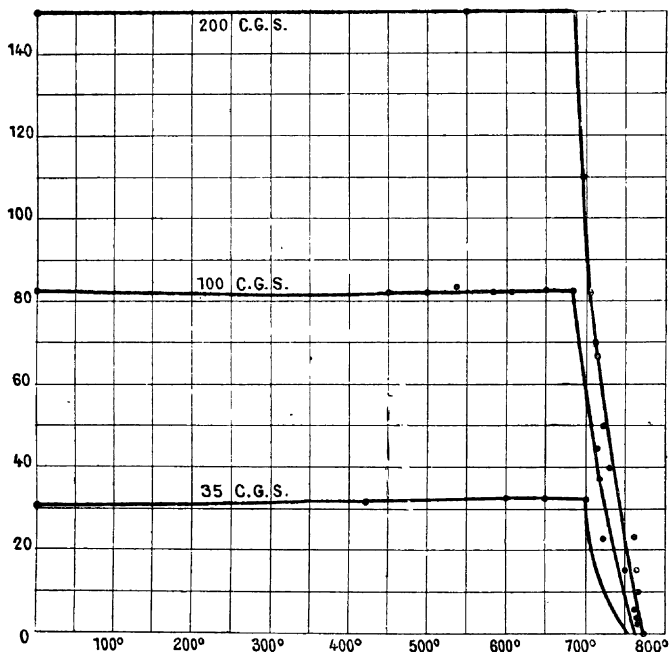


Fig. 184. — Influence de la température sur l'aimantation.

magnétiques qu'à froid, et qu'à partir de cette température la chute est très brusque. Vers 750 degrés, les propriétés magnétiques n'existent presque plus et elles ont complètement disparu à 770 degrés. Cette variation brusque a donc lieu dans un intervalle de température de 80 à 100 degrés. Dès qu'on refroidit le fer, on constate que les propriétés magnétiques réapparaissent comme auparavant.

Des expériences récentes de M. le D^r Hopkinson ⁽¹⁾ ont ce-

(¹) *Royal Society*, séance du 14 février 1889.

pendant établi que la perméabilité magnétique du fer est plus grande pour les faibles forces magnétisantes aux températures élevées. Vers 700° C., la perméabilité atteint 11 000 pour $\mathfrak{C}=0,3$, et tombe à 0 à la température de 737° , à laquelle le fer n'est plus magnétique. La modification moléculaire spéciale que subit le fer à cette température — phénomène connu sous le nom de *récalescence* — semble ne pas être étrangère à cette apparente anomalie.

401. Moteur thermomagnétique. — La diminution d'aimantation d'un barreau magnétique avec la température permet de réaliser un moteur thermomagnétique, comme l'a fait M. *Schwedoff* ⁽¹⁾ en 1886. Si l'on approche un aimant d'un anneau de fer horizontal, porté par un axe vertical, et que l'on chauffe au rouge vif une moitié de l'anneau, celui-ci entre en rotation, à la condition que le pôle de l'aimant se trouve entre la partie chaude et la partie froide de l'anneau. Ce travail de rotation est entretenu aux dépens de la chaleur, dont une certaine quantité disparaît dans le fer de l'anneau.

M. Lippmann a donné une théorie très simple du fonctionnement de cet appareil en considérant un disque continu aimanté radialement ⁽²⁾.

Dans tous ces phénomènes, l'énergie est fournie par la source de chaleur, le magnétisme n'intervenant que comme un intermédiaire de transformation de l'énergie thermique en travail. En 1887 ⁽³⁾, *Edison* a présenté à l'*American Association for the advancement of science*, un appareil destiné à effectuer la transformation de l'énergie thermique en énergie électrique, en utilisant les variations de perméabilité des métaux magnétiques, mais cet appareil ne semble pas avoir donné jusqu'ici de résultats, car on n'en a plus entendu parler.

402. Diamagnétisme. — *Faraday* a donné, en 1845, le nom de diamagnétiques à tous les corps qui possèdent la propriété d'être repoussés par les aimants, propriété découverte dès 1778 par *Brugmann*, de Leyde, pour le bismuth, et en 1827 par *A. C. Becquerel* pour l'antimoine. Les corps diamagnétiques

(1) *Société de physique*, t. 1, 1886, p. 124.

(2) LIPPMMANN, *Cours de thermodynamique*, 1889, p. 112.

(3) *Électricien* du 17 septembre 1887, n° 231, p. 593.

mis sous la forme de cylindres allongés et placés dans le champ intense produit par les pôles d'un puissant électro-aimant se disposent *transversalement* à la direction générale des lignes de force (fig. 185). La plupart des liquides, excepté les sels des substances magnétiques, sont diamagnétiques; il en est de même

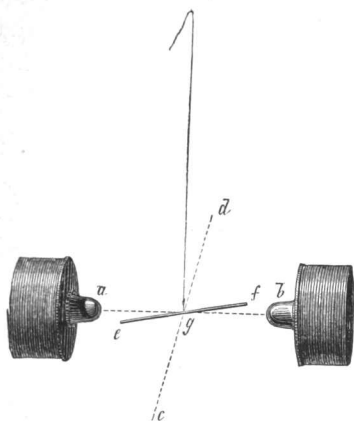


Fig. 185. — Diamagnétisme du bismuth.

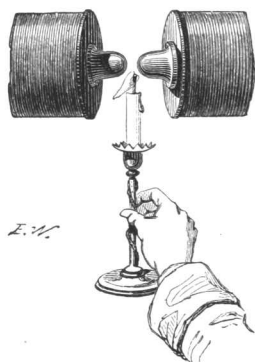


Fig. 186. — Diamagnétisme des flammes.

des flammes (fig. 186) et des gaz, à l'exception de l'oxygène et de l'ozone. Tous ces effets sont d'ailleurs très faibles et ne peuvent être mis en évidence qu'à l'aide de champs magnétiques exceptionnellement intenses.

Il est établi aujourd'hui que l'existence des corps diamagnétiques est incompatible avec le principe de la conservation de l'énergie (1). Les corps soi-disant diamagnétiques ne sont que des corps magnétiques plongés dans un milieu plus magnétique (2). Si nous prenons pour unité la perméabilité de l'air ou du vide, un corps diamagnétique est celui dont la perméabilité est plus petite que 1. Un barreau diamagnétique placé dans un champ magnétique ne prend donc pas une polarité *inverse* de celle qu'y prendrait un corps magnétique, comme le supposait M. Tyndall, d'après l'expérience suivante :

(1) P. DUHEM, *Sur l'impossibilité des corps diamagnétiques*. Académie des sciences, séance du 20 mai 1889.

(2) BECQUEREL, *Annales de chimie et de physique*, t. XXVIII, p. 283, 1850.

« Une bobine fixée horizontalement est traversée par un barreau de bismuth, qui la dépasse de part et d'autre de quelques centimètres; ce barreau est supporté par un équipage suspendu lui-même à un faisceau de fils de cocon, de sorte que le barreau peut tourner librement dans l'intérieur de la bobine. A côté de cet appareil est disposé un puissant électro-aimant, entre les pôles duquel l'une des extrémités A du barreau peut se mouvoir.

« Lorsqu'on fait passer un courant dans la bobine, on constate que l'extrémité A du barreau est devenue un pôle, car l'action de l'électro-aimant dévie le barreau : seulement le sens de la déviation est l'inverse de celui de la déviation que subirait un barreau de fer substitué au barreau de bismuth. On a conclu de cette expérience que le bismuth prend des pôles contraires à ceux que prendrait le fer dans les mêmes conditions, et l'on a considéré l'existence de la polarité diamagnétique comme établie expérimentalement. »

M. *Blondlot* ⁽¹⁾ a fait une autre expérience qui infirme les conclusions de M. Tyndall. Au barreau de bismuth il substitue un tube de verre rempli d'une dissolution étendue de perchlore de fer dans l'alcool méthylique (perchlorure 27 parties, alcool méthylique 55 parties, en poids).

Le tube ainsi rempli est magnétique, et l'on constate que, substitué au barreau de bismuth dans l'expérience de M. Tyndall, il est dévié dans le même sens qu'un barreau de fer. On répète ensuite l'expérience, en faisant cette fois plonger le tube dans une auge remplie d'une dissolution concentrée de perchlore de fer (perchlorure 55 parties, alcool méthylique 45 parties) : la déviation a alors lieu en sens contraire, c'est-à-dire *dans le même sens que le bismuth*.

Ainsi, le tube rempli de protochlorure, qui s'aimante *toujours à la manière du fer*, se comporte, dans l'expérience analogue à celle de M. Tyndall, comme un barreau de fer s'il est dans l'air, milieu moins magnétique que lui, et comme un barreau de bismuth s'il est environné d'un milieu plus magnétique, la dissolution concentrée de perchlore. Cet exemple

(1) *Académie des sciences*, séance du 7 mai 1888.

montre que, dans l'expérience de M. Tyndall, le sens de la déviation du bismuth peut s'expliquer en admettant, comme le veut la théorie de M. Becquerel, que le bismuth s'aimante à la manière du fer, mais que le milieu qui l'entoure est plus magnétique que lui, ce milieu fût-il le vide.

Les figures 187 et 188 montrent comment se répartissent les lignes d'induction dans le cas de deux sphères placées dans un champ magnétique uniforme de perméabilité égale à 1. La figure 187 se rapporte à un corps *magnétique* pour lequel

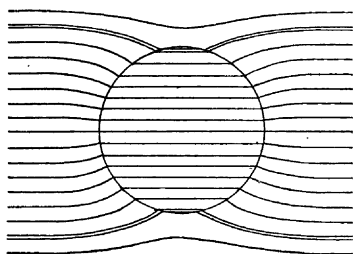


Fig. 187. — Distribution des lignes de force dans un corps magnétique.

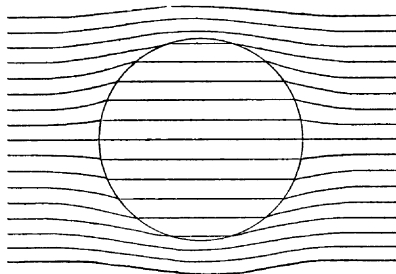


Fig. 188. — Distribution des lignes de force dans un corps diamagnétique.

$\mu = 2,8$; la figure 188 à un corps *diamagnétique* pour lequel $\mu = 0,48$. Il n'y a aucune inversion dans la direction des lignes de force comme le voudrait la théorie de M. Tyndall. En considérant le circuit magnétique (390) un corps diamagnétique est celui dont la résistance magnétique spécifique est plus grande que celle de l'air; un corps magnétique est celui dont la résistance magnétique spécifique est plus petite que celle de l'air.

ÉLECTRO-AIMANTS.

403. Définitions. — On donne le nom d'électro-aimant à tout système entouré d'une bobine de fil, et qui s'aimante sous l'influence d'un courant traversant la bobine : un électro-aimant n'est donc pas autre chose qu'une application des phénomènes d'induction magnétique produits dans une substance magnétique sous l'influence d'un champ galvanique, cette induction

disparaissant généralement en grande partie avec la cause qui l'a fait naître, c'est-à-dire lorsqu'on interrompt le courant.

La forme la plus généralement adoptée est celle d'un U sur les jambes duquel on vient enrouler les bobines magnétisantes, ou de deux noyaux cylindriques réunis à la partie inférieure par une *culasse*. La pièce sur laquelle s'exerce l'attraction est l'*armature* de l'électro-aimant.

Pour trouver la direction de l'aimantation produite par un courant donné, que l'enroulement soit *dextrorsum* ou *sinistrorsum*, suivant l'ancienne nomenclature, il suffit d'appliquer la règle d'Ampère (142) ou la règle du tire-bouchon de Maxwell (144).

Les formes, les dimensions et les dispositions des électro-aimants varient à l'infini avec l'application en vue et le but à atteindre.

Lorsqu'on veut seulement une grande force portante au contact, il faut diminuer le plus possible la résistance magnétique en faisant un *électro* ⁽¹⁾ court et de grosse section. On obtient ainsi une grande force portante avec un très petit nombre relatif de spires, mais un semblable électro-aimant présente beaucoup de magnétisme rémanent ou d'hystérésis, et lorsque le courant est interrompu, on éprouve une grande difficulté à arracher *une première fois* l'armature, si celle-ci était en contact *direct* avec le noyau, formant ainsi un *circuit magnétique fermé* entièrement en fer. Ce magnétisme résiduel, dû à l'hystérésis (397), se manifeste d'autant moins que le circuit est plus ouvert, c'est-à-dire que l'on interpose une ou plusieurs lames d'air sur le trajet des lignes de force, mais il faut alors une plus grande force magnétomotrice pour produire la même induction magnétique et la même force portante (104), puisque la résistance magnétique du circuit se trouve augmentée.

C'est pour atténuer les effets du magnétisme rémanent que l'on interpose souvent une feuille de papier entre les noyaux et l'armature d'un électro, ou que l'on munit ces noyaux de petits butoirs en laiton qui empêchent le contact direct.

L'attraction à distance est une fonction très complexe de la

(1) Le mot *électro* est souvent employé dans le langage pour *électro-aimant*.

distance de l'armature, car à mesure que cette distance augmente, l'induction dans le fer varie avec la perméabilité, et la résistance totale du circuit magnétique devient inaccessible au calcul, à cause des dérivations magnétiques qui se produisent entre les jambes de l'électro lorsque l'armature est assez éloignée, etc.

Nous indiquerons un cas simple dans lequel la force portante peut se déterminer facilement, celui dans lequel l'armature est au contact et forme un circuit magnétiquement fermé.

404. Force portante des aimants et des électro-aimants. — La force exercée par deux aimants entre eux, par un aimant sur son armature, ou par un électro-aimant, est fonction de la section et de l'induction. Considérons un cylindre de fer doux uniformément aimanté et coupé en son milieu. Pour une section S , la force F exercée entre les deux moitiés sera

$$F = 2\pi J^2 S = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi} \text{ dynes} \quad (1)$$

$$F = 4 \cdot 10^{-5} \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi} \text{ grammes.} \quad (2)$$

relation précédemment établie ici (**384**), et par Maxwell ⁽¹⁾, en s'appuyant sur d'autres considérations.

Cette formule montre qu'un aimant en U ou en fer à cheval a une force portante plus grande que s'il était droit, parce que, dans l'aimant en U, les deux surfaces agissent en même temps et que l'induction spécifique \mathcal{B} est plus grande. Pour avoir le maximum de force portante, la section de l'armature doit être au moins égale à celle de l'aimant, afin qu'elle ne soit pas saturée, ce qui limiterait le flux d'induction et, par suite, la force portante.

L'induction magnétique rémanente d'un bon acier bien trempé étant au maximum de 10 000 unités C.G.S., la force portante d'un aimant bien trempé dont la section *utile* est de S cm² sera au maximum

$$F = 4\,000S \text{ grammes.}$$

(1) CLERK-MAXWELL, *Electricity and Magnetism*, § 643.

405. Calcul des électro-aimants. — Soient :

S la section en cm^2 d'un électro-aimant;

l la longueur du circuit magnétique formé par l'électro et l'armature ou la longueur en cm de la ligne passant par le centre de gravité de chaque section perpendiculaire au flux d'induction magnétique;

μ la perméabilité magnétique du noyau pour l'état de saturation produit par le courant traversant les spires;

N le nombre total de spires magnétisantes;

I l'intensité du courant en unités C.G.S.;

\mathcal{F} la force magnétomotrice $4\pi NI$.

On a les formules bien connues :

$$\Phi = \mathcal{B}S = \frac{4\pi NI}{\frac{l}{\mu}} = 4\pi NI \cdot \frac{\mu}{l} S = \mathcal{F} \frac{\mu}{l} S; \quad \mathcal{B} = \mathcal{F} \frac{\mu}{l},$$

d'où :

$$F = \frac{S}{8\pi} \left(\mathcal{F} \frac{\mu}{l} \right)^2 \text{ dynes.} \quad (3)$$

Pour une force magnétomotrice donnée, l'induction spécifique \mathcal{B} est proportionnelle à la perméabilité et inversement proportionnelle à la longueur du circuit magnétique.

Il faut donc, pour obtenir un électro-aimant ayant une grande force portante, adopter des noyaux *courts* et de grande section S, pour ne pas trop les saturer et diminuer ainsi leur perméabilité magnétique.

D'après des expériences faites en 1886 par M. Shelford Bidwell, on peut ainsi obtenir des tensions qui atteignent 15 900 g par cm^2 , à la condition d'employer des forces magnétomotrices suffisantes pour produire une induction spécifique \mathcal{B} voisine de 20 000 unités C.G.S.

Formule pratique. — Lorsqu'on exprime la force F en grammes, et l'intensité du courant en ampères, la formule donnant l'excitation en ampère-tours (NI) devient, après transformations de la formule fondamentale :

$$NI = 1.25 \frac{l}{\mu} \sqrt{\frac{f}{S}}. \quad (4)$$

Pour calculer un électro-aimant de force portante donnée, on détermine d'abord sa section en supposant une tension moyenne, facile à atteindre, de 8 à 10 kg par cm^2 . Puis on suppose une perméabilité magnétique correspondante un peu trop faible, $\mu=300$ par exemple; en introduisant ces valeurs dans la formule (4) on en déduit \mathcal{F} connaissant la longueur l du circuit magnétique. Une légère modification de la force magnétomotrice (intensité du courant ou nombre de spires) permet de corriger l'erreur faite sur la qualité du fer et le contact plus ou moins imparfait de l'armature et des noyaux de l'électro-aimant.

Application numérique. — Supposons qu'il s'agisse de construire un électro-aimant capable de porter 500 kilogrammes, l'armature étant au contact. En se donnant une tension de 10 kg par cm^2 , la section totale devra donc être de 50 cm^2 , et celle du noyau de 25 cm^2 , les deux pôles agissant ensemble. Le diamètre correspondant sera de 5,7 cm. Nous pourrions donner aux noyaux 15 cm de longueur et les écarter d'axe en axe de 10 cm; la culasse et l'armature pourront être constituées par deux parallépipèdes de 6 cm de largeur et 5 cm d'épaisseur, donnant ainsi 30 cm^2 de section et formant un circuit magnétique dont la longueur totale l est de 50 cm.

La formule pratique donne, tous calculs faits :

$$NI = 2\,082 \text{ ampère-tours.}$$

On obtiendra cette force magnétomotrice en enroulant 520 spires sur chacun des noyaux et en les faisant traverser par un courant de 2 ampères. Comme les noyaux ont 15 cm de longueur, 5 couches de fil de 1 mm de diamètre suffiront pour produire l'excitation.

Ces chiffres montrent qu'on pourra obtenir la force portante demandée avec des noyaux encore plus courts, ce qui permettra de diminuer encore la force magnétomotrice en réduisant le nombre de spires.

Ces formules se rapportent à des électro-aimants dont l'armature et les noyaux sont *au contact*. Lorsque la distance augmente, la résistance magnétique de l'air intervient pour modifier l'induction. Voici, à titre d'exemple, des résultats

obtenus par M. Leduc ⁽¹⁾ sur un électro de Faraday de 16 cm de diamètre extérieur, 4 cm de diamètre intérieur et des noyaux de 28 cm de longueur recouverts de 27 tours par cm

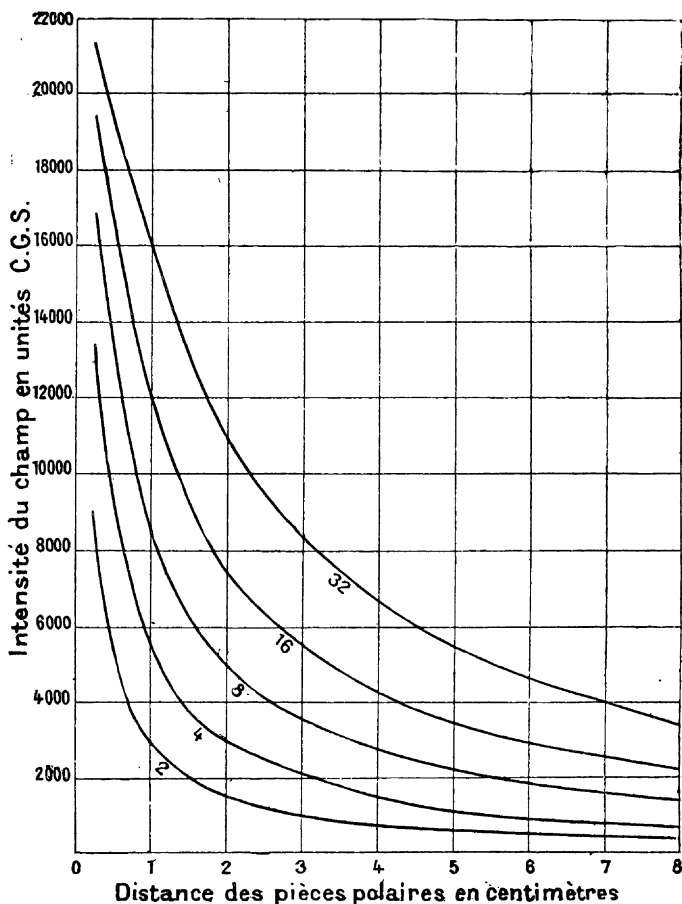


Fig. 189. — Variation du champ magnétique en fonction de la distance des pièces polaires d'un électro-aimant.

de longueur d'un fil de cuivre de 3 mm de diamètre (à nu). Ces noyaux ont été garnis de pièces polaires de 7 cm de diamètre et de 2,3 cm d'épaisseur. La figure 189 montre comment varie

(1) Académie des sciences, séance du 15 novembre 1886.

le champ magnétique entre les pièces polaires en fonction de la distance pour des courants donnés, indiqués à côté des courbes correspondantes. La figure 190 montre l'influence de la

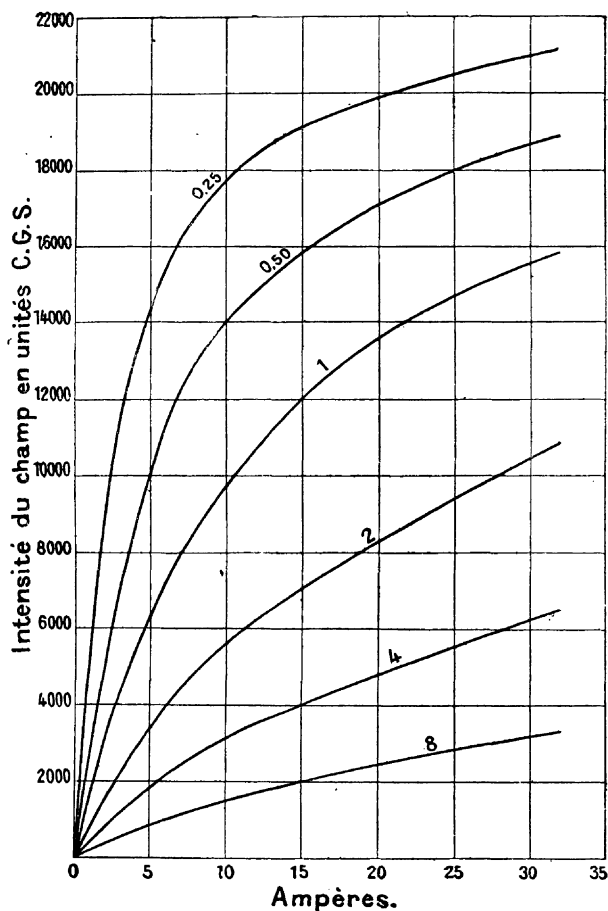


Fig. 190. — Variation du champ magnétique entre les pièces polaires d'un électro-aimant en fonction de l'excitation.

distance lorsqu'on fait varier la force magnétomotrice. Ces courbes mettent bien en relief l'influence des noyaux de fer sur le champ. On voit, par exemple, que pour une distance de 8 cm (fig. 190) la valeur du champ en fonction de la distance est presque une ligne droite, ce qui indique que le noyau n'a

presque plus d'action : les courbes obtenues avec ou sans noyau coïncideraient presque.

Toutes les formules empiriques établies pour représenter l'aimantation en fonction de l'intensité du courant n'ont donc aucune signification précise, puisque les courbes qui représentent cette aimantation — définie, par exemple, par les variations de β en fonction de \mathcal{H} — ont des formes qui dépendent des proportions relatives d'air et de substances magnétiques intercalées dans le circuit magnétique, et se rapprochent d'autant plus d'une ligne droite que le circuit renferme moins de fer. Ces considérations seront développées à propos de la construction des machines dynamo-électriques.

406. Attraction d'un solénoïde et d'un noyau de fer doux. — Lorsqu'un noyau de fer doux a son axe dans le prolongement de celui d'un solénoïde, il s'aimante par induction et l'attraction mutuelle varie avec l'intensité du courant, la distance et la forme. La figure 194 montre comment varie l'attraction en fonction de l'enfoncement pour des noyaux cylindriques et coniques de longueurs variables. Ces courbes montrent que l'attraction ainsi exercée est une fonction complexe des divers éléments qui concourent au phénomène, qu'il est impossible de le soumettre au calcul. Ces actions sont surtout utilisées dans les indicateurs de courant et de potentiel et dans un grand nombre de régulateurs électriques.

407. Indicateurs de courant et de potentiel. — Nous désignons sous ce nom, par opposition aux appareils de mesure proprement dits (210), susceptibles d'un étalonnage précis, un grand nombre d'instruments employés dans l'industrie et fondés sur les actions magnétiques, électromagnétiques et électrodynamiques des courants. Nous en indiquerons quelques types choisis parmi les plus connus, car le nombre des combinaisons possibles varie à l'infini avec la nature de la force antagoniste (ressort, poids, poussée hydrostatique), le mouvement de l'index (rotation ou déplacement rectiligne vertical ou horizontal), etc.

L'attraction exercée par un solénoïde sur un noyau de fer doux a donné naissance à un grand nombre d'*indicateurs* de courant ou de différences de potentiel.

Le premier appareil de ce genre est la *balance électromagnétique* de M. E. Becquerel (1854). Elle se compose d'une balance sensible portant à ses extrémités deux aimants plongeant dans des solénoïdes verticaux. Il y a attraction d'un côté, répulsion de l'autre, pour que les couples s'ajoutent. On équilibre l'action magnétique à l'aide de poids mis dans les plateaux. Cet

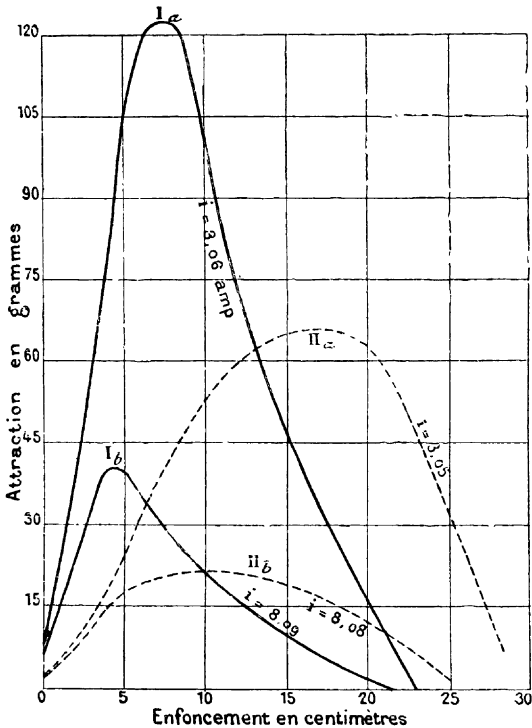


Fig. 191. — Attraction d'un solénoïde par un noyau de fer doux.

appareil est aujourd'hui complètement abandonné, à cause du défaut d'exactitude et de permanence de l'aimantation des aimants sous l'action des courants.

M. Kohlrausch (1882) équilibre l'attraction d'un solénoïde sur un noyau de fer doux à l'aide d'un ressort. L'enroulement de ces solénoïdes dépend de la grandeur des courants à mesurer.

M. de Lalande (1885) a imaginé et réalisé dans le même but

un *aéromètre électrique* (fig. 192) formé d'un faisceau de fils de fer doux placé à l'intérieur d'un aéromètre métallique, plongeant dans une éprouvette remplie d'eau et entourée par une bobine que traverse le courant à mesurer. La position initiale de l'aéromètre — réglée par le niveau maintenu constant du liquide — étant toujours la même, il prendra une position d'équilibre fixe, en s'enfonçant d'une certaine quantité, variable

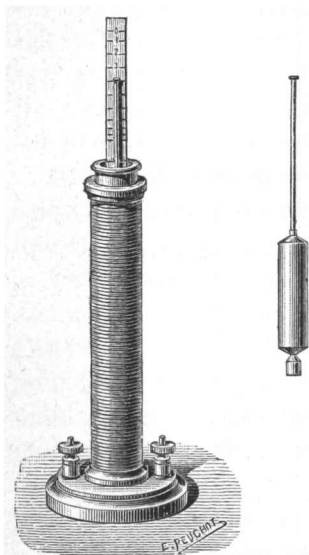


Fig. 192. — Aréomètre électrique de M. de Lalande.

avec chaque intensité du courant qui traverse la bobine, mais constante pour une même intensité. La partie supérieure de la tige de l'aéromètre est plane et constitue l'index qui se déplace le long d'une échelle verticale graduée expérimentalement. Une particularité importante est le guidage de la tige de l'aéromètre qui traverse un œil métallique à l'intérieur du liquide. Cette disposition supprime les frottements contre les parois de l'éprouvette et n'altère en rien la sensibilité de l'aéromètre.

En faisant varier les dimensions de la bobine et celles du faisceau de fils de fer doux ou de la tige de l'aéromètre, on peut, pour une intensité donnée, obtenir une course aussi grande qu'on peut le désirer.

Dans une autre disposition d'indicateur de courant (fig. 193) ou de potentiel (fig. 194) employés par l'*Electrical Power Storage*, de Londres, on produit l'arrachement de l'armature d'un électro-aimant à l'aide d'un poids glissant suspendu au fléau d'une véritable romaine. L'appareil donne des résultats très comparables, l'hystérésis jouant toujours le même rôle, à la condition que l'armature ait été arrachée au moment de faire la lecture, mais il présente l'inconvénient de demander un ajustement pour chaque détermination, et de ne pas constituer ainsi un appareil à lecture directe.

Nous pourrions multiplier indéfiniment les exemples. Ceux que nous avons signalés suffisent pour montrer la multiplicité des solutions auxquelles on peut avoir recours pour supprimer

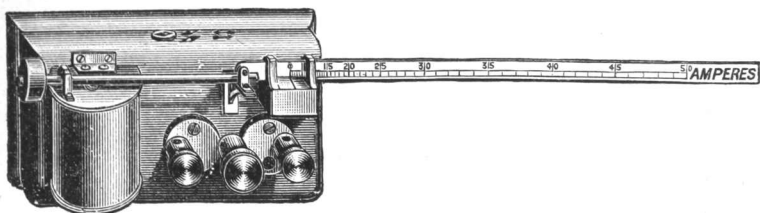


Fig. 193. — Indicateur de courant de l'E. P. S.

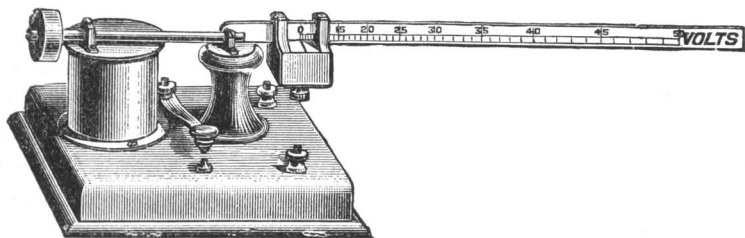


Fig. 194. — Indicateur de potentiel de l'E. P. S.

l'emploi des aimants permanents dans des appareils dont la principale qualité est de rester bien comparable à eux-mêmes.

Dans la plupart de ces instruments, l'hystérésis joue un rôle qui, loin d'être négligeable, réduit considérablement leur valeur comme *appareils de mesure* et interdit de leur donner d'autre nom que celui d'*indicateurs*.

CHAPITRE XIII

INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

408. Définitions. — La découverte des courants d'induction est due à *Faraday*. Il obtint le premier, en 1831, des courants induits par le déplacement relatif d'un aimant et d'un circuit, ainsi que par les variations de l'intensité d'un courant traversant un circuit voisin.

Faraday donna aux courants ainsi obtenus le nom de *courants d'induction*.

Les parties essentielles, nécessaires et suffisantes pour la production des courants d'induction sont au nombre de deux.

1° Un système produisant un champ magnétique ou galvanique *inducteur*.

2° Un circuit dans lequel se développe le courant d'induction et qui constitue le *circuit induit* ou, par abréviation, *l'induit*.

Les phénomènes d'induction sont aujourd'hui extrêmement nombreux et variés, mais ils obéissent tous, malgré leur variété, à une loi générale que nous allons formuler.

409. Loi générale de l'induction. — *Toute variation du flux de force embrassé par un circuit fermé donne naissance à un courant d'induction dont la durée est égale à celle de la variation du flux.*

Le mode de variation du flux et son origine ont donné au début naissance à une classification compliquée des phénomènes d'induction. Ils se réduisent aujourd'hui à trois principaux auxquels on peut toujours ramener la combinaison la plus complexe. Chacun de ces phénomènes principaux com-

prend d'ailleurs un certain nombre de groupes de l'ancienne classification.

410. Classification des phénomènes d'induction.

— Les trois phénomènes principaux donnant naissance à des forces électromotrices et à des courants d'induction sont :

- a. *L'induction électromagnétique ;*
- b. *La self-induction ou auto-induction ;*
- c. *L'induction mutuelle.*

a. INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE ⁽¹⁾. — Dans les phénomènes d'induction magnétique, le courant induit est produit par le déplacement relatif du circuit induit et d'un champ magnétique ou galvanique. L'énergie mise en jeu dans le circuit induit et qui s'y dépense sous forme de chaleur est empruntée au travail mécanique effectué pour produire le déplacement. Les appareils d'induction électromagnétique sont donc, à proprement parler, des *générateurs mécaniques d'énergie électrique*, transformant *directement* l'énergie mécanique en énergie électrique. Les cas les plus connus sont les suivants :

Courants magnéto-électriques. — Produits par le déplacement mécanique relatif d'un aimant et d'un courant dans l'expérience classique de Faraday.

Courants telluro-électriques. — En faisant tourner un circuit dans le champ magnétique terrestre, on obtient un courant induit. C'est l'expérience classique du cercle de Delezenne.

Courants dynamo-électriques. — Le champ inducteur est produit par un électro-aimant. Nous y reviendrons en détail en décrivant les machines dans le volume consacré aux applications.

Courants de Foucault. — Le circuit induit est constitué par des masses métalliques, et les courants induits se développent dans ces masses.

On obtient encore des courants d'induction électromagnétique en faisant varier la résistance magnétique d'un circuit magnétique embrassé par une bobine induite (machine de Page, coup de poing de Breguet), ou bien en déformant un circuit

(1) L'expression courante employée pour désigner ce phénomène est *induction magnétique*. Nous avons cru devoir la changer afin d'éviter toute confusion avec le facteur B qui porte aussi le nom d'*induction magnétique*.

placé dans un champ magnétique pour faire varier sa surface et, par suite, le flux qui le traverse, etc.

b. SELF-INDUCTION. — Lorsqu'on fait varier l'intensité du courant traversant un circuit qui crée un champ galvanique, un solénoïde galvanique par exemple, on obtient dans le même circuit, se superposant aux premiers, des courants qui s'opposent à ces variations. Ce sont les *extra-courants* de rupture et de fermeture sur lesquels nous reviendrons dans le chapitre suivant (439). L'énergie mise en jeu est empruntée au courant lui-même.

c. INDUCTION MUTUELLE. — Lorsque deux circuits sont en présence de telle façon que si l'un d'eux est traversé par un courant, il produise un flux de force traversant l'autre entièrement ou en partie, les variations d'intensité du courant dans le premier produisent des courants d'induction dans le second, et réciproquement.

Ces courants d'induction mutuelle ont été appelés quelquefois *courants faradiques*, ou *volta-électriques* lorsque la source électrique est une pile dont on ferme périodiquement le circuit sur l'inducteur; *leyde-électriques*, lorsque le courant variable dans l'inducteur est produit par la décharge d'un condensateur ou d'une bouteille de Leyde; *courants de Foucault*, lorsque le système induit est formé de masses métalliques, etc.

Comme dans les phénomènes de self-induction, l'énergie est empruntée au courant inducteur.

Dans la plupart des systèmes construits pour démontrer les phénomènes d'induction les effets se superposent, et l'on n'observe plus que leur *résultante*. C'est pour cela que nous ne faisons qu'indiquer par leur nom les principaux appareils classiques employés pour la démonstration expérimentale des phénomènes de l'induction. Leur étude serait mieux à sa place après l'examen des phénomènes généraux considérés isolément : mais lorsque l'étude théorique sera faite, il sera plus avantageux d'appliquer les lois établies à quelques problèmes importants de la pratique; nous nous trouverons ainsi conduit à laisser de côté les appareils classiques de démonstration dont l'importance n'est que secondaire.

Dans tous les cas, les expériences établissent quelques faits généraux qui nous serviront à formuler les lois déterminant le *sens* et la *grandeur* des courants induits dans chaque cas particulier.

411. Faits généraux d'expérience. — 1° Deux variations de flux de force égale et de signes contraires produisent toujours des quantités d'électricité égales et de signes contraires. On le démontre en reliant une bobine à un galvanomètre balistique, en approchant rapidement un aimant, observant l'élongation et ramenant ensuite l'aimant à sa position initiale. Les deux élongations sont égales et de signes contraires.

2° La durée du courant induit est égale à la durée de la variation du flux inducteur.

3° La quantité d'électricité traversant le circuit pour une variation de flux donnée est indépendante de la durée et de la loi de la variation. On le démontre comme dans l'expérience n° 1 en déplaçant l'aimant de la même quantité à des distances différentes. Les élongations restent les mêmes.

4° Tout déplacement ou toute déformation du circuit induit qui ne modifie pas la valeur du flux qui le traverse ne produit pas de courants induits. Un circuit déplacé parallèlement à lui-même dans un champ magnétique uniforme n'est le siège d'aucun courant.

412. Sens des courants induits. Loi de Lenz. — En 1834, Lenz a réuni tous les cas particuliers d'induction dans une loi qui porte son nom et qui permet de prévoir le sens du courant induit par une variation de flux donnée.

Loi de Lenz. — *Pour toute variation du flux de force embrassé par un circuit, le courant induit est de sens tel qu'il tende à s'opposer au mouvement.*

Si nous rapprochons cette loi de la règle de Maxwell indiquant que lorsque deux flux sont en présence des systèmes qui les produisent, le mouvement des systèmes est tel qu'il tend à rendre le flux maximum. Il en résulte que si, par exemple, le déplacement relatif d'un champ est tel que le flux augmente, il aura dû se produire, pendant le déplacement, un courant s'opposant au mouvement, c'est-à-dire *de sens inverse* à celui produisant le flux. C'est le courant *inverse*.

Si, au contraire, le flux tend à diminuer, d'après la loi de Lenz, le courant induit devra s'opposer au mouvement, c'est-à-dire être *de même sens* que celui produisant le flux. C'est le courant *direct*.

Modification à la loi de Lenz. On peut donc relier la loi de Lenz à la règle de Maxwell en l'exprimant sous la forme suivante :

Le sens du courant induit dans un circuit par une variation de flux donnée est tel qu'il s'oppose à chaque instant à la variation.

Il suffit donc, pour déterminer le sens de ce courant, de connaître le sens du courant qui produit le flux à l'instant considéré, ce qui est facile par l'application de la règle d'Ampère.

Si le flux *augmente*, le courant induit s'oppose à l'augmentation, il sera donc *inverse* de celui qui produit le flux ; si le flux *diminue*, le courant induit s'opposera à la diminution, il sera donc *direct*, c'est-à-dire *de même sens* que celui qui produit le flux.

Changement de sens du courant. — Il résulte, comme conséquence de ce fait, que le courant induit ne change de signe que lorsque la variation change de signe. Tant que le flux de force augmente, le courant induit est de sens contraire à celui qui produirait le flux ; tant que le flux de force diminue, le courant induit reste de même sens que celui qui produirait le flux.

Le changement de sens du courant se produit au moment où le flux de force passe par un maximum ou un minimum. Cette remarque nous sera fort utile pour établir la théorie des machines dynamo-électriques.

413. Calcul de la force électromotrice d'induction.

— Considérons le cas le plus simple, celui d'un conducteur rectiligne se mouvant dans un champ uniforme, parallèlement à lui-même. Ce conducteur rectiligne OB (fig. 195) de longueur l se déplaçant d'une vitesse uniforme aura parcouru, après un temps t , un chemin $OA' = a$.

α est l'angle du conducteur avec la direction OX de la ligne de force du champ uniforme d'intensité H.

$$v = \frac{a}{t};$$

on démontre (414) que la force électromotrice développée dans le conducteur considéré a pour valeur

$$E = Hlv \sin \alpha \cos \varphi.$$

Cette formule fondamentale a été établie par *Helmholtz* et *sir W. Thomson*, en partant du principe de la conservation de l'énergie.

Si le conducteur est perpendiculaire à la direction des lignes de force OX , c'est-à-dire dirigé suivant OZ , et qu'il se déplace dans la direction OY , on a

$$\begin{aligned} \alpha &= 90^\circ; & \sin \alpha &= 1; \\ \varphi &= 0; & \cos \varphi &= 1 \end{aligned}$$

d'où

$$E = Hlv.$$

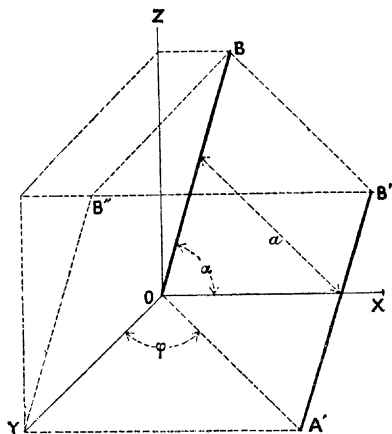


Fig. 195.

La force électromotrice d'induction est proportionnelle à l'intensité du champ, à la longueur du conducteur et à sa vitesse.

414. Démonstration de la formule fondamentale de l'induction magnétique. — Considérons un circuit de résistance R traversé par un courant d'intensité I . La différence de potentiel entre ses extrémités est e . L'énergie dépensée dans ce circuit, *sous forme de chaleur*, pendant un temps dt a pour valeur

$$eIdt.$$

Et l'on a identiquement

$$eIdt = RI^2dt.$$

Plaçons ce conducteur dans un champ magnétique d'intensité H ; chaque élément dl de ce conducteur est soumis à une force élémentaire df normale au plan passant par l'élément et parallèlement au champ. En appelant α l'angle du conducteur avec la direction des lignes de force

$$df = HI dl \sin \alpha,$$

et pour un conducteur rectiligne de longueur l , la force f a pour valeur

$$f = HI l \sin \alpha.$$

Si le conducteur se déplace parallèlement à lui-même sous l'action de cette force, il produit un travail. On peut réaliser matériellement ce déplacement en faisant appuyer ce conducteur, par exemple, sur deux barres parallèles qui lui amènent le courant I . Ce travail W a pour valeur, en appelant a le chemin parcouru pendant le temps t :

$$W = HIla \sin \alpha;$$

et si le chemin parcouru fait un angle φ avec la direction de la force f :

$$W = HIla \sin \alpha \cos \varphi.$$

Ce travail est nécessairement emprunté à l'énergie électrique dépensée dans le circuit pendant le temps t .

Comme R est invariable, il faut que I prenne une nouvelle valeur pendant le déplacement. Soit I' cette nouvelle valeur : $I' < I$. L'énergie fournie par la source n'est plus que $eI't$; elle est égale à la chaleur développée, plus le travail dépensé pour effectuer le déplacement du conducteur, on a :

$$eI't = RI'^2t + HI'la \sin \alpha \cos \varphi.$$

En divisant par $I't$,

$$e = RI' + Hl \frac{a}{t} \sin \alpha \cos \varphi;$$

d'où

$$I' = \frac{e - Hl \frac{a}{t} \sin \alpha \cos \varphi}{R}.$$

Il s'est donc produit une force contre-électromotrice de sens opposé à celle de la source.

Cette force électromotrice a pour valeur, en appelant v la vitesse de déplacement du conducteur

$$E = Hlv \sin \alpha \cos \varphi.$$

C'est la *force électromotrice d'induction*. Cette force électromotrice d'induction est, on le voit, indépendante de e . Elle résulte du déplacement du conducteur dans le champ, et subsiste même pour $e=0$. Mais pour que le déplacement se produise, il faut alors dépenser un travail mécanique extérieur, appelé *travail d'induction*, et qui se retrouve dans le circuit sous forme de chaleur. Cette formule peut s'appliquer à un circuit infiniment petit et, par suite, à un circuit quelconque.

415. Travail d'induction. — Lorsque la force électromotrice d'induction E produit un courant dans un circuit de résistance R , on a identiquement, pour valeur de ce travail d'induction

$$W = EIt = RI^2t = \frac{E^2}{R}t$$

ou

$$W = \frac{H^2 l^2 v^2 t \sin^2 \alpha \cos^2 \varphi}{R}$$

et la puissance électrique correspondante

$$P = \frac{W}{t} = \frac{H^2 l^2 v^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \varphi}{R}.$$

La force électromotrice d'induction est aussi indépendante de la résistance du circuit. Elle se développe donc même à circuit ouvert et serait mise en évidence en reliant les extrémités du conducteur mobile en communication avec un électromètre idiostatique (227). Dans le cas particulier où la résistance du circuit induit est infinie, le travail d'induction est nul ainsi que la puissance électrique correspondante.

416. Quantité d'électricité induite. — Considérons le cas d'un circuit formé par un conducteur rectiligne se déplaçant parallèlement à lui-même et s'appuyant sur deux rails, la résistance restant invariable. Le conducteur étant perpendiculaire à la direction des lignes de force, l'intensité du courant est, en appliquant la loi d'Ohm,

$$I = \frac{Hlv}{R},$$

et la quantité induite pendant le temps t :

$$Q = It = \frac{Hlv t}{R}.$$

En appelant a le chemin parcouru pendant le temps t ,

$$v = \frac{a}{t}; \quad Q = \frac{Hla}{R}.$$

Mais la est la surface S décrite par le conducteur pendant le déplacement. D'où

$$Q = \frac{HS}{R} = \frac{\Phi}{R}.$$

La quantité d'électricité induite est égale à la variation du flux de force Φ divisée par la résistance R du circuit.

Force électromotrice d'induction et intensité du courant induit.

En appliquant la loi d'Ohm, on a

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{HS}{Rt}; \quad E = RI = \frac{HS}{t}.$$

417. Formules élémentaires. — Lorsque l'on considère des déplacements et des variations de très courte durée, les lois fondamentales de l'induction magnétique rapportées aux variations élémentaires du flux de force embrassé par le circuit induit prennent les formes suivantes :

$$\text{Quantité d'électricité induite : } dQ = \frac{d\Phi}{R}.$$

$$\text{Intensité du courant induit : } I_t = \frac{d\Phi}{R dt}.$$

$$\text{Force électromotrice induite : } E_t = \frac{d\Phi}{dt}.$$

418. Direction du courant induit dans un conducteur rectiligne. — Couchons un observateur dans le sens des lignes de force du champ (fig. 196) et regardant dans la direction du déplacement. Le courant induit pendant le déplacement va de sa gauche à sa droite. Si le circuit n'est pas fermé, le potentiel le plus élevé sera à la gauche de l'observateur.

Règle des doigts de M. J.-A. Fleming. — Prenons les trois premiers doigts de la main droite, le pouce dirigé dans le sens

du mouvement, l'index dans le sens des lignes de force du champ et le médius dans le sens du conducteur. Le courant induit par le déplacement ira dans le sens indiqué par le médius, de sa racine à son extrémité.

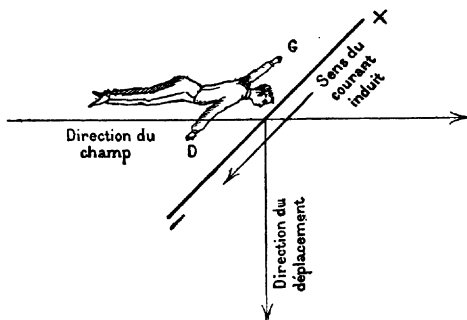


Fig. 196.

Le moyen le plus simple, à notre avis, pour déterminer le sens du courant induit dans un conducteur rectiligne, consiste à fermer le circuit sur

ce conducteur par un fil placé dans une position quelconque, et à étudier les variations du flux dans le circuit ainsi fermé.

419. Définition de l'unité C.G.S. de force électromotrice par l'induction. — Lorsqu'un conducteur se déplace parallèlement à lui-même dans un champ uniforme d'intensité H et perpendiculairement à la direction des lignes de force du champ, on a

$$E = Hlv.$$

Si on fait $H = 1$; $l = 1$; $v = 1$, on a $E = 1$.

L'unité C.G.S. de force électromotrice est la force électromotrice développée dans une barre métallique droite de 1 unité de longueur (1 centimètre) se mouvant dans un champ magnétique de 1 unité C.G.S. d'intensité avec une vitesse égale à l'unité (1 centimètre par seconde) normalement à la direction des lignes de force et à sa propre direction.

Les formules que nous venons d'établir permettent de résoudre tous les problèmes dans lesquels intervient l'induction magnétique seule. Nous en ferons l'application à un certain nombre de cas présentant un intérêt scientifique, réservant les applications purement industrielles.

420. Courants induits dans des masses métalliques. — **Courants de Foucault.** — Nous n'avons étudié jusqu'ici que les courants induits dans des conducteurs par le déplace-

ment relatif d'un champ magnétique : des courants induits se développent également dans des *masses métalliques*. Ces courants ont pour effet de s'opposer au déplacement et de transformer l'énergie ainsi dépensée en chaleur développée dans les masses métalliques. Le fait avait été observé dès 1824 par *Gambey* : une aiguille aimantée placée au-dessus d'un disque de cuivre amortissait ses oscillations plus vite que lorsqu'elle était suspendue loin du disque. Arago chercha la cause de cet amortissement dans une forme particulière de magnétisme qu'il appela *magnétisme de rotation*.

On sait parfaitement aujourd'hui que cet effet est dû aux courants induits dans le disque.

Foucault a imaginé un appareil qui prouve l'existence de ces courants d'une manière saisissante. Un disque de cuivre rouge (fig. 197) placé entre

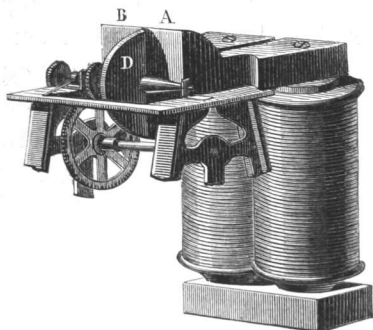


Fig. 197. — Appareil de Foucault.

les branches d'un électro-aimant reçoit un mouvement de rotation rapide à l'aide d'un système d'engrenages et d'une manivelle. Tant que l'électro-aimant n'est pas excité, la puissance mécanique nécessaire pour mettre le disque en mouvement est très faible et correspond seulement aux résistances passives.

En excitant l'électro, on sent aussitôt une résistance mécanique considérable ; si l'on continue à tourner, l'excès d'énergie mécanique produite se transforme en chaleur dans le disque, et celui-ci atteint bientôt une température élevée.

On peut répéter l'expérience plus simplement en prenant un cube de cuivre massif suspendu entre les deux pôles d'un électro-aimant (fig. 198) par un fil auquel on imprime une torsion. Le cube tourne rapidement et s'arrête presque instantanément dès que l'électro est excité.

Ces courants ainsi développés dans les masses métalliques sont généralement désignés aujourd'hui sous le nom de *courants de Foucault*.

La direction et l'intensité des courants de Foucault sont très variables à chaque instant avec la forme du système induit, sa vitesse de déplacement, sa résistance propre, etc., on ne saurait donc calculer ces courants, mais on sait comment, dans chaque cas particulier, leur donner la plus grande valeur possible ou, au contraire, réduire leurs effets à un minimum.

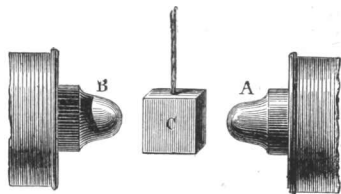


Fig. 198. — Démonstration des courants de Foucault.

Pour comprendre comment se développent ces courants et comment on peut les éviter, considérons un cas simple, le disque de Foucault se mouvant entre les deux pôles de l'électro-aimant.

Ce disque étant plein peut être, par la pensée, décomposé en une série de circuits juxtaposés et fermés sur eux-mêmes. Si l'on considère un de ces circuits au voisinage des pôles et s'en approchant, le flux de force tendant à augmenter, il s'y développera une force électromotrice qui donnera naissance à un courant intense, à cause de la faible résistance du

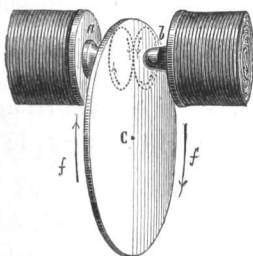


Fig. 199.

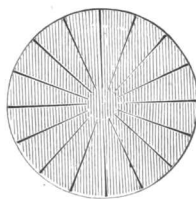


Fig. 200.

circuit. Il en sera de même pour le circuit fermé qui s'éloigne et dont le flux de force diminue.

Lemoyen d'atténuer ces courants consiste à augmenter la résistance électrique du circuit dans lequel ils tendent à se développer.

Ce résultat est obtenu, dans chaque cas, en sectionnant la masse dans une direction telle que les circuits ne puissent se fermer métalliquement, c'est-à-dire en la sectionnant dans une direction perpendiculaire à la direction du mouvement et pa-

rallèle à celle du champ. C'est ainsi, par exemple, qu'un disque plein (fig. 199) qui est le siège de courants énergiques devient presque inactif lorsqu'on rompt la continuité du circuit par des sections rayonnantes (fig. 200).

Toutes choses égales d'ailleurs, l'énergie dépensée en courants de Foucault est d'autant plus grande que la résistance spécifique de la masse métallique considérée est plus petite. Nous en verrons une application à propos de l'amortissement des appareils de mesure (427). Le sectionnement des masses pour éviter ces actions sera étudié avec les applications industrielles, à propos des dynamos et des transformateurs.

APPLICATIONS DES LOIS DE L'INDUCTION MAGNÉTIQUE.

421. Courant induit dans un circuit animé d'une vitesse angulaire uniforme. — Considérons un circuit circulaire de surface S tournant autour d'un de ses diamètres perpendiculaire à la direction des lignes de force d'un champ uniforme d'intensité H .

Le flux qui traverse le circuit à l'instant initial est HS , si on compte l'instant initial à partir du moment où le plan du circuit circulaire est perpendiculaire à la direction des lignes de force. Il devient nul après une rotation de 90° pour devenir maximum et de sens contraire à 180° , et ainsi de suite.

Supposons ce cadre animé d'une vitesse angulaire uniforme. Lorsqu'il a tourné d'un angle α , au bout du temps t , le flux qui le traverse a pour valeur

$$\Phi_t = \Phi \cos \alpha.$$

La quantité d'électricité dQ induite pendant un temps dt est, en appelant R la résistance du circuit,

$$dQ = \frac{d(\Phi \cos \alpha)}{R}.$$

L'intensité correspondante

$$I_t = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(\Phi \cos \alpha)}{R dt},$$

et la force électromotrice

$$E_t = RI_t = \frac{d(\Phi \cos \alpha)}{dt}. \quad (1)$$

En appelant T le temps mis par le cadre à faire un tour complet, on a

$$\alpha = \frac{2\pi t}{T}; \quad \Phi_t = \Phi \cos 2\pi \frac{t}{T}.$$

En portant dans (1) et différenciant

$$E_t = \frac{2\pi\Phi}{T} \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

La force électromotrice est représentée par une *sinusoïde*.

Lorsque le cadre a tourné de 90° ou de $\frac{\pi}{2}$ radians, le terme $\sin 2\pi \frac{t}{T}$ devient égal à 1, et la force électromotrice maxima. En posant

$$E_{\max} = \frac{2\pi\Phi}{T}; \quad \frac{2\pi}{T} = \omega,$$

la formule devient

$$E_t = E_{\max} \sin 2\pi \frac{t}{T} = E_{\max} \sin \omega t.$$

Un générateur électrique dont la force électromotrice suit cette loi a déjà été étudié à propos des générateurs périodiques (267). Nous compléterons ce que nous en avons dit alors dans le chapitre consacré aux *courants alternatifs*.

422. Détermination de l'unité de résistance. — Nous avons admis jusqu'ici que les étalons de résistance étaient exacts, sans nous préoccuper de la façon dont ils avaient été établis. Nous pouvons à présent aborder la question et indiquer les *principes* des méthodes sur lesquelles les déterminations des étalons sont fondées.

Le plus grand nombre d'entre elles utilisent les phénomènes d'induction.

Elles consistent à déterminer, par des expériences que nous allons indiquer, la résistance en unités C.G.S. et, par suite, en ohms, d'un conducteur donné, et à se servir ensuite de cette résistance connue pour établir, par comparaison à l'aide du

pont de Wheatstone, des étalons représentant l'ohm ou ses multiples entiers.

Chaque expérimentateur a résumé le résultat de ses recherches et l'a exprimé en fonction de la longueur en centimètres de la colonne de mercure de 1 mm^2 de section qui, à la température de la glace fondante, devrait avoir une résistance précisément égale à 10^9 unités C.G.S. de résistance.

Jusqu'en 1884, on a adopté pour valeur de l'ohm la résistance d'une colonne de mercure de 104,83 cm de longueur, valeur déterminée en 1865 par l'*Association britannique*.

En 1884, le comité international nommé par le *Congrès international des électriciens* de 1881 a défini l'*ohm légal* comme égal à la résistance d'une colonne de mercure de 106 cm de longueur, valeur moyenne des résultats trouvés par les différents expérimentateurs, le chiffre des millièmes étant réservé.

Des expériences postérieures à 1884 semblent établir que l'ohm serait plus voisin de la résistance d'une colonne de mercure de 106,2 à 106,3 cm de longueur.

Si un *Congrès* ultérieur adopte l'une de ces valeurs, il sera bon de donner un nom spécial au nouvel ohm ainsi défini, afin d'éviter toute confusion avec l'*ohm B. A.* et l'*ohm légal*, auquel il devra se substituer progressivement.

Nous indiquerons quelques-unes des principales méthodes qui ont servi aux déterminations de l'unité de résistance.

DÉTERMINATION DE L'UNITÉ DE RÉSISTANCE.

423. Première méthode de Weber (1851). — Un cadre vertical de N tours de surface S tourne autour de son diamètre vertical. On le place dans un plan vertical perpendiculaire au méridien magnétique, on le relie à un balistique et on lui imprime une rotation de 180° . La quantité d'électricité induite a pour valeur, en appelant R la résistance totale du circuit (**416**)

$$Q = \frac{2NHS}{R}. \quad (1)$$

Cette quantité d'électricité Q traversant le balistique donne une élévation ε telle que (**279**)

$$Q = \frac{T}{\pi} I \frac{\sin \frac{\varepsilon}{2}}{\operatorname{tang} \alpha}, \quad (2)$$

T étant la durée d'une oscillation double ou la période, I l'intensité du courant produisant la déviation α . On a, en égalant (1)

$$\frac{2NHS}{R} = \frac{T}{\pi} I \frac{\sin \frac{\varepsilon}{2}}{\operatorname{tang} \alpha},$$

et (2), équation dans laquelle tous les éléments peuvent se mesurer ou se calculer. On en déduit directement la résistance du circuit formé par le galvanomètre, le cadre tournant et les fils de liaison.

Cette méthode exige la détermination du facteur H. MM. *Mascart, de Nerville et Benoît* (1883) ont évité la cause d'incertitude qu'entraîne cette détermination en se servant du cadre induit lui-même comme d'un galvanomètre absolu, en faisant traverser le même courant au cadre et au galvanomètre. Les déviations ainsi produites introduisent une nouvelle relation qui permet d'éliminer H.

424. Courant produit par la rotation d'un cadre à axe vertical. — On relie un cadre tournant à une vitesse angulaire uniforme à un galvanomètre. Soit N le nombre de spires de surface S du cadre tournant. La quantité d'électricité induite pendant un demi-tour est

$$Q = \frac{2NHS}{R};$$

au demi-tour suivant elle est égale et de signe contraire. En redressant le courant par un commutateur, on aura pour la quantité induite par tour

$$Q_t = \frac{4NHS}{R},$$

et si le cadre fait n tours en t secondes, la quantité induite pendant ce temps t sera

$$Q_t = \frac{4nNHS}{R}.$$

Ce courant peut produire l'effet d'un courant continu dont l'intensité serait

$$I = \frac{1}{t} \cdot \frac{4nNHS}{R}. \quad (1)$$

Si ce courant traverse un galvanomètre des tangentes, il produit une déviation α telle que

$$I = \frac{Hr^2}{L} \tan \alpha. \quad (2)$$

L étant la longueur totale du fil et r le rayon du cadre. On a, en égalant (1) et (2),

$$R = \frac{4nNLS}{tr^2 \tan \alpha}.$$

En pratique, la méthode n'est pas très exacte à cause de la résistance variable des frotteurs.

425. Méthode de M. Lippmann (1884). — L'étalon dont

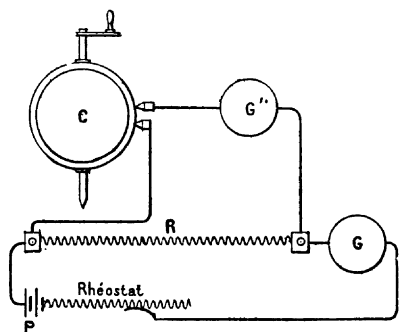
on veut connaître la résistance R est intercalé dans le circuit d'une pile constante P (fig. 201). Il est traversé par un courant d'intensité I et la différence de potentiel aux bornes est

$$e = RI.$$

On détermine I par un galvanomètre des tangentes G intercalé dans le circuit, e par une méthode d'oppo-

Fig. 201. — Méthode de M. Lippmann pour la détermination de l'ohm.

sition. A cet effet, on dispose dans une salle voisine un cadre vertical C mobile autour d'un axe vertical, et auquel on imprime une vitesse angulaire constante. Ce cadre porte un fil de cuivre dont le circuit reste toujours ouvert; aucun courant n'y prend donc naissance; seulement le magnétisme terrestre y fait naître une force électromotrice d'induction qui atteint une valeur maxima e au moment où le plan du cadre coïncide avec le plan du méridien magnétique. A ce moment, les extrémités



du fil induit mobile sont mises en communication pendant un temps très court avec les extrémités de l'étalon R, on a soin que la force électromotrice d'induction e soit de sens contraire à la différence de potentiel RI qui a lieu aux extrémités de R; si l'intensité I est telle que la différence de potentiel RI soit égale à e , aucun courant ne se produit dans le circuit G'. En observant un galvanoscope G' placé sur le trajet d'un de ces fils, on s'assure qu'il ne dévie pas et que, par conséquent, l'égalité $e = RI$ est satisfaite. On emploie comme galvanoscope un galvanomètre astatique de Sir W. Thomson. La marche des expériences est donc la suivante : un premier observateur s'occupe de rendre la vitesse de rotation ω constante et de l'enregistrer; un deuxième observateur fait varier l'intensité I d'une manière continue au moyen d'un rhéostat, jusqu'à ce que le galvanoscope se maintienne au zéro. Enfin, une troisième personne note la déviation α du galvanomètre des tangentes.

Appelons S la surface totale du cadre tournant portant N spires de rayon r , k la constante du galvanomètre définie par la relation

$$I = \frac{r}{2\pi N} H \tan \alpha = kH \tan \alpha$$

Le cadre faisant n tours en t secondes, la force électromotrice maxima est

$$E_{\max} = \frac{nHS}{t}.$$

Mais, par expérience, lorsque le galvanoscope est au zéro, on a

$$E_{\max} = e = RI.$$

On en déduit

$$R = \frac{nS}{kt \tan \alpha}$$

valeur indépendante de H.

Afin d'établir à chaque tour la communication entre les extrémités du fil induit C et celles de l'étalon E, on fait aboutir les bouts du fil induit à de petits balais fixés à une extrémité du diamètre horizontal du cadre C, et on termine les fils par deux

contacts fixés dans le plan du méridien magnétique. Aucune précision n'est nécessaire pour cet ajustement.

426. Méthode de Sir W. Thomson. — Cette méthode employée par l'Association britannique en 1864 consiste à faire tourner un cadre circulaire à une vitesse angulaire uniforme dans le champ magnétique terrestre autour de son diamètre vertical. Une petite aiguille aimantée placée au centre de ce cadre est déviée, sous l'influence des courants induits dans le cadre *fermé sur lui-même*, d'un angle qui ne dépend que de la vitesse angulaire du cadre, de ses dimensions et de sa résistance électrique.

Le circuit tournant joue donc à la fois le rôle d'induit et celui de cadre galvanométrique.

Si L est la longueur totale du fil roulé sur le cadre de rayon r ;

ω sa vitesse angulaire en radians par seconde ;

α l'angle de déviation de l'aiguille :

on démontre ⁽¹⁾ que la résistance du cadre en unités C.G.S. a pour valeur

$$R = \frac{L^2 \omega}{2r \operatorname{tang} \alpha}$$

427. Amortissement des appareils de mesure. — Les oscillations des appareils de mesure rendent les opérations longues et fastidieuses. On amortit les oscillations en établissant dans le voisinage immédiat d'une aiguille aimantée oscillante des masses métalliques très conductrices dans lesquelles se développent des courants de Foucault (**420**) aux dépens de la puissance vive du système oscillant, qui se trouve ainsi d'autant plus vite amorti que l'aimantation est plus intense. C'est ce procédé qui est appliqué dans le galvanomètre d'Arsonval-Wiedemann (**204**).

Dans d'autres cas, comme dans le galvanomètre à circuit mobile de Thomson (**207**) et ses dérivés, ou l'électromètre Carpentier (**229**), on constitue un circuit mobile fermé, qui est le siège de courants d'induction magnétique souvent assez intenses pour que le système oscillant devienne aperiodique (**46**).

⁽¹⁾ Voir pour la démonstration : BLAVIER, *Des grandeurs électriques et de leur mesure en unités absolues*, p. 386 (1881).

L'amortissement produit par une bobine formant un circuit fermé sur un aimant oscillant à l'intérieur de cette bobine a été appliqué par *Weber* et d'autres expérimentateurs à la détermination de l'unité de résistance, et par *M. J.-B. Baille* (1884) à la détermination de la composante horizontale du magnétisme terrestre.

428. Shuntage des galvanomètres balistiques. — Si l'on a deux galvanomètres balistiques identiques montés en dérivation, le courant dû à une décharge instantanée produit deux élongations égales; mais si l'on fixe l'une des aiguilles, et que l'on recommence l'expérience, on trouve une élongation beaucoup plus petite pour l'aiguille restée libre ⁽¹⁾. Cela tient à ce que, dans le second cas, un seul des circuits seulement agit comme générateur électromagnétique par le déplacement de l'aiguille, il engendre une force électromotrice qui modifie le partage de la décharge et détruit la symétrie. Il convient donc d'éviter l'emploi des shunts dans les méthodes balistiques, et il est préférable de réduire la sensibilité par d'autres artifices : un condensateur de moins de capacité, une force directrice plus grande, une plus grande résistance dans le circuit s'il s'agit de phénomènes d'induction, etc.

429. Détermination des éléments du magnétisme terrestre. — La méthode de *Gauss* (81) est longue et fastidieuse, aussi n'est-elle que très rarement employée.

Les phénomènes d'induction magnétique permettent d'obtenir très facilement la valeur des composantes horizontale et verticale du magnétisme terrestre ainsi que l'inclinaison.

Composante verticale. — Un cadre renfermant *N* spires de surface *S* est placé horizontalement dans le champ à mesurer *H_v*. On le relie à un galvanomètre balistique préalablement étalonné (279) et on fait tourner le cadre de 180°. Si on appelle *R* la résistance totale du circuit formé par le cadre, le galvanomètre et les fils de liaison, on a évidemment, pour la quantité d'électricité induite *Q*,

$$Q = \frac{2NH_vS}{R},$$

(1) *LATIMER-CLARK, Journal of telegraph engineers, t. II, p. 16 (1873).*

relation d'où l'on déduit la composante verticale H_v (les grandeurs des quantités Q, S et R doivent être exprimées en unités C.G.S.).

Composante horizontale. — La composante horizontale se détermine par une expérience analogue, le cadre étant vertical, son plan perpendiculaire au méridien magnétique. En le faisant tourner de 180° autour de son diamètre vertical, on a de même, pour la composante horizontale H

$$Q = \frac{2NHS}{R}.$$

Inclinaison. Intensité totale. — Les deux composantes horizontale et verticale étant connues, l'inclinaison et l'intensité totale s'en déduisent facilement par des considérations trigonométriques élémentaires.

430. Détermination des propriétés magnétiques des substances magnétiques. — Les phénomènes d'induction magnétique permettent de déterminer facilement les propriétés magnétiques des substances magnétiques soumises à une force magnétisante variable. Nous indiquerons, à titre d'exemple, les dispositions adoptées par M. le D^r J. Hopkinson, et M. J.-A. Ewing.

Méthode de M. le D^r Hopkinson (1). — On forme avec la substance à étudier deux barreaux cylindriques de 12 à 13 mm. de diamètre (fig. 202), ajustés bout à bout, tournés et passant à frottement doux à travers deux trous percés aux extrémités d'un bloc de fer forgé recuit A de grande section transversale, évidé en son milieu pour recevoir les bobines magnétisantes B.

Entre les deux bobines B est un circuit d'exploration D roulé sur une bobine d'ivoire attachée à un fil de caoutchouc qui l'éloigne vivement du champ lorsqu'un des noyaux de fer C est retiré. Cette bobine d'exploration est reliée à un galvanomètre balistique étalonné avec une résistance intercalée dans le circuit pour faire varier les quantités d'électricité induites et obtenir des élongations toujours lisibles.

Une batterie de piles ou d'accumulateurs (fig. 203) envoie un

(1) *Philosophical Transactions of the Royal Society*, part II, 1885, p. 455-469.

courant dans les bobines B, ce courant est réglé par un rhéostat F, coupé, inversé, et mesuré par un galvanomètre L ou toute autre disposition équivalente.

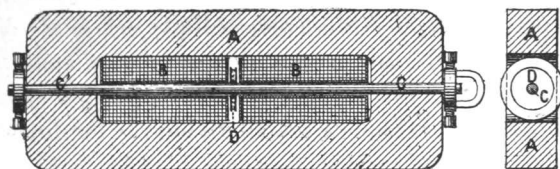


Fig. 202. — Appareil de M. J. Hopkinson pour l'étude des propriétés magnétiques des substances magnétiques.

La pièce à étudier est soumise à des forces magnétisantes, croissantes ou décroissantes, dans un sens ou dans l'autre ; chacune des variations du flux induit produit des quantités

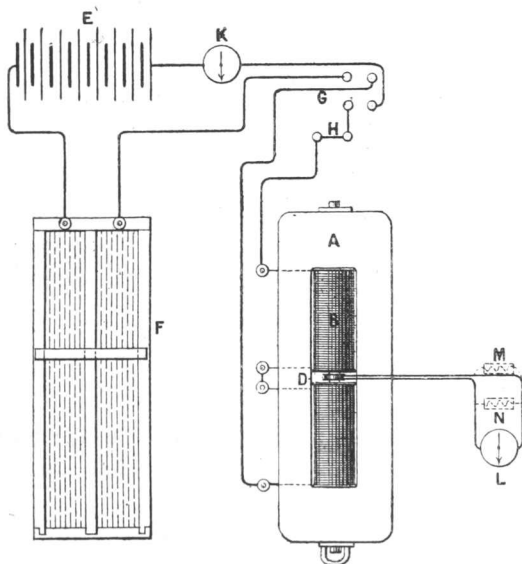


Fig. 203. — Montage de la méthode de M. J. Hopkinson.

d'électricité que l'on mesure au balistique et d'où l'on déduit les valeurs du flux et celle de l'induction correspondante.

On obtient ainsi les valeurs de l'induction *totale*, celle de l'induction temporaire, et, par différence, l'induction rési-

duelle, c'est-à-dire le magnétisme rémanent ou permanent.

Le bloc de fer doux forgé et les deux cylindres $C C'$ constituent un circuit magnétique fermé dans lequel le flux d'induction Φ est constant et pour lequel l'intégrale de l'induction magnétique pour tout le circuit magnétique est égale à la force magnétomotrice. Désignons par des symboles sans indice les facteurs relatifs aux cylindres à étudier et par les symboles affectés de l'indice (') le facteur relatif au bloc de fer doux. Soient :

S, S' les sections ;

L, L' les longueurs des circuits ;

$\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ les inductions magnétiques ;

μ, μ' les perméabilités ;

N le nombre de spires sur les bobines B ;

I l'intensité du courant qui les traverse (en unités C.G.S.) :

on aura évidemment

$$\begin{aligned}\Phi &= \mathcal{B}S = \mathcal{B}'S' \\ \mathcal{B} &= \mu \mathcal{J} \mathcal{C}; \quad \mathcal{B}' = \mu' \mathcal{J} \mathcal{C}' \\ 4\pi NI &= \mathcal{B}L + \mathcal{B}'L' = \Phi \left(\frac{L}{\mu S} + \frac{L'}{\mu' S'} \right).\end{aligned}$$

Les deux termes de cette dernière équation représentent précisément les résistances magnétiques (**390**) des deux parties du circuit magnétique : la résistance du bloc étant très faible relativement à celle des noyaux, on peut la négliger et écrire sensiblement :

$$4\pi NI = \Phi \frac{L}{\mu S}; \quad \mathcal{J} \mathcal{C} = \frac{4\pi NI}{L}.$$

Le flux étant déterminé par le galvanomètre balistique, on en déduit pour les constantes d'aimantation correspondant à chaque valeur de H :

$$\mathcal{B} = \frac{\Phi}{S}; \quad \mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{J} \mathcal{C}}; \quad \mathcal{J} = \frac{\mathcal{B} - \mathcal{J} \mathcal{C}}{4\pi}; \quad z = \frac{\mathcal{J}}{\mathcal{J} \mathcal{C}}.$$

C'est par cette méthode, dont nous nous contentons d'indiquer le principe, que M. le D^r Hopkinson ⁽¹⁾ a déterminé les

⁽¹⁾ Voy. les principaux résultats obtenus par cet expérimentateur dans le *Formulaire pratique de l'Électricien*, par E. HOSPITALIER, 7^e année, 1889.

propriétés magnétiques des substances employées le plus fréquemment en industrie, et tracé les courbes d'hystérésis relatives à ces substances.

Méthode de M. Ewing ⁽¹⁾. — Lorsqu'on veut étudier l'aimantation dans des champs exceptionnellement intenses, on est obligé d'employer un artifice pour créer ce champ. Cet artifice, que M. Ewing appelle la *méthode de l'isthme*, consiste à tourner la pièce de métal à examiner sous forme d'une bobine formée de deux cônes reliés à leur sommet par un cylindre de très petit diamètre. Le flux d'induction est mesuré par une bobine de fil fin portant une seule couche roulée sur le petit noyau cylindrique et reliée à un balistique. En dehors du métal, et à une certaine distance, se trouve une seconde bobine servant à la mesure du champ magnétique entre les deux bobines, par différence de surface des bobines et des quantités d'électricité induites dans les deux circuits.

On peut, ou bien employer la disposition de la figure 204 et mesurer l'induction en faisant tourner la pièce de 180° entre les

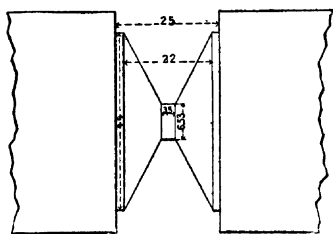


Fig. 204.

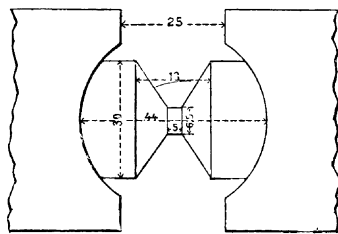


Fig. 205.

branches d'un puissant électro-aimant : l'aimantation résiduelle n'intervient pas, ou bien (fig. 205), employer un noyau cylindrique à bases droites que l'on enlève brusquement d'entre les pièces polaires de l'électro. Le magnétisme résiduel intervient, mais comme il est relativement faible et constant, on peut le déterminer une fois pour toutes afin d'en tenir compte dans les calculs. C'est par cette méthode que M. Ewing a déterminé les

⁽¹⁾ On the magnetisation of iron and other magnetic metals in very strong fields, by J. A. Ewing and William Low. Phil. Trans. of the Royal Society, vol. CLXXX, 1889, p. 221-244.

valeurs de saturation magnétique dont nous avons parlé dans le précédent chapitre.

431. Rotations électrodynamiques. — Nous avons vu (358) que les actions électrodynamiques exercées entre deux circuits ont pour effet de rendre maximum le flux de force embrassé par deux circuits ainsi que l'énergie potentielle. Il n'en est cependant pas toujours ainsi. Dans certains cas, lorsque les deux circuits sont de formes convenablement choisies et que l'un d'eux renferme des parties glissantes ou déformables, on peut obtenir un mouvement continu et réaliser des *rotations électrodynamiques*. Dans ce cas, le système constitue un véritable *moteur électrique* plus ou moins puissant, transformant l'énergie électrique en énergie mécanique, énergie électrique empruntée au courant qui traverse le circuit. On peut prévoir, dans chaque cas, le sens de la rotation du circuit mobile en appliquant les lois de l'induction magnétique : le déplacement du conducteur mobile doit être de sens tel qu'il développe une force électromotrice et, par suite, un courant d'induction de *sens inverse* à celui qui le traverse et en diminue l'intensité.

Considérons par exemple, pour fixer les idées, un courant fixe horizontal et un courant mobile vertical placé au-dessus du premier et dans le même plan. En vertu des actions électrodynamiques (358) si le courant mobile est *ascendant*, il se déplacera dans le même sens que le courant fixe, et en sens contraire s'il est *descendant*.

Le raisonnement s'applique encore lorsque le courant fixe est *circulaire*.

Concevons l'appareil classique d'Ampère (fig. 206) dans lequel le courant fixe est formé par une bobine horizontale, le courant mobile tournant autour d'un axe fixe vertical P par lequel arrive le courant. En *o* est un godet de cuivre renfermant du mercure, et en V un vase de cuivre renfermant de l'eau acidulée et en communication avec le pôle négatif de la source électrique. Le courant suivant les directions indiquées par les flèches dans l'équipage mobile porté en *o* par une pointe et plongeant en *g* et *h* dans l'eau acidulée, la rotation se fait en sens inverse du courant dans la bobine fixe. En rendant le cou-

rant ascendant dans les branches verticales f et e , la rotation se fait dans le sens même du courant traversant la bobine horizontale. Cette rotation est continue, puisque les positions relatives des circuits fixe et mobile restent invariables et que le couple électrodynamique exercé par le conducteur fixe sur le conducteur mobile reste toujours de même sens.

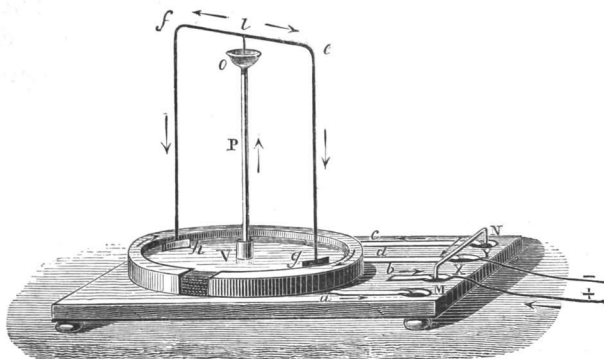


Fig. 206. — Appareil d'Ampère pour la démonstration des rotations électrodynamiques.

La vitesse angulaire de l'équipage mobile s'accélère jusqu'à ce que les résistances passives absorbent une puissance mécanique égale à celle produite par le moteur ainsi constitué; à partir de ce moment, la vitesse angulaire reste uniforme.

432. Rotations électromagnétiques. — Nous avons vu que les actions réciproques des aimants et des courants sont de sens tel que le flux de force résultant devienne maximum et l'énergie potentielle minima.

Dans certains cas, on peut cependant produire des mouvements de rotation continus pour lesquels le flux coupé paraît alors croître indéfiniment, alors que le flux de force traversant le circuit semble nul, ou, du moins, invariable.

Ces rotations, mises en évidence par un certain nombre d'expériences classiques faites à l'aide de la table d'Ampère, constituent les *rotations électromagnétiques* et ne peuvent se produire qu'à la condition que le circuit, ou l'un des circuits, si l'on considère les rotations *électrodynamiques*, soit déformable, contienne des parties liquides, des contacts glissants,

ou puisse être brisé à certains moments pendant le mouvement. Nous examinerons quelques cas particuliers de cette espèce.

Considérons, par exemple, un aimant vertical NS (fig. 207) et un circuit mobile en forme de demi-cercle pouvant tourner

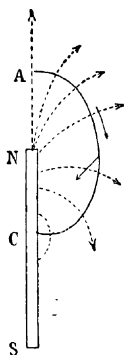


Fig. 207. — Rotation d'un courant.

autour du point A qui lui amène le courant et dont l'autre extrémité plonge dans un godet de mercure fixé en C au milieu de l'aimant NS et qui sert à refermer le circuit sur la source électrique. Dans ces conditions, le circuit prend un mouvement de rotation continu dans le sens indiqué par la flèche, bien que le flux embrassé par le circuit ne paraisse subir aucune variation pendant la rotation.

On peut analyser et expliquer le phénomène en considérant, avec MM. Mascart et Joubert, le feuillet équivalent au courant, et en supposant que la partie mobile de ce feuillet est constituée par une lame élastique indéfiniment inextensible formant en arrière du pôle une surface concave et présentant à ce pôle sa face négative. Cette surface tendra donc à embrasser une plus grande portion du flux, marchera dans le sens indiqué par la flèche et produira alors un mouvement continu, le feuillet élastique pouvant s'enrouler sur lui-même indéfiniment.

La variation totale du flux pour un tour sera égale à $4\pi m$ et le travail de la force magnétique correspondant $4\pi mI$. Le moment du couple exercé sera donc, puisque 1 tour = 2π radians,

$$W = \frac{4\pi mI}{2\pi} = 2mI.$$

Ce couple est donc indépendant de la grandeur et de la forme de l'arc : il ne dépend que de l'intensité du pôle et de l'intensité du courant.

Rotation d'un aimant. — Un barreau aimanté a (fig. 208) lesté par un petit cylindre de platine b est placé verticalement dans une éprouvette en verre remplie de mercure. Au centre du mercure plonge une tige T en communication avec le pôle positif d'une source électrique dont le pôle négatif communique

avec une garniture annulaire K. En fermant le circuit, l'aimant se rapproche de la tige T et prend un mouvement de rotation continu autour de cette tige, mouvement dont le sens change avec celui du courant. Cette expérience est due à Faraday. Am-

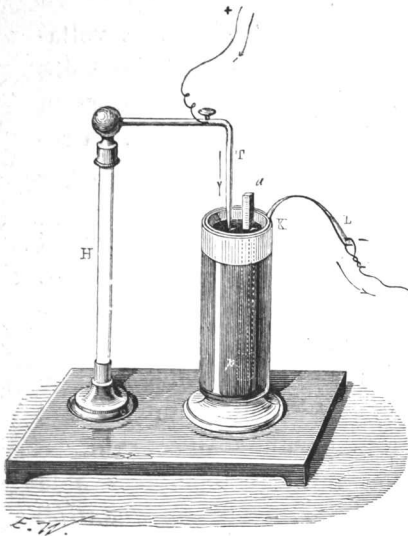


Fig. 208. — Rotation d'un aimant.
Expérience de Faraday.

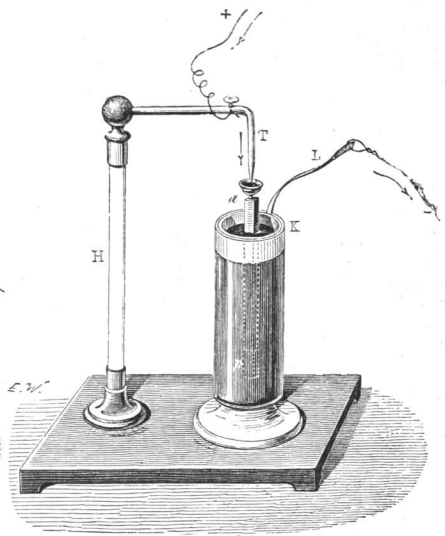


Fig. 209. — Rotation d'un aimant.
Expérience d'Ampère.

père l'a modifiée en la disposant comme le représente la figure 209. Le conducteur T plonge dans une petite capsule métallique contenant du mercure et fixée à la partie supérieure de l'aimant *a*. Celui-ci tourne alors *autour de son axe*.

Le principe général de l'induction magnétique permet d'expliquer très facilement ces rotations. Le mouvement est continu parce que la rotation du système ne modifie pas les positions relatives du courant et de l'aimant.

Conducteurs liquides. — Lorsqu'un courant traverse un liquide, les filets liquides sont assimilables aux circuits mobiles des expériences précédentes, et l'on obtient une rotation du liquide avec le courant qu'il transporte. Le sens de cette rotation peut être déterminé à l'avance par les lois des actions des champs magnétiques sur le courant.

a. Expérience de Davy. — Deux électrodes de platine isolées,

sauf à leurs extrémités, viennent affleurer dans du mercure un peu au-dessous de sa surface. En plaçant au-dessus de l'une d'elles, l'électrode négative, par exemple, le pôle nord d'un aimant, on constate une dépression du mercure et une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre.

b. Expérience de Jamin. — Les deux électrodes d'un voltamètre sont placées dans la même verticale sur la ligne des pôles d'un aimant en fer à cheval. Le liquide se divise alors en deux couches superficielles tournant en sens contraires. La rotation est rendue visible par l'entraînement des bulles gazeuses provenant de la décomposition de l'eau.

c. Expérience de Bertin. — Le liquide à faire tourner est placé entre deux couronnes métalliques servant d'électrodes. On place un aimant dans l'axe. La rotation est rendue visible par des morceaux de liège flottant sur le liquide.

Dans toutes ces expériences, les parties mobiles sont le siège de forces contre-électromotrices, et l'énergie apparaissant sous forme de travail mécanique est empruntée au courant.

Les rotations électromagnétiques ont été appliquées à la construction d'un certain nombre de *compteurs (de quantité) d'électricité* dont nous parlerons à propos des applications industrielles.

433. Induction unipolaire. — Toutes les rotations électromagnétiques, par un effet de *réversibilité*, conséquence directe du principe de la conservation et des transformations de l'énergie, peuvent aussi donner naissance à des courants d'induction et constituer des générateurs électriques. Les phénomènes de cette nature dans lesquels on obtient un courant toujours de même sens constituent l'*induction unipolaire*, nom peu approprié aux phénomènes qu'il embrasse, et qui s'appliquerait de préférence à l'induction produite par un pôle unique. Le disque de Faraday et la roue de Barlow constituent des appareils typiques d'induction unipolaire, c'est-à-dire d'appareils dans lesquels le courant conserve *un sens unique* dans les parties qu'il traverse.

434. Disque de Faraday. — Considérons un disque plan de cuivre (fig. 210) tournant à une vitesse angulaire uniforme ω dans un champ magnétique uniforme, le plan du disque

étant perpendiculaire à la direction des lignes de force. Le bord inférieur du disque plonge dans un godet de mercure ou frotte contre un balai A. On a ainsi entre l'axe et le godet de mercure ou le balai une différence de potentiel égale à la force électromotrice développée par la rotation du disque. En appelant r le rayon de ce disque et H l'intensité du champ, la force électromotrice E a pour valeur

$$E = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\omega r^2}{2} H.$$

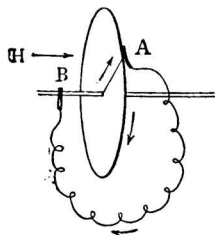


Fig. 210. — Disque de Faraday.

En pratique, le champ dans lequel se meut le disque est produit par un aimant ou un électro-aimant, mais le calcul est alors beaucoup moins simple, parce que le champ n'est plus uniforme.

435. Roue de Barlow. — La roue de Barlow est l'inverse du disque de Faraday. Sa forme est identique (fig. 211), et elle n'en diffère que par le mode d'action; elle transforme l'énergie électrique en énergie mécanique tandis que le disque de Faraday

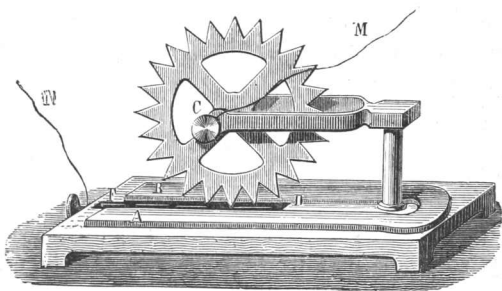


Fig. 211. — Roue de Barlow.

transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Si l'on suppose un champ uniforme d'intensité H perpendiculaire au plan du disque de surface S et une roue de rayon r , le flux de force pour une rotation d'un angle α varie de

$$\frac{Hr^2 \sin \alpha}{2} \quad \text{ou} \quad \frac{Hr^2 \alpha}{2}$$

et le travail correspondant est égal à $\frac{HIr^2 \alpha}{2}$.

Pour un tour, ce travail a pour valeur

$$\frac{HI2\pi r^2}{2} = HIS.$$

Si le disque fait n tours en t secondes, la puissance mécanique P qu'il peut produire est

$$P = \frac{n}{t} \cdot HI \cdot \pi r^2 = EI$$

d'où l'on déduit pour la force électromotrice E

$$E = \frac{n}{t} H\pi r^2 = \frac{\omega Hr^2}{2}$$

en appelant ω la vitesse angulaire en radians par seconde. La vue de Barlow constitue le type du *moteur électrique* théoriquement parfait.

436. Transmission de force motrice. — Puisqu'un disque de Faraday transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, et que la roue de Barlow effectue la transformation inverse de l'énergie électrique en énergie mécanique, il est bien évident qu'en reliant les deux appareils l'un à l'autre et en envoyant le courant produit par le premier dans le second, on pourra effectuer un *transport de force motrice* ⁽¹⁾ dans lequel la transmission s'effectuera par l'intermédiaire des courants d'induction qui traversent le circuit.

On donne le nom de *génératrice* à la machine produisant le courant, et celui de *réceptrice* à la machine qui, recevant le courant, produit la puissance mécanique.

La théorie de ce transport — gros de conséquences industrielles — peut se traiter d'une manière très simple en considérant un générateur et un moteur théoriquement parfaits dans lesquels n'interviennent que les résistances des circuits et les courants d'induction produits par la rotation des deux appareils considérés.

437. Théorie d'une transmission de force motrice parfaite. — Considérons un disque de Faraday tournant à une vitesse constante dans un champ magnétique uniforme et

(1) L'expérience a été réalisée pour la première fois avec deux machines Gramme en 1873 par M. H. Fontaine à l'exposition de Vienne.

relié à une roue de Barlow (435) recevant le courant produit par le disque et tournant sous son influence :

Le disque produit une force électromotrice E_1 et la roue une force contre-électromotrice E_2 . Ces forces électromotrices sont d'ailleurs proportionnelles aux vitesses angulaires ω_1 et ω_2 .

Appelons :

r_1 la résistance intérieure du générateur (disque de Faraday) ;

r_2 — — — — — moteur (roue de Barlow) ;

ρ — — — — — des conducteurs qui les reliait.

$R = r_1 + r_2 + \rho$, la résistance totale du circuit.

L'intensité du courant dans le circuit ainsi constitué a pour valeur

$$I = \frac{E_1 - E_2}{r_1 + r_2 + \rho} = \frac{E_1 - E_2}{R}.$$

La puissance dépensée est évidemment $E_1 I$, la puissance produite est $E_2 I$.

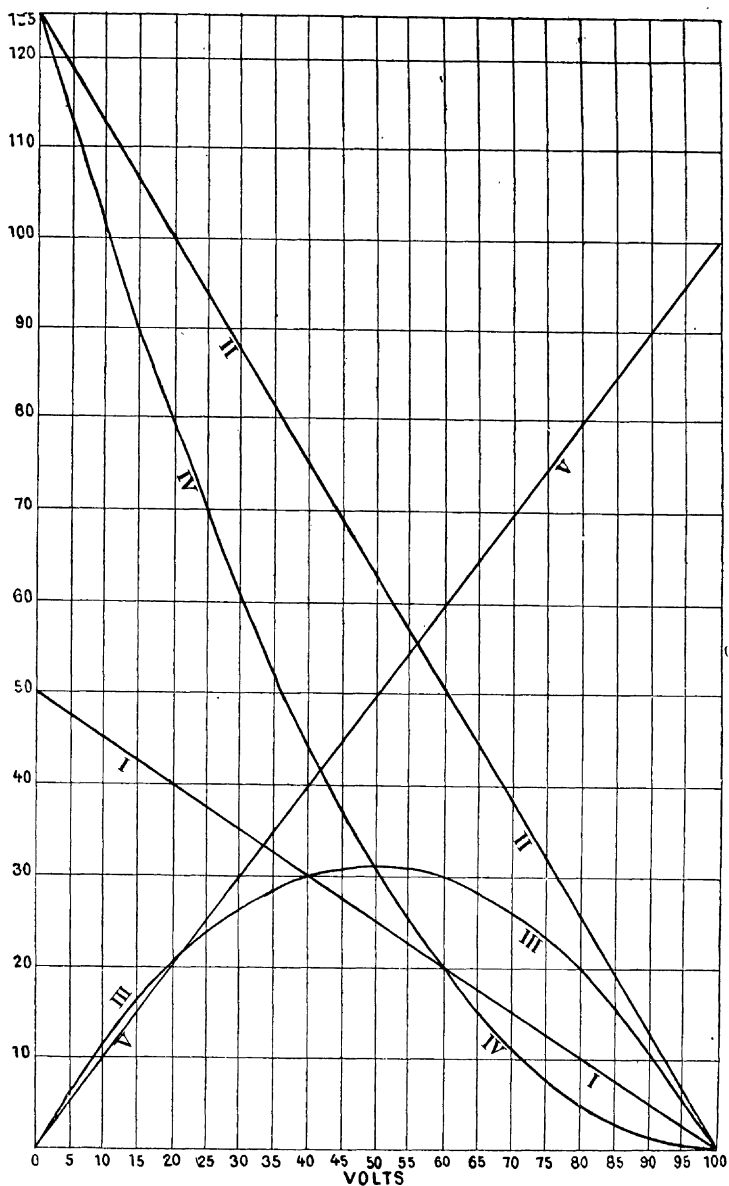
Le rendement η est alors

$$\eta = \frac{E_2}{E_1}.$$

Il est indépendant de la résistance de circuit et ne dépend que du rapport des forces électromotrices E_2 et E_1 . La résistance du conducteur interposé n'influence pas le rendement : elle ne fait que diminuer la puissance du transport.

Si l'on fait tourner le générateur à vitesse angulaire constante et que la vitesse angulaire des moteurs croisse depuis 0 jusqu'à une valeur pour laquelle $E_2 = E_1$, que l'on porte en abscisses les valeurs de E_2 (fig. 212) et en ordonnées les différentes valeurs de I , $E_1 I$, $E_2 I$ et η , on trouve que la puissance utile passe par un maximum correspondant à $E_2 = \frac{E_1}{2}$, à un rendement $\eta = 0,5$,

et à une intensité égale à la moitié de celle qui traverse le circuit pour $\omega_2 = 0$. Le rendement η , nul pour $\omega_2 = 0$, va en augmentant avec ω_2 et devient égal à 1 lorsque ω_2 est tel que $E_2 = E_1$. La puissance utile est alors nulle ainsi que le courant. La différence entre la puissance produite par le générateur $E_1 I$ et la puissance recueillie sur le moteur est dépensée dans le circuit pour produire son échauffement, et a pour mesure RI^2 .



I. Intensité (I). — II. Puissance dépensée (P_1). — III. Puissance produite (P_2). — IV. Puissance perdue ($P_1 - P_2$). — V. Rendement (η).

Fig. 212. — Conditions de fonctionnement d'une transmission de force motrice théoriquement parfaite.

On peut rapprocher les résultats de ceux obtenus à propos des conditions de fonctionnement d'un générateur électrique constant fermé par une résistance variant de 0 à l'infini (246).

En pratique, les générateurs et les moteurs ne sont pas constitués par des appareils d'induction aussi simples que le disque de Faraday et la roue de Barlow, la théorie subit alors certaines modifications dont nous parlerons à propos des applications industrielles.

438. Téléphone magnétique. — Nous avons déjà décrit le téléphone (237) considéré comme indicateur de la différence de potentiel entre deux points donnés. Le même appareil peut jouer alternativement le rôle de générateur électrique lorsqu'on fait vibrer la plaque : il produit alors des courants périodiques variables de forme, d'intensité et de fréquence. Ces courants envoyés dans un second appareil identique l'actionnent comme un véritable moteur reproduisant, avec une déformation plus ou moins sensible, toutes les variations de courant engendré par le premier appareil.

Deux téléphones en communication ne constituent pas, en réalité, autre chose qu'une transmission de force motrice à distance dans laquelle la forme des courants transmis et leurs actions sur le récepteur priment la question de rendement. Nous y reviendrons en téléphonie, dans le volume consacré aux applications industrielles.

CHAPITRE XIV

SELF-INDUCTION

439. Coefficient de self-induction (L_s). Quadrant. —

Lorsqu'un circuit fermé est traversé par un courant d'intensité I , il produit, en général, un certain champ galvanique et un flux d'induction Φ proportionnel à l'intensité du courant et à un certain facteur L_s dépendant des formes et des dimensions du conducteur. Ce facteur porte le nom de *coefficient d'induction propre*, d'*auto-induction*, de *self-induction*, ou, en Angleterre, d'*inductance*, et est défini par la relation :

$$L_s = \frac{\Phi}{I}.$$

C'est donc le rapport d'un flux de force magnétique à une intensité de courant, quantité physique homogène à une longueur. L'unité C.G.S. de coefficient de self-induction est le coefficient de self-induction d'un circuit qui, traversé par un courant de 1 unité C.G.S. d'intensité, produit un flux d'induction égal à 1 unité de flux de force. Les coefficients de self-induction s'expriment et se mesurent en centimètres. L'unité électromagnétique C.G.S. de coefficient de self-induction est le centimètre. L'unité électromagnétique pratique correspondante est égale à 10^9 centimètres et s'appelle *quadrant* ⁽¹⁾.

Le flux de force produit dans un circuit par un courant

(¹) Nom adopté par le *Congrès international des Electriciens* le 31 août 1889. L'unité de coefficient de self-induction adoptée par MM. *Aryston* et *Perry* sous le nom de *secohm* (par abréviation d'ohm-seconde) est un peu différente du quadrant. Le secohm est au quadrant ce que l'ohm légal est à l'ohm théorique. Cette différence n'a d'ailleurs aucune importance en pratique.

donné dépend non seulement de la forme et des dimensions de ce circuit, mais aussi de la perméabilité magnétique (67) du milieu dans lequel s'exercent les actions électromagnétiques. Comme la perméabilité magnétique est un facteur qui varie aussi avec l'état de saturation magnétique du milieu, il y a donc lieu de séparer l'étude de la self-induction en deux parties, l'une d'un calcul facile et toujours rigoureux, relative aux milieux dont la perméabilité magnétique est constante et égale à 1, l'autre, plus complexe, sur laquelle les connaissances acquises sont encore peu nombreuses, et se rapportant aux milieux à perméabilité magnétique variable.

CIRCUITS MAGNÉTIQUES DE PERMÉABILITÉ CONSTANTE.

440. Effets de la self-induction. — Lorsqu'on ferme un générateur constant sur un circuit ayant un coefficient de self-induction, on observe que le courant ne prend pas instantanément sa valeur de régime définie par la loi d'Ohm. On appelle *période variable* le temps pendant lequel le courant atteint cette valeur de régime qui constitue le *régime permanent*.

On peut le démontrer expérimentalement de plusieurs façons. Le plus simple est d'intercaler dans le circuit d'un gros électro-aimant — les inducteurs d'une machine dynamo conviennent très bien pour cette expérience — une batterie d'accumulateurs et un galvanomètre à indications rapides. On voit l'aiguille de ce dernier avancer lentement vers sa position d'équilibre. Cet effet provient de ce que, pour passer de la valeur 0 à la valeur I, le flux de force traversant le circuit doit passer de la valeur 0 à la valeur $L_s I$, si l'on appelle L_s le coefficient de self-induction du circuit. Il s'est donc développé pendant cette variation du flux une force contre-électromotrice égale à chaque instant à

$$\frac{d\Phi}{dt} = - \frac{L_s dI}{dt}$$

s'opposant à la force électromotrice du générateur. L'intensité à un instant t a donc pour expression, en appelant E la force

électromotrice du générateur et R la résistance totale du circuit :

$$I_t = \frac{E - L_s \frac{dI}{dt}}{R} = \frac{E}{R} - \frac{L_s}{R} \frac{dI}{dt}$$

équation différentielle linéaire du premier ordre qui, intégrée, donne pour valeur de l'intensité du courant après un temps t compté à partir de la fermeture du circuit :

$$I_t = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

e étant la base des logarithmes népériens. C'est l'équation établie par M. *Helmholtz* pour calculer l'intensité du courant pendant la période variable.

Discussion. Lorsque L est nul, comme avec des conducteurs adynamiques, on retombe sur la loi d'Ohm. Lorsque L est grand par rapport à R , le retard dû à la self-induction devient considérable et peut atteindre plusieurs secondes. Théoriquement, l'intensité n'atteint sa valeur de régime qu'au bout d'un temps infini, de même que le courant ne devient nul qu'au bout d'un temps infini.

L'expression $\frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}$ représente l'intensité du courant dû à la self-induction à l'instant t . Pour calculer la quantité totale d'électricité correspondant à cet extra-courant, il faut intégrer cette expression entre 0 et l'infini :

$$\frac{E}{R} \int_0^{\infty} e^{-\frac{R}{L}t} dt = \frac{EL}{R^2} = \frac{E}{R} \cdot \frac{L}{R}$$

Elle est égale à la quantité d'électricité fournie par le courant permanent $\frac{E}{R}$ pendant un temps égal à $\frac{L}{R}$.

441. Constante de temps. — On appelle constante de temps (*Time constant*) d'un circuit dont la résistance est R et le coefficient de self-induction L_s le rapport $\frac{L_s}{R}$ de son coefficient de self-induction à sa résistance.

En exprimant L , en quadrants et R en ohms, la constante de temps est alors donnée en secondes. Pour la rapidité de l'établissement de régime permanent, il faut que la constante de temps de chaque partie du circuit soit la plus petite possible. Si l'on ferme un circuit dont la constante de temps est $\frac{L}{R}$ sur une source de force électromotrice E , la formule d'Helmholtz montre qu'au bout du temps $\frac{L}{R}$, l'intensité du courant a atteint les $\frac{e-1}{e}$ ou les $\frac{43}{68}$ de la valeur qui correspond au régime permanent (1).

442. Courant de rupture ou extra-courant. — Si, le régime permanent étant établi, on intercale subitement une résistance R' dans le circuit, on aura aux deux limites

$$I_0 = \frac{E}{R} \quad \text{et} \quad I_1 = \frac{E}{R + R'}.$$

L'intensité à chaque instant sera donnée par l'équation :

$$I_t = \frac{E}{R + R'} \left(1 + \frac{R'}{R} e^{-\frac{(R + R')}{L} t} \right).$$

La quantité totale d'électricité correspondant à l'extra-courant est

$$\frac{ER'}{(R + R')R} \int_0^\infty e^{-\frac{R + R'}{L} t} dt = \frac{EL}{(R + R')^2} \cdot \frac{R'}{R}.$$

C'est à peu près ce qui se passe lorsqu'on rompt le circuit dans l'air, mais la loi de variation n'est pas aussi simple, parce que R' varie de 0 à l'infini suivant une loi inconnue, au lieu de rester constante.

Si on remplace la pile par une simple résistance, ce qui revient à annuler E , l'équation

(1) Un certain nombre d'auteurs définissent la constante de temps d'une bobine comme le temps nécessaire au courant pour prendre son régime permanent : nous avons vu que ce régime permanent n'est théoriquement atteint qu'après un temps infini. Au bout du temps $\frac{L}{R}$, le courant n'est que les 0,63 de sa valeur en régime permanent.

$$E = \frac{d(LI)}{dt} + RI$$

se réduit à

$$L \frac{dI}{dt} + RI = 0.$$

En déterminant la constante pour qu'à l'origine $t=0$, on ait $I_0 = \frac{E}{R}$, on obtient

$$I = \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Les lois des extra-courants de rupture et de fermeture sont les mêmes, ainsi que les quantités d'électricité mises en jeu.

443. Énergie emmagasinée pendant la période variable. — Pendant la période variable, la force électromotrice de self-induction à l'instant t a pour valeur

$$E_t = L_s \frac{dI_t}{dt}.$$

Elle produit un travail élémentaire $E_t I_t dt$, qui sert à produire le flux et s'y trouve emmagasiné à l'état d'énergie potentielle, sous une forme encore inconnue. En intégrant l'énergie ainsi dépensée pendant la période variable depuis la fermeture du circuit jusqu'au moment où le régime est établi, on aura la valeur de l'énergie W emmagasinée pendant la période variable

$$W = \int_0^{\infty} E_t I_t dt = \int_0^{\infty} L \frac{dI_t}{dt} I_t dt = L \int_0^{\infty} I dI.$$

$$W = \frac{1}{2} LI^2.$$

Cette énergie ainsi emmagasinée dans le circuit, sous forme de flux de force, est restituée au moment de la rupture de ce circuit, et apparaît dans l'étincelle d'*extra-courant*; elle est *constante* pour un courant d'intensité donnée et un circuit présentant un coefficient d'induction donné.

L'étincelle d'*extra-courant* est d'autant plus brillante que cette quantité d'énergie est dépensée dans un temps plus court. L'étincelle des gros électros de Faraday est un exemple typique

de l'énergie emmagasinée par l'aimantation et reparaisant à la rupture du circuit. Le bruit produit par l'étincelle éclatant dans le champ provient de l'action électrodynamique du champ sur l'air qui constitue l'étincelle. C'est un véritable *coup de fouet* produit par la force exercée par le champ sur le conducteur mobile d'air chaud constituant l'étincelle.

Une expérience très élégante de M. J. A. *Fleming* permet de montrer à un auditoire nombreux l'énergie ainsi emmagasinée dans un système présentant un grand coefficient de self-induction : on ferme le circuit d'un électro-aimant à gros fil sur une batterie d'accumulateurs, et l'on shunte cet électro-aimant par une lampe à incandescence assez résistante pour ne pas être poussée au delà du rouge par le courant permanent qui la traverse. En rompant brusquement le circuit des accumulateurs, l'extra-courant de rupture passe dans la lampe et la fait briller pendant un instant d'un vif éclat. Les phénomènes auxquels donne lieu la self-induction présentent la plus grande analogie avec ceux du bélier hydraulique.

444. Action mécanique d'un circuit sur lui-même.

— Lorsqu'un circuit est traversé par un courant, les différentes

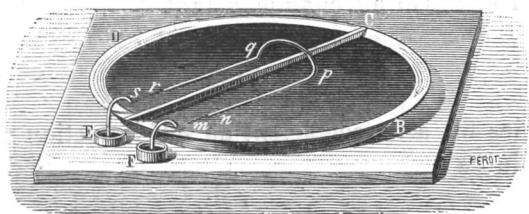


Fig. 213. — Action d'un courant sur lui-même.

parties de ce circuit exercent entre elles des actions mécaniques régies par les lois de l'électrodynamique (359). Si le circuit est flexible ou comporte des parties mobiles, celles-ci se déplaceront ou tendront à se déplacer de façon à rendre le flux de force maximum, ainsi que le coefficient d'induction et l'énergie potentielle.

L'énergie supplémentaire fournie par la source entre deux déplacements se compose de deux parties : l'une est dépensée

pour effectuer le déplacement, l'autre pour accroître l'énergie potentielle du système.

Ce principe général explique pourquoi, par exemple, dans l'expérience classique d'*Ampère* (fig. 213), un conducteur *rqpn* flottant sur deux masses de mercure séparées par une cloison isolante est repoussé et s'éloigne des points par lesquels arrive le courant. C'est pour la même raison qu'une balle de cuivre roulant sur deux conducteurs parallèles s'éloigne des points de communication des conducteurs avec la source électrique.

Une botte de fil isolé se resserre, se tasse et prend une rigidité spéciale lorsqu'elle est traversée par un courant intense. Une lame de clinquant fixée entre deux points prend, dans un champ magnétique, sous l'influence du courant, une forme exactement circulaire. Dans chaque cas, le sens de l'action est tel que le flux embrassé ou produit devienne maximum.

445. Lois des courants dérivés dans le régime variable. — On peut encore appliquer les lois de Kirchhoff, à la condition de faire intervenir les forces électromotrices de self-induction.

Cas particulier. — Considérons deux circuits dont les résistances sont r et r' , les coefficients de self-induction L et L' , les intensités i et i' . On a à chaque instant

$$ri + L \frac{di}{dt} = r'i' + L' \frac{di'}{dt}.$$

Si l'un des fils a un coefficient de self-induction nul, l'équation se réduit à

$$ri - r'i' + L \frac{di}{dt} = 0.$$

Lorsque le courant va croissant, le courant est relativement plus intense dans la branche qui n'a pas de self-induction que dans celle ayant de la self-induction. C'est l'inverse pendant que le courant décroît.

Cas d'une décharge. — Le calcul démontre que, dans ce cas, les quantités totales d'électricité se partagent suivant la loi des résistances, bien qu'à chaque instant le partage soit différent. Il y a finalement compensation.

Il n'en est pas de même si l'un des circuits produit un tra-

vail, par exemple lorsqu'on shunte un balistique et que l'aiguille se déplace. Dans ce cas, le travail dépensé agit pour développer une force électromotrice d'induction magnétique qui tend à diminuer la quantité passant à travers le balistique. C'est pour cette raison que le shuntage des galvanomètres balistiques conduit souvent à des résultats erronés, à cause du travail effectué pour produire le déplacement de l'aiguille. Le galvanomètre shunté donne toujours des indications inférieures à celles qu'il fournirait sans le shunt, en tenant compte des résistances.

446. Self-induction et capacité. — Nous avons vu (440) qu'en intercalant dans un circuit une bobine présentant un certain coefficient de self-induction, l'effet de cette bobine est de *retarder* l'établissement du régime permanent. Si, entre les extrémités de cette bobine, on établit un condensateur de capacité C , ce condensateur tendra à se charger et à *faciliter* l'établissement du régime permanent. En combinant convenablement un condensateur et une bobine présentant de la self-induction, on conçoit qu'il soit possible d'équilibrer ces deux effets égaux et de signes contraires, et d'établir des relations entre les actions physiques d'une bobine et d'un condensateur.

Ces relations ont servi, comme nous l'indiquerons plus loin (448), à la détermination des coefficients d'induction et à d'autres applications.

M. W.-E. Sumpner ⁽¹⁾ a établi une formule générale qui est fort utile pour prévoir le sens et déterminer la grandeur des phénomènes dans tous les cas où, dans un réseau de conducteur, l'on associe des capacités et des bobines présentant de la self-induction. La loi générale de ces actions a été formulée ainsi par M. Sumpner :

Si, dans un réseau de conducteurs, l'une des branches se compose d'un condensateur shunté par un circuit, présentant ou non un coefficient de self-induction, et si, pour une cause quelconque, les courants qui traversent le réseau passent d'un état permanent à un autre, l'excès de quantité d'électricité traversant un galvanomètre placé dans un bras quelconque du réseau,

(1) *Society of telegraph Engineers*, séance du 12 mai 1887. *Électricien* du 5 août 1887.

résultant de la présence du condensateur, sera le même que si le condensateur était enlevé et le coefficient de self-induction du circuit diminué d'une quantité égale au produit de la capacité du condensateur par le carré de la résistance du circuit ⁽¹⁾.

447. Décharges oscillantes ⁽²⁾. — Considérons un condensateur de capacité C renfermant une charge Q , et déchargeons-le à travers un conducteur de résistance R dont le coefficient de self-induction est L . Deux cas se présentent :

1° $L < \frac{CR^2}{4}$. La décharge est *continue*. L'intensité du courant de décharge commence à être nulle, passe par un maximum, puis décroît jusqu'à zéro sans changer de signe.

⁽¹⁾ *Démonstration*. — Considérons un circuit de résistance $R+r$ dans lequel est intercalé une force électromotrice E constante ou variable. La partie r du circuit a un coefficient de self-induction L , un condensateur de capacité C est établi en dérivation aux extrémités de r .

En appelant e la différence de potentiel à l'instant t aux extrémités de r , y le courant de charge du condensateur, et x le courant traversant la bobine r , on a évidemment :

$$E - e = R(x + y) \quad (1)$$

$$e = rx + L \frac{dx}{dt}; \quad y = C \frac{de}{dt}; \quad \frac{de}{dt} = r \frac{dx}{dt} + L \frac{d^2x}{dt^2}.$$

En portant dans (1) et simplifiant

$$E = (R+r)(x+y) + (L - Cr^2) \frac{dx}{dt} - CLr \frac{d^2x}{dt^2}.$$

Les deux derniers termes du second membre de cette équation représentent les forces électromotrices dues à la présence du condensateur et de la bobine.

Si l'on ne change pas les résistances des bras, lorsque le réseau passera d'un état d'équilibre à un autre, la quantité totale d'électricité traversant un galvanomètre placé dans une autre branche du réseau sera proportionnelle à l'intégrale de ces forces contre-électromotrices. En appelant x_1 et x_2 les régimes permanents correspondant à deux états successifs, l'intégrale de l'expression sera

$$(L - Cr^2)(x_2 - x_1).$$

Le condensateur n'affectant pas le régime permanent, l'effet du condensateur est donc le même que s'il était enlevé et que le coefficient de self-induction du circuit r devint égal à

$$L - Cr^2.$$

Le condensateur ainsi disposé a donc pour effet de diminuer le coefficient de self-induction résultant. L'effet du condensateur est inverse de celui de la bobine présentant de la self-induction. Ils peuvent donc, dans certaines conditions, se compenser exactement.

⁽²⁾ SIR W. THOMSON, *Philosophical Magazine*, juin 1853. — MASCART et JOUBERT, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. I, p. 583.

2° $L > \frac{CR^2}{4}$. Dans ce cas, le condensateur prend des charges alternativement de sens contraires, le fil est le siège de courants alternatifs, la décharge est *oscillante*, les périodes de maxima sont égales entre elles et les intensités maxima décroissent en progression géométrique dont la période a pour valeur

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}}$$

On peut considérer que l'énergie initiale représentée par la charge du condensateur passe alternativement de celui-ci au circuit présentant de la self-induction et inversement, en en dissipant chaque fois une partie sous forme de chaleur dans le circuit, les oscillations se continuant indéfiniment avec des amplitudes de plus en plus faibles, jusqu'à ce que toute l'énergie soit dissipée sous forme de chaleur, condition finale d'équilibre correspondant au minimum d'énergie potentielle du système supposé abandonné à lui-même, en dehors de l'influence de toutes les causes extérieures.

Ces conséquences de la théorie ont été vérifiées expérimentalement par Feddersen, Paalzow, Blaserna, Helmholtz, etc.

DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS DE SELF-INDUCTION.

La détermination du coefficient de self-induction d'un circuit présente une grande importance au point de vue des applications industrielles; il convient donc d'indiquer quelques méthodes permettant de *calculer* ce coefficient ou de le *mesurer*.

Le calcul des coefficients d'induction est un problème complexe, et qui constitue un cas particulier du calcul des coefficients d'*induction mutuelle* qui feront l'objet du chapitre suivant.

Nous indiquerons seulement quelques-unes des méthodes ⁽¹⁾

(1) Les principales méthodes de détermination des coefficients de self-induction sont les suivantes :

Méthode de Maxwell (avec condensateur);

Méthode de Maxwell (sans condensateur);

qui permettent de mesurer facilement un coefficient de self-induction.

448. Comparaison d'un coefficient de self-induction et d'une résistance. — Méthode de lord Rayleigh (1882).

— On établit un pont de Wheatstone comme le représente la figure 214, les bras *a*, *b*, *c* ayant un coefficient de self-induction nul ou négligeable;

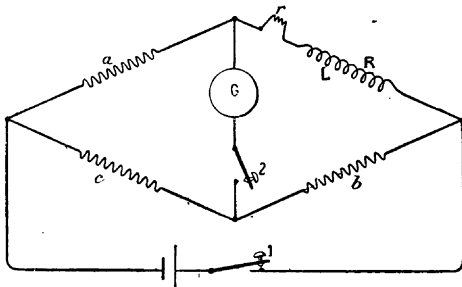


Fig. 214. — Détermination d'un coefficient de self-induction. Méthode de Lord Rayleigh.

tion nul ou négligeable; la bobine de résistance *R* dont le coefficient de self-induction est *L* forme le quatrième bras. On établit l'équilibre permanent en fermant d'abord la clef 1, puis la clef 2. En recommençant l'opération en fermant d'abord la

clef 2, puis la clef 1, le galvanomètre balistique reçoit une impulsion due à la self-induction de la bobine; une certaine quantité d'électricité traverse le galvanomètre et produit une élongation ε ⁽¹⁾. On trouble ensuite l'équilibre en introduisant une *très petite* résistance *r* dans le bras *R*. On obtient ainsi une déviation permanente α . On démontre alors que si *T* est le temps périodique d'oscillation du galvanomètre, on a :

$$L = \frac{Tr}{\pi} \cdot \frac{2 \sin \frac{1}{2} \varepsilon}{\tan \alpha}$$

ou sensiblement, avec un galvanomètre des tangentes

$$L = \frac{Tr}{\pi} \cdot \frac{\varepsilon}{\alpha}$$

Méthode de lord Rayleigh (galvanomètre balistique);

Méthode de MM. Ledebør et Manœuvrier (1887);

Méthode de MM. Ayrton et Perry, seohmmètre (1886);

Méthode de M. H.-F. Weber (*Lumière électrique*, t. XXI, p. 103, 1886);

Méthode de M. Joubert (1881). Voir le chapitre consacré aux courants alternatifs.

(1) ε est l'élongation théorique, avec la correction due à l'amortissement.

En pratique, il est préférable d'inverser le courant au lieu de rompre le circuit; on double les valeurs de α et de ε , ce qui rend les lectures plus exactes et assure mieux la constance du courant permanent.

449. Méthode de Clerk-Maxwell. — Nous avons vu (446) que la capacité peut, dans un réseau de conducteurs, réduire le coefficient de self-induction d'un circuit jusqu'à l'annuler. La méthode de Maxwell n'est pas autre chose qu'une application de ces propriétés. On réalise le montage représenté figure 215, en proportionnant les bras a , b , R et R' pour que l'é-

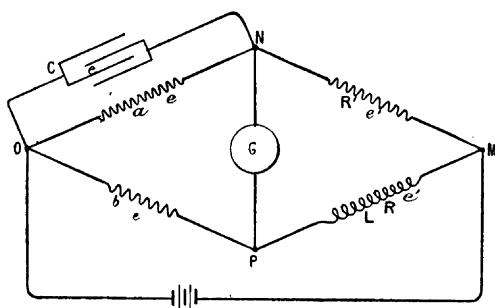


Fig. 215. — Détermination d'un coefficient de self-induction. Méthode de Clerk-Maxwell.

quilibre permanent soit établi, en fermant d'abord la clef de pile, puis celle du galvanomètre. On recommence ensuite l'expérience en fermant d'abord la clef du galvanomètre, puis la clef de pile, et l'on fait varier les résistances ou la capacité jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro pendant la période d'ouverture et de fermeture du circuit. Cette condition sera satisfaite lorsque l'excès de quantité d'électricité qui a traversé le circuit ONM sur celle qui a traversé le circuit OPM sera précisément égal à la quantité emmagasinée dans le condensateur pendant la période variable. Ces valeurs sont connues. On a, en appelant e et e' les différences de potentiel lorsque le régime permanent est établi :

$$Q = Ce = \frac{L}{R} \cdot \frac{e'}{R}$$

d'où

$$L = CR^2 \frac{e}{e'}$$

mais

$$\frac{e}{e'} = \frac{a}{R} = \frac{b}{R}$$

et, en remplaçant

$$L = CRb.$$

M. *Pirani* (1887) a modifié la méthode de Maxwell en disposant les circuits comme le représente la figure 216.

Lorsque l'équilibre est établi pour le régime permanent et le régime variable, on a simplement

$$L = CR^2.$$

La démonstration de cette formule s'établit par des considérations analogues à celles faites à propos de la méthode de Maxwell.

450. Méthode de MM. P. Ledebœr et G. Maneuvrier ⁽¹⁾. —

Cette méthode *cumulative* est surtout applicable aux faibles coefficients de self-induction. La bobine de résistance R , dont on cherche le coefficient de self-induction L , est établie en équilibre électrique dans un pont de Wheatstone employé sous la forme de pont à fil divisé. Le curseur étant amené au milieu du fil divisé, on produit l'équilibre à l'aide d'un fil de maillechort formant la quatrième branche du pont. Un interrupteur tournant, intercalé dans le circuit de la pile et dans celui du galvanomètre, fait passer à chaque tour l'extra-courant de rupture dans le galvanomètre. On obtient ainsi une déviation permanente. On élimine ensuite la constante du galvanomètre et l'intensité du courant qui passe dans la bobine, en faisant une

(1) *Académie des sciences*, séance du 28 mars 1887.

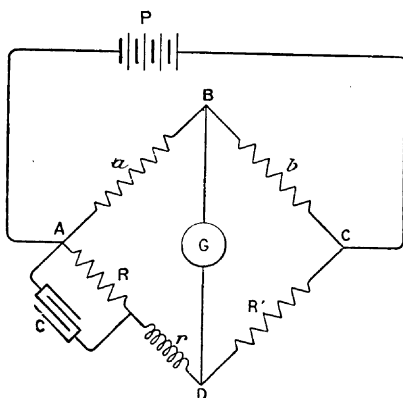


Fig. 216. — Détermination d'un coefficient de self-induction. Méthode de M. Pirani.

seconde expérience. On arrête l'interrupteur et l'on déplace la manette d'un petit angle ε : cela détruit l'équilibre du pont et provoque dans le galvanomètre le passage d'un faible courant, qui produit une déviation α . On trouve alors le coefficient de self-induction L , en portant ces valeurs de δ et α dans la formule :

$$L = R \frac{2\varepsilon t \delta}{l n \alpha},$$

l étant la longueur du fil divisé qui correspond à la résistance R et n le nombre de tours effectués en t secondes par l'interrupteur tournant.

Cette adaptation des méthodes de Maxwell et lord Rayleigh s'applique aux cas où le coefficient de self-induction est trop faible pour produire une impulsion appréciable dans le galvanomètre qui n'a pas besoin d'être balistique, et peut être un simple galvanoscope sensible à miroir.

451. Secohmmètre de MM. Ayrton et Perry. — En 1887, MM. Ayrton et Perry ⁽¹⁾ ont perfectionné la méthode *cumulative* et l'ont rendue pratique en en faisant une méthode de *réduction à zéro*, plus sensible, dans laquelle le coefficient de self-induction cherché se trouve déterminé par le produit d'un temps et d'une résistance, d'où le nom de *secohmmètre* donné à l'appareil, parce qu'il détermine les coefficients d'induction en *ohms-seconde* ⁽²⁾.

Principe de la méthode. — La bobine dont on veut mesurer le coefficient de self-induction est placée dans l'un des bras d'un pont de Wheatstone (fig. 217), dont les trois autres bras comprennent des bobines à double enroulement sans self appréciable. A l'aide d'un commutateur tournant, on met en communication, une fois par tour, la pile avec le pont pendant un certain temps, puis, au bout de ce temps, on ferme le galvanomètre sur lui-même. En faisant varier convenablement la vitesse de rotation, c'est-à-dire le temps de fermeture du pont

⁽¹⁾ *Journal of the Society of Telegraph-Engineers and Electrician*, séance du 28 avril 1887, n° 67, p. 292.

⁽²⁾ Pratiquement, 1 ohm-seconde = 1 secohm = 1 quadrant = 10⁹ centimètres (439).

sur la pile et les bras du pont, on peut maintenir l'aiguille du galvanomètre au zéro. Ce résultat est obtenu parce qu'à chaque tour le cadre du galvanomètre est parcouru par deux quantités

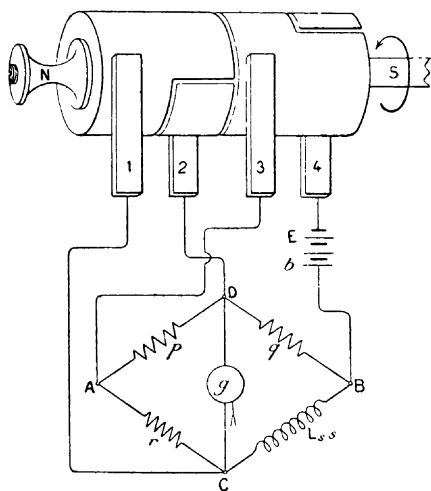


Fig. 217. — Secohmmètre de MM. Ayrton et Perry.

d'électricité égales et de signes contraires, l'une d'un certain sens, due à l'établissement de l'équilibre pendant la période variable de fermeture du circuit, l'autre de sens contraire due à la fermeture du galvanomètre sur lui-même, en court-circuit.

La première quantité peut être rendue aussi grande que l'on veut par la variation du temps T de passage du courant, temps toujours suffisant pour que le régime per-

manent s'établisse, la quantité qui traverse le galvanomètre en court-circuit peut être elle-même variée dans de grandes limites par l'ajustement des bras; il est donc toujours possible d'obtenir cette égalité des deux quantités d'électricité, égalité correspondant à l'équilibre permanent du galvanomètre.

Appelant R la différence entre la résistance réelle de la bobine et la résistance calculée qui assure l'équilibre lorsqu'on emploie le commutateur tournant, T le temps pendant lequel la pile est fermée sur le pont, le calcul conduit à la relation extrêmement simple :

$$L_s = TR \text{ quadrants.}$$

Si on appelle λ le *calage*, c'est-à-dire le rapport du temps pendant lequel la pile est fermée sur le pont au temps que met la communication à faire un tour, et n le nombre de tours en t secondes, on a :

$$L_s = \frac{\lambda t R}{n} \text{ quadrants.}$$

Les expériences et la formule démontrent que plus λ est petit et la résistance grande, plus R est grand et la méthode sensible. Lorsqu'on a de grands coefficients de self-induction à mesurer, il faut réduire la vitesse angulaire et augmenter le calage. La mesure d'un coefficient de self-induction comprend donc les opérations suivantes :

1° Mesurer la résistance de la bobine en ohms, par la méthode du pont de Wheatstone ordinaire ;

2° Faire tourner l'appareil à une vitesse angulaire connue ω , et établir l'équilibre du galvanomètre en agissant sur les bras du pont ;

3° Faire tourner le commutateur à une autre vitesse angulaire connue ω' , et vérifier si

$$\frac{R}{\omega} = \frac{R'}{\omega'}$$

en appelant R et R' les augmentations de résistance qui rétablissent respectivement l'équilibre aux vitesses angulaires ω et ω' . Si la relation est bien déterminée, on peut prendre l'une quelconque de ces valeurs pour déterminer L_s . Si $\frac{R}{\omega}$ est plus grand que $\frac{R'}{\omega'}$, c'est que la vitesse angulaire ω' et peut-être même ω sont trop élevées ; on doit les réduire, ou inversement, jusqu'à ce que les résultats deviennent concordants.

Le coefficient de self-induction peut ainsi être déterminé par deux expériences distinctes, sans mesurer au préalable la résistance de la bobine.

Après expérience, les auteurs ont reconnu que le moyen le plus simple d'emploi de la méthode consistait à amener le galvanomètre au zéro par une variation de vitesse angulaire du commutateur.

Mesure des capacités. — Si l'on remplace la bobine présentant de la self-induction par une résistance sans self-induction, entre les extrémités de laquelle se trouve branché un condensateur, ce condensateur produit un effet inverse de celui de la

bobine; il faut alors diminuer la résistance du bras sur lequel il est branché pour obtenir l'équilibre avec le commutateur tournant.

Un raisonnement analogue à celui fait pour la bobine présentant de la self-induction conduit à la formule suivante pour l'expression de la capacité :

$$C = \frac{k(R - R')}{\omega' R^2} \text{ farads.}$$

R résistance du bras sans self-induction sur lequel est branché le condensateur;

R' résistance qui produit l'équilibre à la vitesse angulaire ω' ;

ω' vitesse angulaire du commutateur en tours par seconde;

k constante de l'appareil.

452. Comparaison des coefficients de self-induction de deux bobines (Clerk-Maxwell). — On réalise le montage ci-contre (fig. 218), et on fait varier les bras R et R' ainsi que a

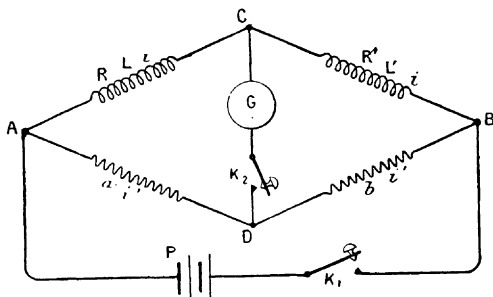


Fig. 218. — Méthode de Clerk-Maxwell pour la comparaison de deux coefficients de self-induction.

et b jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro, soit pour le régime permanent, soit pour la période variable.

Appelons i et i' les intensités à un instant donné compté à partir de la fermeture du circuit. Puisqu'il ne passe rien dans le galvanomètre, c'est que les intensités dans R et R' sont égales à chaque instant. Il en est de même entre a et b . En faisant le produit des différences de potentiel en croix, on a l'égalité :

$$\left(Ri + L \frac{di}{dt}\right) bi' = \left(R'i + L' \frac{di}{dt}\right) ai'$$

$$Rbi' + L \frac{di}{dt} bi' = R'ai' + L' \frac{di}{dt} ai'.$$

Mais, pendant le régime permanent, on a $Rb = R'a$ et il reste

$$Lb = L'a$$

d'où

$$\frac{L}{L'} = \frac{a}{b} = \frac{R}{R'}.$$

Cette méthode est commode à employer lorsque l'on a une bobine-étalon dont le coefficient de self-induction est connu, soit par ses dimensions (468), soit par une détermination faite avec soin une fois pour toutes.

453. Shuntage des galvanomètres dans la méthode balistique. — L'emploi du shunt dans les galvanomètres balistiques comporte certaines précautions, et n'est théoriquement légitime que dans certaines conditions, ainsi précisées par M. *Ledeboer* :

1° Courant de charge et de décharge de durée très courte comparativement à la période d'oscillation du galvanomètre; 2° shunt et galvanomètre sans self-induction ni capacité électrostatique; 3° introduction du shunt ne changeant pas les conditions du galvanomètre.

La première est assez facilement satisfaite par la décharge des condensateurs, beaucoup moins avec des bobines et des électro-aimants. La deuxième n'est jamais satisfaite. Quant à la troisième, elle ne l'est jamais, surtout avec les galvanomètres Deprez-d'Arsonval, dans lesquels l'amortissement est fonction de la résistance du circuit.

La proportionnalité des élongations aux quantités d'électricité n'est rigoureusement vraie que pour un amortissement nul; lorsque cet amortissement est très petit, il faut multiplier l'élongation par le facteur $\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right)$, en appelant λ le décrement logarithmique du galvanomètre, décrement qui varie avec chaque condition spéciale de l'appareil, c'est-à-dire suivant que le shunt est plus ou moins résistant.

Il n'est donc pas légitime de prendre le rapport des élongations pour obtenir le rapport des quantités d'électricité qui ont traversé le galvanomètre dans deux expériences successives, sans y apporter les corrections dues à l'amortissement. C'est pour rendre cette correction négligeable que le plus souvent on modifie les résistances de façon à obtenir des élongations sensiblement égales dans toutes les expériences.

454. Moyens d'atténuer les effets de self-induction dans la période de rupture. — 1° On roule les fils en double pour former un conducteur *adynamique*. On rend ainsi L_s nul, ou sensiblement tel.

2° On dispose un second fil dont le coefficient de self-induction est nul, en dérivation sur le premier, en lui donnant une grande résistance. Au moment de l'interruption du circuit, le courant dû à la self-induction se bifurque suivant les lois des courants dérivés et passe presque en entier par la résistance en dérivation, ce qui diminue l'étincelle de rupture ainsi que la durée de la période variable.

3° On établit un condensateur, soit (*a*) en dérivation sur le circuit présentant de la self-induction, soit (*b*) en dérivation entre les deux points de contact.

a. La charge du condensateur tend à annuler l'action de la self-induction en détournant une partie de la quantité d'électricité de l'extra-courant qui passerait par le contact.

b. L'extra-courant de rupture vient charger le condensateur et ne passe plus qu'en partie par le contact rompu. Avec ce dispositif, l'action du condensateur pendant la charge est nulle, puisque le condensateur est fermé sur lui-même, en court-circuit. Nous en trouverons une application à la bobine de Ruhmkorff (486).

455. Applications diverses. — Une bobine ayant un coefficient de self-induction élevé peut être considérée comme un système ayant une grande inertie magnétique, et assimilée, par analogie, à un corps ayant une grande masse. Le parallélisme entre la puissance vive $\frac{1}{2} Mv^2$ d'un corps dont la masse est

M et la vitesse v , et l'énergie potentielle $\frac{1}{2} LI^2$ d'une bobine dont le coefficient de self-induction est L traversée par un cou-

rant I, se continue dans un grand nombre de phénomènes, et permet de prévoir, par comparaison, ce qui se produira dans chaque cas particulier. Nous en verrons des exemples dans le chapitre XVI consacré aux courants alternatifs.

CIRCUITS MAGNÉTIQUES DE PERMÉABILITÉ VARIABLE.

Lorsque l'on remplace le milieu ordinaire — air ou vide — par un milieu magnétique, un noyau de fer doux, par exemple, l'induction magnétique s'accroît, toutes choses égales d'ailleurs, dans le rapport de μ à 1, c'est-à-dire que le flux produit augmente proportionnellement à la perméabilité magnétique du noyau. Mais comme cette perméabilité magnétique n'est pas constante, il en résulte une relation assez complexe entre les différents facteurs, et une définition encore mal établie du coefficient de self-induction.

456. Définitions du coefficient de self-induction. — Le coefficient de self-induction d'un circuit peut être défini par l'une des trois relations suivantes :

a. Par la force électromotrice d'induction : $E = L \frac{dl}{dt}$.

b. Par le flux d'induction : $\Phi = LI$.

c. Par l'énergie potentielle : $W = \frac{1}{2} LI^2$.

Si la perméabilité magnétique du milieu est constante, ces trois définitions donnent pour L des valeurs identiques ⁽¹⁾. Il n'en est pas de même dans le cas de substances magnétiques, comme le fer ; il est alors très difficile de savoir ce qu'il faut entendre dans ce cas par le mot coefficient de self-induction, et tous les auteurs ne sont pas encore d'accord sur sa définition.

Cette incertitude sur la définition exacte du coefficient de self-induction rend les calculs rigoureux difficiles, et conduit souvent à des formules contradictoires, les contradictions ayant pour origine les définitions différentes que l'on peut

⁽¹⁾ *The variation of the coefficients of induction*, par W. E. SUMPNER. *Philosophical Magazine*, juin 1888.

donner au coefficient de self-induction d'un système à perméabilité magnétique variable.

La question se complique encore du fait de l'hystérésis (397), des courants de Foucault (420) qui peuvent prendre naissance dans les noyaux de fer, etc. Il n'y a donc pas possibilité, dans l'état actuel de nos connaissances, de soumettre les phénomènes de self-induction à un calcul rigoureux, et d'avoir des relations concrètes bien définies entre tous les éléments qui interviennent dans ces phénomènes.

Nous nous contenterons donc de résoudre quelques problèmes particuliers qui présentent un certain intérêt dans les applications.

457. Énergie dissipée par l'hystérésis. — Nous avons vu (397) que l'aimantation graduelle d'un noyau de fer doux ou toute autre substance magnétique donne lieu à un phénomène d'hystérésis. Cette hystérésis correspond à une certaine dissipation d'énergie sous forme de chaleur, énergie représentée, à un facteur constant près, par la surface comprise entre les deux courbes obtenues pendant le parcours du cycle magnétique. En voici une démonstration élémentaire.

Considérons une pile de force électromotrice E en circuit sur une résistance R , et produisant un courant d'intensité I dans un solénoïde de longueur l renfermant N spires. En appelant Φ le flux d'induction produit dans le noyau placé dans le solénoïde, on aura évidemment, à un instant quelconque

$$E = RI + N \frac{d\Phi}{dt}.$$

Pendant un temps élémentaire dt , l'énergie fournie par la pile se divisera en deux parties, l'une dépensée en chaleur dans le fil, l'autre servant à accroître l'énergie potentielle du système si le flux augmente, ou restituée par le système si le flux diminue. On aura alors :

$$\underbrace{EIdt}_{\text{Énergie fournie par la pile.}} = \underbrace{RI^2dt}_{\text{Chaleur produite dans le circuit.}} + \underbrace{INd\Phi}_{\text{Accroissement (\pm) de l'énergie potentielle.}}$$

En appelant dW l'accroissement d'énergie potentielle,

$$dW = INd\Phi. \quad (1)$$

Mais, à l'intérieur du solénoïde de longueur l , on a un champ uniforme ou force magnétisante d'intensité \mathcal{H} , telle que

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi NI}{l}, \quad \text{d'où} \quad NI = \frac{\mathcal{H}l}{4\pi}.$$

En appelant, d'autre part, \mathcal{B} l'induction spécifique et S la section du barreau, le flux d'induction Φ qui le traverse est

$$\Phi = S\mathcal{B}, \quad \text{d'où} \quad d\Phi = Sd\mathcal{B}.$$

En remplaçant dans (1), on a pour l'accroissement élémentaire d'énergie dW , en appelant V le volume Sl du barreau

$$dW = \frac{V}{4\pi} \mathcal{H} d\mathcal{B}.$$

Et l'énergie mise en jeu pour parcourir le cycle magnétique est

$$W = \frac{V}{4\pi} \int \mathcal{H} d\mathcal{B}.$$

Un coup d'œil jeté sur la figure 183 (397) montre que pour un cycle fermé, $\int \mathcal{H} d\mathcal{B}$ est précisément l'aire de la surface comprise entre les deux courbes ABCD et DEFA, et représente, au facteur $\frac{V}{4\pi}$ près, la différence entre l'énergie dépensée et l'énergie restituée par le système pour décrire le cycle magnétique, énergie dissipée et convertie en chaleur dans le noyau de fer.

La détermination de la dissipation d'énergie due à l'hystérésis consiste donc à tracer expérimentalement des courbes analogues à celle de la figure 183 pour chacun des corps magnétiques soumis à l'expérience et à déterminer la surface comprise entre les deux courbes. Les résultats trouvés sont rapportés à l'énergie par unité de volume, et ont pour expression, suivant que la méthode de mesure employée détermine \mathcal{H} ou \mathcal{B} ,

$$\frac{W}{V} = \frac{1}{4\pi} \int \mathcal{H} d\mathcal{B}; \quad \frac{W}{V} = \int \mathcal{H} d\mathcal{H}.$$

MM. Ewing et Hopkinson ont donné les valeurs du facteur $\frac{W}{V}$ en *ergs par centimètre cube*, pour des substances magnétiques très différentes ⁽¹⁾, car la dépense due à l'hystérésis varie avec la composition chimique, la trempe de chaque échantillon et la valeur maxima de \mathcal{B} .

Voici, par exemple, les résultats relatifs à l'énergie par cm^3 dépensée en chaleur pour faire décrire des cycles magnétiques différents, définis par les valeurs maxima de l'induction spécifique, pour un échantillon donné de fil de fer recuit.

Induction spécifique \mathcal{B} en unités C.G.S.	Énergie spécifique $\frac{W}{V}$ dissipée par l'hystérésis en ergs par cm^3 .
1 974	4 10
3 830	1 160
5 950	2 190
7 180	2 940
8 790	3 990
10 590	5 560
11 480	6 160
11 960	6 590
13 700	8 690
15 560	10 040

Ces chiffres montrent qu'au point de vue de la perte d'énergie par l'hystérésis, il est avantageux de ne pas trop s'approcher du point de saturation dans toutes les pièces soumises à des changements d'aimantation rapides. M. le docteur Hopkinson a déterminé $\frac{W}{V}$ dans un grand nombre d'échantillons en faisant varier \mathcal{H} de +240 à -240 unités C.G.S. Voici quelques-uns des principaux résultats obtenus :

	\mathcal{B} en unités C.G.S.	$\frac{W}{V}$ en ergs par cm^3 .
Fer forgé recuit	18 251	13 356
Fonte grise.	10 783	13 037

(1) Un grand nombre de ces valeurs, extraites des mémoires de ces deux savants, sont reproduites dans le *Formulaire pratique de l'Électricien*, 1890.

Acier Whitworth trempé dans		
l'huile	16 120	99 401
Acier chromé	13 960	169 455
Acier au tungstène	14 480	216 864

Les phénomènes d'hystérésis expliquent l'échauffement des morceaux de fer soumis à des changements rapides d'aimantation, et justifient la nécessité de faire choix du fer le plus doux possible pour réduire cette perte par hystérésis.

La dissipation d'énergie due à l'hystérésis est indépendante de la rapidité avec laquelle le cycle magnétique est décrit. Elle diffère donc essentiellement à ce point de vue de l'action des courants de Foucault (420) que l'on peut rendre aussi petite que l'on veut en produisant les variations magnétiques avec assez de lenteur et en découpant les masses magnétiques de façon à augmenter les résistances des circuits qu'elles produisent.

458. Durée d'aimantation et de désaimantation. —

Faraday a signalé le premier le fait que les gros électro-aimants mettent un temps appréciable à s'aimanter et à se désaimanter.

Ce fait est dû non seulement au coefficient élevé de self-induction du circuit, mais aussi à une sorte de *viscosité magnétique* que présentent les substances magnétiques à perméabilité variable. Voici quelques chiffres cités par *G. Gabanellas* ⁽¹⁾ qui pourront fixer les idées sur ce point :

« 1° Si, le circuit magnétique étant très ouvert, on agit par fermeture du courant excitateur, le flux atteint les 0,99 de sa valeur définitive en quinze à vingt secondes, et en trente secondes pour de très faibles résistances du circuit électrique total.

« 2° Si, le circuit magnétique étant bien fermé, on agit par ouverture du courant excitateur, le flux a perdu les 0,99 de sa valeur en *une minute et demie*, le dernier centième met une demi-heure à disparaître *sensiblement*, mais le phénomène n'est pas éteint *avant plusieurs heures*. »

La mesure du flux d'induction variant dans ces conditions présente des difficultés spéciales que l'on fait disparaître par la méthode suivante.

(1) *Société française de physique*. Séance du 13 décembre 1886.

459. Détermination du flux d'induction par la servo-variation de l'induction ⁽¹⁾. — *Méthode de MM. René Arnoux et G. Cabanellas* (1887). — Lorsque la variation du flux d'induction n'est pas assez rapide pour que le mobile reçoive une impulsion instantanée, l'emploi du galvanomètre balistique n'est plus légitime. On peut alors mesurer le flux d'induction en déterminant expérimentalement la loi de variation de la force électromotrice d'induction en fonction du temps à l'aide d'appareils à indications rapides, électromètre capillaire de M. Lippmann ou galvanomètres à masses mobiles aussi réduites que possible et placées dans un champ magnétique intense. L'intégration *graphique* de la courbe ainsi obtenue à l'aide d'un planimètre ou d'un intégraphe fait connaître la valeur du flux d'induction.

L'appareil employé dans les mesures est un galvanomètre différentiel à cadre mobile de très petites dimensions, ou un galvanomètre différentiel, à aiguille de fer doux extrêmement légère, placée dans un champ magnétique intense.

Mode opératoire. — Le système électromagnétique considéré est brusquement placé sur un électromoteur de force électromotrice E (pile, accumulateur). Dans ces conditions, l'équation différentielle est :

$$d\Phi = (E - Ri)dt.$$

Lorsque la force électromotrice E est constante, la détermination du flux revient simplement à celle de la loi de variation du courant excitateur en fonction du temps. Dans ce cas, l'équation précédente intégrée donne

$$\Phi = Et - R \int i dt.$$

Mais en pratique on ne peut jamais être assuré de la constance de E pendant tout l'intervalle d'une mesure, et la détermination de i en fonction de t ne suffit plus. On tourne la difficulté en rendant différentiel le galvanomètre employé. Un des circuits de ce galvanomètre est taré de façon à donner (en volts) le produit de l'intensité i du courant par la résistance intérieure r de l'appareil, et la résistance de l'autre circuit est

⁽¹⁾ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 21 février 1887.

réglée de façon que, placé en dérivation aux bornes du système, un équilibre rigoureux soit obtenu en régime permanent. En régime variable, cet équilibre étant rompu, la déviation du galvanomètre est à chaque instant proportionnelle à la différence $(E - ir)$, c'est-à-dire à la force électromotrice d'induction due à la variation du flux; le flux d'induction *total* établi dans l'appareil est donné en unités C.G.S. par l'équation :

$$\Phi = \int (E - ir) dt.$$

Ce flux, divisé par le nombre N des spires du fil, donne évidemment la valeur du flux d'induction *moyen*, puisque le circuit total du système est intéressé dans la mesure. Il est bien évident que, si l'on a uniquement en vue de déterminer la valeur finale du flux, sa loi de variation en fonction du temps peut être rendue absolument quelconque. On peut, par exemple, régler à l'aide d'un rhéostat spécial son établissement avec toute la lenteur désirable pour les mesures, et augmenter ainsi autant qu'on veut leur précision, l'erreur due à l'inertie des pièces mobiles du galvanomètre devenant, par ce fait, absolument négligeable.

Cette méthode peut être facilement appliquée aux machines dynamos en utilisant leur période d'*amorçage*.

460. Courants alternatifs et périodiques. — Lorsque des courants périodiques, alternatifs ou redressés traversent une bobine entourant un milieu à perméabilité magnétique variable, l'influence de ce milieu se fait sentir et produit dans le courant principal des modifications importantes dues à la self-induction, à l'hystérésis, aux courants de Foucault, etc. Nous signalerons, à titre d'exemple, quelques cas particuliers à propos des *transformateurs* dans le chapitre consacré aux courants alternatifs.

CHAPITRE XV

INDUCTION MUTUELLE

461. Définitions. — Lorsqu'un circuit A est traversé par un courant d'intensité I , il produit un certain flux de force. Si un circuit B est placé à proximité, il est traversé par tout ou partie de ce flux. Le flux produit par A dans B est proportionnel à l'intensité du courant I et à un certain facteur L_m dont la valeur dépend de la distance des deux circuits, de leur nombre de tours respectifs, de leurs formes, de leurs dimensions et de leurs positions relatives. On appelle *coefficient d'induction mutuelle* le rapport du flux de force produit par A dans B à l'intensité du courant I , traversant A. Le coefficient d'induction mutuelle est, comme le coefficient de self-induction, dans le système électromagnétique, homogène à une longueur et se mesure en centimètres. L'unité pratique est le quadrant (439).

Courants d'induction mutuelle. — Il résulte de ce que nous venons de dire que si nous établissons dans le circuit A un courant variable, il se produira dans la bobine B un flux de force variable qui fera naître dans le circuit B une force électromotrice variable elle-même, et un courant d'induction mutuelle. On appelle circuit *primaire* ou *inducteur* celui qui est traversé par le courant variable, et circuit *secondaire* ou *induit* celui qui est le siège de la force électromotrice d'induction mutuelle.

Mais chacun des circuits primaire et secondaire possède lui-même un coefficient de self-induction, et, pendant la période variable, les phénomènes de self-induction se manifestent en même temps que les phénomènes d'induction mutuelle : nous

n'observons, dans chaque cas, que la *résultante* de toutes les actions qui interviennent dans le phénomène.

S'il est possible d'étudier l'induction électromagnétique et la self-induction en dehors de toute considération relative à l'induction mutuelle, la réciproque n'est pas vraie : tout phénomène d'induction mutuelle se complique de phénomènes de self-induction, car il est impossible de concevoir un circuit A produisant un certain flux de force dans un circuit B sans qu'il produise un flux *au moins égal* dans son propre circuit.

Considérons, pour fixer les idées, l'appareil classique qui sert à démontrer les phénomènes d'induction dans le cas le plus sim-

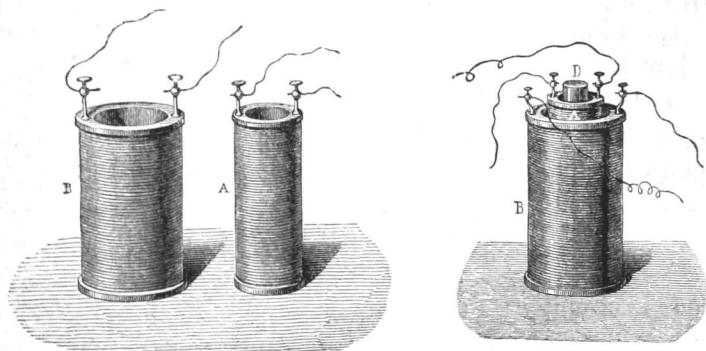


Fig. 219. — Appareils de démonstration des phénomènes d'induction mutuelle.

ple, celui où la bobine A (fig. 219) est placée dans la bobine B. Si le circuit B est ouvert et que la bobine A soit reliée à une source électrique constante, nous nous trouverons, à la fermeture et à la rupture du circuit de A, dans un cas déjà étudié à propos de la self-induction. L'établissement du courant dans la bobine A suivra la formule établie par M. Helmholtz (440). Si nous fermons le circuit de la bobine B sur lui-même ou sur une résistance, les choses ne se passeront pas de même. Pendant la période variable, la bobine B sera traversée par un courant qui tendra à s'opposer à l'accroissement du flux que A tend à produire dans B, et la self-induction de B agira de son côté pour s'opposer à la création du courant dans B. Le courant traversant la bobine B réagira à son tour sur la bobine A pour modifier la période variable en fonction des coefficients d'in-

duction L_1 , L_2 , L_m , des résistances des deux circuits et de la force électromotrice agissant dans le circuit 1. Nous traiterons ce cas particulier comme conséquence d'un cas plus général, défini dans le paragraphe suivant.

462. Induction mutuelle de deux circuits. Cas général ⁽¹⁾. — Considérons deux circuits invariables de forme et de position renfermant chacun une force électromotrice constante. Appelons, en affectant respectivement des indices 1 et 2 les deux circuits,

E_1 , E_2 les forces électromotrices constantes qui agissent dans ces circuits :

R_1 , R_2 leurs résistances.

I_1 , I_2 les intensités des courants qui les traversent à un instant donné.

L_1 , L_2 les coefficients de self-induction.

L_m le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits.

On a évidemment à chaque instant pour le circuit 1 :

$$L_m \frac{dI_2}{dt} + L_1 \frac{dI_1}{dt} + R_1 I_1 - E_1 = 0$$

et pour le circuit 2 :

$$L_m \frac{dI_1}{dt} + L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 - E_2 = 0.$$

La solution de ces deux équations est de la forme

$$R_1 I_1 - E_1 = A_1 e^{\rho t} + B_1 e^{\rho' t}$$

$$R_2 I_2 - E_2 = A_2 e^{\rho t} + B_2 e^{\rho' t}.$$

Les conditions relatives aux limites déterminent les coefficients A_1 , A_2 , B_1 et B_2 .

En exprimant que les valeurs des intensités satisfont aux équations différentielles, quel que soit le temps, on trouve que ρ et ρ' sont les racines et l'équation

$$\left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}\right) \rho^2 + \left(\frac{R_1}{L_1} + \frac{R_2}{L_2}\right) \rho + \frac{R_1 R_2}{L_1 L_2} = 0.$$

(1) MASCART et JOUBERT. *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. 1^{er}, p. 588.

Ces racines sont toujours réelles ; elles doivent être, de plus, négatives, l'intensité ne pouvant, dans aucun circuit, croître indéfiniment avec le temps.

Il faut donc avoir $L_1 L_2 > L_m^2$. On ne pourrait avoir $L_1 L_2 = L_m^2$ à la limite que si les deux circuits coïncidaient.

La condition $L_1 L_2 > L_m^2$ montre également que si le coefficient de self-induction de l'un des circuits est très petit, le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits sera lui-même très petit.

En vertu du principe de la conservation de l'énergie, pendant un temps élémentaire dt , l'énergie fournie par la source intercalée dans le circuit primaire se compose de deux parties : l'une est dépensée en chaleur dans les deux circuits, l'autre représente la variation totale de l'énergie potentielle augmentée du travail extérieur.

Si les circuits sont déformables et peuvent se déplacer l'un par rapport à l'autre, le calcul conduit à une expression des plus compliquées, insoluble même, eu égard au grand nombre de variables.

Lorsque les circuits sont invariables de forme et de position, L_1 , L_2 et L_m sont des constantes, le travail extérieur est nul, et l'on a à chaque instant

$$\frac{L_1 I_1^2}{2} + L_m I_1 I_2 + \frac{L_2 I_2^2}{2} = \frac{1}{2} (L_1 I_1 + L_m I_2) I_1 + \frac{1}{2} (L_2 I_2 + L_m I_1) I_2.$$

Énergie intrinsèque du circuit 1.
Énergie relative des deux circuits.
Énergie intrinsèque du circuit 2.
Énergie potentielle du circuit 1.
Énergie potentielle du circuit 2.

Chacun des termes du second membre représente l'énergie qu'il faudrait dépenser pour amener le champ de la valeur zéro à son état actuel, et, par suite, l'énergie qu'il restituerait si on annulait en même temps tous les courants.

Cette énergie est égale, pour chacun des circuits, à la moitié du produit de l'intensité par le flux de force qui le traverse.

On ne sait rien quant à la forme même de cette énergie potentielle ni sur l'endroit où elle est localisée, bien que les idées de Faraday et de Maxwell supposant l'énergie répandue dans le milieu tout entier paraissent les plus vraisemblables.

463. Énergie relative de deux circuits. — Considérons deux circuits traversés par des courants I_1 et I_2 . Leur énergie relative est, par définition, le travail que peuvent effectuer les deux circuits lorsqu'on les déplace de leur position actuelle jusqu'à l'infini, les courants restant constants. Cette énergie relative dépend des formes des circuits, de leurs positions, des intensités des courants qui les traversent et du *sens* de ces courants.

Lorsque les deux circuits sont mobiles l'un par rapport à l'autre, ils se déplacent de façon à rendre leur énergie potentielle maxima, et, le flux de force résultant maximum ainsi que leur coefficient d'induction mutuelle (**468**).

CAS PARTICULIERS D'INDUCTION MUTUELLE.

Nous pouvons étudier l'action dans quelques cas simples répondant aux conditions de la pratique.

464. Fermeture du circuit inducteur sur une pile de force électromotrice constante. — Le courant inducteur passant de sa valeur initiale 0 à sa valeur finale I_1 , le flux passera de la valeur 0 à une valeur Φ_2 . La quantité induite sera :

$$Q_2 = \frac{\Phi_2}{R_2} = \frac{L_m I_1}{R_2}$$

$$I_2 \text{ moy} = \frac{Q_2}{t} = \frac{L_m I_1}{R_2 t}$$

L'intensité moyenne est d'autant plus grande que le coefficient d'induction mutuelle et l'intensité du courant inducteur sont plus grands, la résistance du circuit secondaire et le temps de la variation plus petits.

$$E_{2, \text{ moy}} = \frac{(HS)_2}{t} = \frac{L_m I_1}{t}$$

La force électromotrice est d'autant plus grande que le flux est plus grand. On obtient ce résultat en construisant une bobine ayant un grand nombre de spires et en produisant des variations de flux rapides. Ces résultats justifient les dispositions données aux bobines d'induction employées en pratique.

465. Bobine d'induction parfaite. — Considérons le cas où le circuit induit ne renferme pas de force électromotrice, $E_2 = 0$, et celui où le circuit magnétique ne renferme pas de fer, et les circuits restant indéformables et invariables, les coefficients d'induction sont constants ainsi que les résistances électriques.

Fermons le circuit inducteur sur la pile E , et considérons le phénomène au bout d'un temps t suffisamment grand.

$$\begin{aligned} I_{1,0} &= 0 & I_{1,t} &= \frac{E}{R} \\ I_{2,0} &= 0 & I_{2,t} &= 0. \end{aligned}$$

Les quantités induites Q_1 et Q_2 sont

$$\begin{aligned} Q_1 &= I_1 \left(t - \frac{L_1}{R_1} \right) = \frac{E_1}{R_1} \left(t - \frac{L_1}{R_1} \right). \\ Q_2 &= -\frac{L_m}{R_2} I_2 = -\frac{E_1}{R_1} \cdot \frac{L_m}{R_2}. \end{aligned}$$

Si, le régime permanent établi, on ouvre le circuit inducteur, on a

$$\begin{aligned} I_{1,0} &= \frac{E}{R}; & I_{1,t} &= 0; \\ I_{2,0} &= 0; & I_{2,t} &= 0. \end{aligned}$$

Les quantités induites sont égales et de signes contraires, ce qui était évident *a priori*, les deux variations de flux étant égales et de signes contraires.

Pour connaître les intensités à chaque instant dans chaque circuit, il faut déterminer les constantes, ce qui conduit à un calcul assez compliqué, dont on trouvera le développement dans les *Leçons sur l'électricité et le magnétisme* de MM. Mascart et Joubert, t. I, page 588.

Courant de rupture. — Si la rupture est *instantanée*, c'est-à-dire qu'elle se produise sans étincelle, le calcul donne pour valeur du courant induit initial

$$I_{2,0} = \frac{L_m}{L_2} \cdot \frac{E_1}{R_1}$$

et, à un instant quelconque compté à partir de la fermeture

$$I_{2,t} = \frac{L_m E}{L_2 R_1} e^{-\frac{R_2}{L_2} t}.$$

La quantité d'électricité totale produite pendant la rupture est

$$\int_0^\infty I_{2,t} dt = \frac{E_1 L_m}{R_1 R_2} = \frac{L_m I_1}{R_2}.$$

Elle est indépendante des coefficients de self-induction, ce qui était évident *a priori*. L'énergie totale de la décharge dans le circuit induit a pour valeur

$$R_2 \int_0^\infty I_{2,t} dt = \frac{E^2}{R_1} \cdot \frac{L_m}{2R_2 L_2}.$$

Courant de fermeture. — Les deux circuits réagissent l'un sur l'autre. Les formules, très compliquées, se simplifient un peu si l'on suppose les deux circuits identiques, c'est-à-dire

$$R_1 = R_2 = R; \quad L_1 = L_2 = L.$$

Les équations différentielles intégrées et résolues ⁽¹⁾ donnent pour valeurs des courants primaire et secondaire, après un temps t compté à partir de la fermeture du circuit primaire

$$I_{1,t} = \frac{E}{R} - \frac{E}{2R} \left(e^{-\frac{Rt}{L+L_m}} + e^{-\frac{Rt}{L-L_m}} \right)$$

$$I_{2,t} = -\frac{E}{2R} \left(e^{-\frac{Rt}{L+L_m}} + e^{-\frac{Rt}{L-L_m}} \right)$$

Ces équations montrent l'influence du circuit induit sur le circuit inducteur : il a pour effet de favoriser l'établissement du courant primaire et de réduire, en quelque sorte, son coefficient d'induction *apparent*.

Le courant induit partant de 0 va en augmentant, passe par un maximum et redevient nul. Ce maximum a lieu après un temps t_2 donné par la relation

$$t_2 = \frac{L_2 - L_m^2}{2R L_m} \log_e \left(\frac{L + L_m}{L - L_m} \right).$$

(1) J.-A. FLEMING. *The alternate current transformer*, t. I, p. 183.

Cette fonction croissant lorsque L_m décroît, on voit que ce maximum aura lieu d'autant plus tard que le coefficient d'induction mutuelle sera plus petit.

Si l'on suppose les deux circuits identiques assez rapprochés l'un de l'autre, auquel cas L_1 et L_m sont très peu différents, et l'on a sensiblement

$$I_1 = \frac{E}{R_1} \left[1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{Rt}{2L}} \right]$$

$$I_2 = -\frac{E}{2R_2} e^{-\frac{Rt}{2L}}.$$

Dans ce cas, l'intensité de courant induit direct produit au moment de la rupture du circuit est

$$I_{2,0} = -\frac{E}{R_1} e^{-\frac{Rt}{2L}}.$$

Le courant induit direct et le courant induit inverse passent par un maximum à l'origine du temps, et ce maximum est deux fois plus grand pour le courant de rupture que pour le courant de fermeture.

Nous avons traité ce cas particulier à titre d'exemple, pour montrer combien, même avec des hypothèses qui simplifient le problème, sa solution est encore complexe. Nous verrons d'autres applications des formules générales à propos de la détermination des coefficients d'induction et des courants alternatifs.

On rencontre, en pratique, des cas dans lesquels interviennent beaucoup plus de facteurs variables. Si, par exemple, l'on place des noyaux de fer dans les bobines, la perméabilité varie ainsi que les coefficients d'induction. Les bobines peuvent également être déformables et se déplacer l'une par rapport à l'autre; l'un des circuits peut renfermer une force électromotrice variable ou une résistance variable, telle qu'un microphone, etc. Dans ces conditions, le problème échappe à tout calcul, et l'on ne peut qu'*apprécier* le sens de l'action et l'importance de chacun des éléments variables.

466. Courants induits de différents ordres. — Le professeur *Henry*, de Princetown (New-Jersey), en poursuivant

une longue série d'études sur les courants d'induction, découvrit vers 1840 que les courants induits peuvent donner naissance à d'autres courants induits appelés courants de *second ordre*, que ceux-ci peuvent à leur tour en induire d'autres dits de *troisième ordre*, et ainsi de suite, l'énergie totale représentée par chacun d'eux s'affaiblissant naturellement, après chaque transformation, de l'énergie dépensée dans tous les circuits précédents pour satisfaire à la loi de Joule. En modifiant convenablement les enroulements, on peut modifier à volonté les forces électromotrices et les intensités de ces courants induits successifs et réaliser ainsi des transformations *en cascade* très variées. La bobine d'induction de Ruhmkorff se prête très bien à ces transformations dont nous trouverons des applications industrielles avec les transformateurs et les bobines d'induction employées en téléphonie.

467. Écrans d'induction. — Si l'on interpose entre le circuit primaire et le circuit secondaire une lame de métal plus ou moins épaisse, on observe, comme l'a établi *Henry* ⁽¹⁾ dès 1840, que la nature du courant induit se modifie. Cette lame métallique joue le rôle d'un véritable écran d'induction qui est lui-même le siège de forces électromotrices induites. Cet écran a pour effet de faciliter l'établissement du courant primaire de fermeture et de retarder, au contraire, l'établissement du courant de rupture. Les quantités d'électricité induites à la fermeture et à la rupture sont donc réparties d'une façon essentiellement différente : le temps de passage tend à s'égaliser, ainsi que les intensités et les forces électromotrices, et le courant de rupture a moins de tension qu'avant l'introduction de l'écran. Le rôle égalisateur de cet écran est d'autant plus marqué qu'il est plus conducteur. Nous trouverons des applications de ce phénomène dans la bobine d'induction (486) et dans les balances d'induction (487).

Si l'écran est formé d'une substance magnétique, il peut jouer le rôle inverse et favoriser, au contraire, la production des courants d'induction en augmentant la perméabilité magnétique du milieu interposé, ainsi que le flux de force produit

(1) *Philosophical Magazine*, 1840.

par un courant donné. Le noyau de fer de la bobine d'induction de Ruhmkorff (486) est un exemple d'écran d'induction négatif.

CALCUL DES COEFFICIENTS D'INDUCTION.

468. Définitions. — Le flux d'induction produit par un circuit sur un autre circuit est le produit de l'intensité du courant qui traverse le premier circuit par un facteur constant L_m , ne dépendant que de la forme et de la position relative des deux circuits. Ce facteur constant a pour expression générale (386)

$$L_m = - \iint \frac{\cos \alpha}{r} dl dl'$$

dl et dl' étant la distance de deux éléments des circuits considérés placés à la distance r et faisant entre eux l'angle α , et s'appelle *coefficient d'induction mutuelle* des deux circuits.

Lorsque les deux éléments appartiennent au même circuit, cette intégrale donne la valeur du flux produit par le courant sur lui-même et s'appelle *coefficient de self-induction*.

Si nous considérons deux circuits égaux ayant même coefficient de self-induction L et s'approchant de la coïncidence, la limite vers laquelle tend le flux d'induction totale est égale à $2 LI$, ou à $(L_1 + L_2) I$ si les deux circuits n'ont pas le même coefficient de self-induction. Il en résulte que l'on doit toujours avoir l'inégalité

$$L_1 L_2 > L_m^2$$

en appelant L_m le coefficient d'induction mutuelle, on s'approche de l'égalité $L_1 L_2 = L_m^2$ en pratique par une intercalation convenable des spires des deux circuits. Si, dans un système, le coefficient de self-induction d'un circuit est très petit, son coefficient d'induction mutuelle avec un autre circuit sera lui-même très petit.

Le calcul des coefficients d'induction est, même pour des circuits de formes géométriques simples, une opération généralement compliquée et qui oblige à avoir recours aux méthodes analytiques les plus difficiles. Nous nous contenterons d'indiquer ici les principaux résultats relatifs aux circuits les

plus simples et les plus employés en pratique, renvoyant le lecteur pour la démonstration de chaque formule aux sources mêmes où nous avons puisé. Toutes ces formules donnent les valeurs des coefficients d'induction en centimètres lorsque les dimensions des circuits sont exprimées en centimètres.

469. Solénoïde à une seule couche ⁽¹⁾. — Si sa longueur est assez grande pour qu'on puisse négliger l'action des extrémités, en appelant S la section du cylindre circulaire, N le nombre total de spires, l la longueur

$$L_s = \frac{4\pi NS}{l}.$$

Bobine cylindrique longue roulée uniformément ⁽²⁾.

En appelant A le rayon de la couche extrême extérieure et a celui de la couche intérieure, N le nombre *total* de spires

$$L = \frac{4}{3} \pi^2 \frac{N^4}{l^3} (A - a)(A^3 - a^3).$$

470. Bobine annulaire. — Considérons un tore de révolution recouvert de courants équidistants situés chacun dans un plan passant par l'axe. En appelant A le rayon de la circonférence décrite par le centre du cercle générateur de rayon a , le flux total qui traverse la section pour un courant d'intensité I passant dans un circuit renfermant N spires roulées uniformément est

$$\Phi = 2\pi NI(A - \sqrt{A^2 - a^2}).$$

Et le coefficient de self-induction de la bobine

$$L_s = 2\pi N^2(A - \sqrt{A^2 - a^2}).$$

Si la bobine de N_1 tours est enroulée d'une seconde bobine faisant N_2 tours, le coefficient d'induction mutuelle des deux bobines est

$$L_m = 2\pi N_1 N_2 (A - \sqrt{A^2 - a^2}).$$

La quantité d'électricité Q_2 induite dans le second circuit de

⁽¹⁾ MASCART et JOUBERT, t. 1^{er}, p. 601.

⁽²⁾ MASCART et JOUBERT, t. 1^{er}, p. 602.

résistance R_2 par une variation d'intensité I_1 dans le premier a pour valeur

$$Q_2 = \frac{N_2 \Phi}{R_2} = \frac{2\pi N_1 N_2 I_1}{R_2} (A - \sqrt{A^2 - a_2}).$$

La quantité d'électricité induite par une inversion du courant inducteur passant de la valeur $+I_1$ à la valeur $-I_1$ aura une valeur double.

471. Deux fils parallèles. — Pour réduire le coefficient de self-induction d'un circuit au minimum, il faut rouler les conducteurs en double et les rapprocher le plus possible. Si l'on considère deux fils cylindriques parallèles de longueur l et de rayon r et r' , roulés parallèlement, traversés par le courant en sens inverse, et dont la distance du centre est b , le coefficient de self-induction de ce système a pour valeur ⁽¹⁾

$$L_s = 2 \left(\log_e \frac{b^2}{rr'} + \frac{1}{2} \right) l.$$

La plus petite valeur que l'on puisse donner à L_s correspond au cas où les fils sont en contact et ont même diamètre. Dans ce cas $b = r + r' = 2r$ et

$$L_{s.\text{min.}} = 2 \left(\log_e 4 + \frac{1}{2} \right) l = 3,7726l.$$

Le coefficient de self-induction d'une bobine roulée en double n'est donc jamais nul, mais il est négligeable en pratique. On peut encore, pour une section donnée, le diminuer en remplaçant les fils par des lames très minces, rapprochées par leurs faces.

472. Conducteur rectiligne de section circulaire. — Lorsqu'on ferme le circuit d'un générateur électrique de force électromotrice E sur un circuit rectiligne de longueur l et de résistance totale R , y compris la résistance du générateur, l'intensité de régime permanent s'établit en un temps très court mais *fini*, puisque le courant doit passer par toutes les valeurs intermédiaires entre 0 et sa valeur de régime donnée par la loi d'Ohm. Il faut donc que le fil rectiligne présente lui-même

(1) MASCART et JOUBERT, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. II, p. 135-138.

un certain coefficient de self-induction s'opposant à l'établissement du régime permanent instantané. La valeur de ce coefficient de self-induction est accessible au calcul dans quelques cas simples.

Dans le cas d'un conducteur rectiligne de section uniforme, on peut décomposer ce conducteur en un grand nombre de courants parallèles exerçant entre eux des actions d'induction mutuelle. Le coefficient d'induction mutuelle de deux courants parallèles de longueur l à une distance d a pour valeur (471)

$$L_m = 2l \left(\log_e \frac{2l}{d} - 1 \right).$$

La distance moyenne géométrique d de tous les courants élémentaires traversant une section circulaire de rayon r est

$$d = re^{-\frac{1}{4}} = 0,7788r.$$

Le coefficient de self-induction d'un conducteur de section circulaire est donc

$$L_s = 2l \left(\log_e \frac{2l}{0,7788r} - 1 \right) = 2l \left(\log_e \frac{2l}{r} - 0,75 \right).$$

473. Coefficient de self-induction de deux bobines réunies en quantité (1). — Les études théoriques et expérimentales de MM. *Ledebær* et *Maneuvier* conduisent aux résultats suivants :

« 1° Dans le cas général, on ne peut pas compenser le système de deux bobines réunies en quantité par une bobine unique, et, par suite, un pareil système *n'a pas de coefficient de self-induction*, dans l'acception propre du mot.

« 2° Lorsque les deux bobines satisfont à l'équation de condition

$$\frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2}$$

on peut remplacer le système par une bobine unique, ayant pour constantes

(1) *Académie des sciences*, séances des 25 juillet et 22 août 1887.

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{et} \quad L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}.$$

« 3° Dans le cas particulier où l'on mesure les coefficients de self-induction par la méthode des extra-courants et à l'aide du dispositif du pont de Wheatstone, on arrive à déterminer par un calcul, fondé sur une certaine hypothèse, les constantes d'une bobine unique pouvant remplacer le système des deux bobines. L'expérience confirme sensiblement les conséquences de ce calcul, c'est-à-dire que la compensation paraît suffisante, au moins lorsqu'on se borne à lancer dans les branches du pont soit un courant continu, soit l'un des deux extra-courants. Mais l'équilibre ne persiste plus lorsqu'on envoie dans le pont une série d'extra-courants ou une série de courants alternatifs.

« 4° Le système des deux bobines peut être compensé, dans toutes les circonstances, par une bobine unique lorsque les constantes des bobines sont dans un rapport $\frac{L}{R}$ assez petit pour que la durée d'établissement du courant soit inférieure à la période de succession des courants (soit discontinus, soit alternatifs) lancés dans les branches du pont. »

474. Bobines de self-induction maxima. — Étant donné un fil de longueur l , pour obtenir une bobine de self-induction maxima, il faut :

1° Si la gorge est un cercle de rayon a , rouler le fil de façon que A étant le rayon moyen de la bobine

$$A = 3,22a.$$

2° Si la gorge a une section carrée dont le côté est a et A la distance du centre de la section à l'axe de la bobine, il faut faire

$$A = 1,85a.$$

Dans les deux cas, le volume de la bobine ainsi constituée qui doit être égal au volume du fil fournit une seconde équation pour déterminer A et a . Le coefficient de self-induction se déduit alors des formules établies ci-dessus. En pratique, pour obtenir des coefficients de self-induction élevés, il est préfé-

nable d'augmenter la perméabilité magnétique du milieu en employant des noyaux de fer, il faut alors des longueurs de fil beaucoup moins grandes, mais il intervient dans ce cas des phénomènes de saturation magnétique, d'hystérésis, etc., qui rendent le problème plus complexe et presque inaccessible à un calcul rigoureux.

475. Coefficient d'induction mutuelle de deux bobines de longueur indéfinie. — Si les deux bobines sont concentriques, que la bobine extérieure renferme N tours dans une longueur l et que la bobine intérieure, de surface S' , renferme N' tours, le coefficient d'induction mutuelle a pour valeur

$$L_m = \frac{4\pi NN'S'}{l}.$$

Si les bobines sont de longueurs limitées, il faut tenir compte des bases, ce qui conduit à un calcul fort compliqué. La mesure devient alors plus facile que le calcul.

La question se simplifie si l'une des bobines est d'un diamètre beaucoup plus grand que la seconde bobine placée à son centre et ayant de faibles dimensions parce que le champ au centre est uniforme.

476. Coefficient d'induction mutuelle de deux cercles égaux ⁽¹⁾. — Pour deux cercles égaux et parallèles de rayon r , placés à une distance d , leur coefficient d'induction mutuelle a pour valeur :

$$L_m = 4\pi r \left[1 + \frac{3d^2}{16r^2} + \dots \right] \log_e \frac{8r}{d} - 4\pi r \left[2 + \frac{d^2}{16r^2} + \dots \right].$$

477. Bobines à coefficient d'induction mutuelle variable étalonnées. — On peut réaliser un étalon variable de coefficient d'induction mutuelle de plusieurs façons différentes.

A cet effet, *M. Marcel Brillouin* (1882) emploie deux bobines, l'une formée d'un fil un peu gros, l'autre de 20 fils isolés légèrement tordus ensemble. Le coefficient d'induction mutuelle L_m entre la bobine à gros fils et l'une quelconque des 20

(1) MASCART ET JOUBERT, t. II, p. 167.

autres bobines est constant. Un commutateur permet de faire passer le courant dans $(20 - n)$ bobines dans un sens et dans n bobines en sens contraire. Le coefficient d'induction mutuelle est égal à $(20 - 2n) L_m$. Les 20 fils étant montés en tension, leur résistance reste constante, quel que soit le couplage.

Dans un autre appareil, le coefficient d'induction peut varier d'une façon continue. Une bobine cylindrique longue renferme une autre bobine intérieure pouvant tourner autour d'un axe dirigé suivant un diamètre commun. Si la bobine fixe est suffisamment longue, le coefficient d'induction mutuelle est proportionnel au cosinus de l'angle des axes des bobines.

On peut obtenir le même résultat, ainsi que l'indique M. Mascart, avec deux bobines dont l'une a un rayon beaucoup plus grand que l'autre, ou avec une bobine sphérique donnant à l'intérieur un champ uniforme.

DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES COEFFICIENTS D'INDUCTION MUTUELLE.

Lorsque les formes des circuits ne se prêtent pas au calcul de leurs coefficients d'induction, il est plus simple de les mesurer. Comme nous avons déjà fait connaître quelques méthodes relatives à la détermination des coefficients de self-induction (448), nous n'indiquerons ici que les méthodes relatives à la détermination des coefficients d'induction mutuelle.

478. Mesure d'un coefficient d'induction mutuelle par la méthode balistique. — Établissons le montage représenté figure 220. En fermant la pile sur la bobine A nous pro-

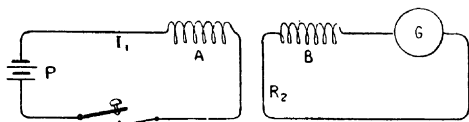


Fig. 220. — Détermination d'un coefficient de self-induction par la méthode balistique.

duisons un courant d'induction dans la bobine B et il passe dans le circuit secondaire une quantité d'électricité (464)

$$Q_2 = \frac{HS}{R_2} = \frac{L_m I_1}{R_2}$$

expression d'où l'on tire

$$L_m = \frac{Q_2 R_2}{I_1}.$$

En exprimant tout en unités C.G.S. le coefficient d'induction L_m est donné en centimètres. Si Q_2 est en coulombs, R_2 en ohms et I_1 en ampères, on aura L_m en quadrants (439).

479. Méthode de G. Carey-Foster (1886) (1). — On dispose (fig. 221) une des bobines en circuit sur une pile et une résistance R , l'autre bobine étant reliée à un galvanomètre et

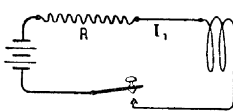


Fig. 221.

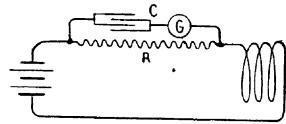


Fig. 222.

Détermination d'un coefficient d'induction mutuelle. Méthode de M. Carey-Foster.

formant un circuit induit de résistance totale R_2 . En fermant le circuit inducteur, on obtient une certaine élongation due à l'induction mutuelle L_m des deux bobines, et le circuit induit est traversé par une quantité d'électricité

$$Q = L_m \frac{I_1}{R_2}.$$

Si, sans altérer le circuit primaire, on établit le montage représenté figure 222, en disposant un condensateur de capacité C aux extrémités de la résistance R et que la fermeture ou la rupture du circuit primaire donne la même élongation du galvanomètre, on aura

$$Q = Q' = CRI_2$$

d'où l'on tire

$$L_m = CRR_2.$$

On peut, pour éviter la vérification de l'égalité de l'intensité

(1) *Philosophical Magazine*, février 1887.

du courant dans les deux expériences, établir le montage représenté figure 223, et ramener le galvanomètre au zéro en faisant varier les résistances. On démontre alors que

$$L_m = CRR_2$$

en appelant R_2 la résistance totale du circuit induit ($r_2 + r_2$).

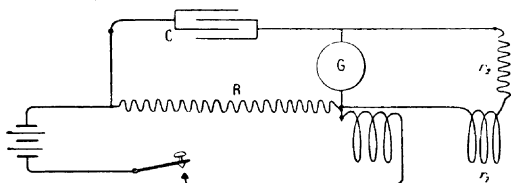


Fig. 223. — Détermination d'un coefficient d'induction mutuelle. Méthode de réduction à zéro de M. Carey-Foster.

Pour que le galvanomètre reste au zéro pendant la période variable ainsi que pendant le régime permanent, il faut que l'action de self-induction de la bobine induite soit égale à l'action d'induction mutuelle des deux bobines.

480. Méthode de M. Pirani (1887) ⁽¹⁾. — On réalise le montage représenté figure 224.

Les deux bobines r_1 et r_2 , dont on mesure le coefficient d'induction mutuelle, sont réunies au point O, où viennent aboutir également deux résistances R_1 et R_2 . La pile est dans le circuit formé par R_1 et r_1 , tandis que le galvanomètre est dans le circuit formé par R_2 et r_2 . Entre les points A et B est placé un condensateur C. On a comme condition d'équilibre

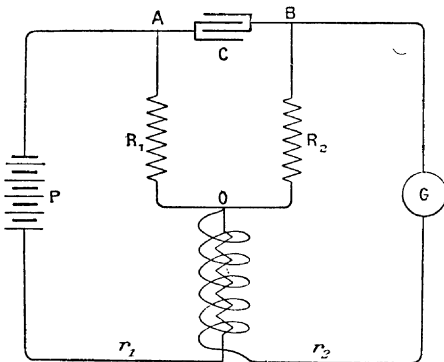


Fig. 224. — Mesure d'un coefficient d'induction mutuelle. Méthode de M. Pirani.

$$L_m = R_1R_2C.$$

⁽¹⁾ *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1887.

481. Comparaison de deux coefficients d'induction mutuelle. — *Méthode de Maxwell* ⁽¹⁾. — Soit deux systèmes de bobines Aa , $A'a'$ dont les coefficients d'induction mutuelle sont respectivement L_m et L'_m . Les résistances sont respectivement R, R', r, r' . On établit le montage représenté figure 225, de façon

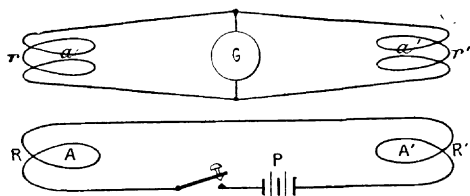


Fig. 225. — Comparaison de deux coefficients d'induction mutuelle. Méthode de Maxwell.

que les forces électromotrices induites par A sur a et par A' sur a' s'ajoutent. On intercale entre a et a' un galvanoscope G , et on ajuste les résistances r et r' des circuits des bobines a et a' jusqu'à ce qu'on obtienne l'équilibre à la fermeture et à la rupture du circuit inducteur. On a alors

$$\frac{L_m}{L'_m} = \frac{r}{r'}$$

La méthode de Maxwell est susceptible de nombreuses variétés. On peut, par exemple, comme *M. M. Brillouin* (1882), monter les bobines a et a' en opposition et shunter l'une des bobines inductrices, ou, comme le fait *M. Carey-Foster* (1886), monter la pile en dérivation sur les deux bobines inductrices, et le galvanomètre en tension avec les deux bobines induites en opposition. Dans toutes ces méthodes, les comparaisons des coefficients d'induction mutuelle se ramènent à des comparaisons de résistances.

482. Comparaison d'un coefficient de self-induction et d'un coefficient d'induction mutuelle. — *Méthode de Clerk-Maxwell* ⁽²⁾. — Soient a, b, c, d , les quatre bras d'un pont de Wheatstone monté comme le représente la figure 226

⁽¹⁾ *Electricity and magnetism*, t. II, § 755.

⁽²⁾ *Electricity and magnetism*, t. II, § 756.

et disposé de telle façon que le courant traversant la bobine L_m soit de sens inverse de celui traversant la bobine L_s et produise

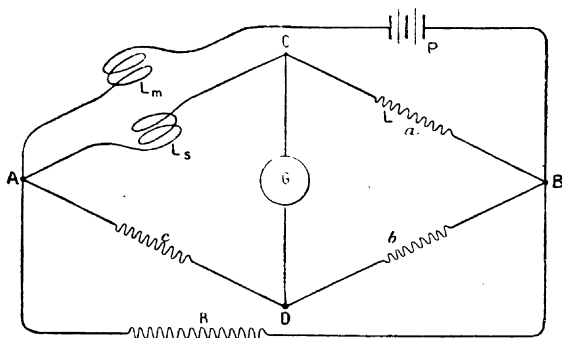


Fig. 226. — Comparaison d'un coefficient de self-induction et d'un coefficient d'induction mutuelle. Méthode de Clerk-Maxwell.

un flux de sens inverse. Lorsque l'équilibre permanent et l'équilibre pendant la période variable seront établis, on aura

$$L_s = - \left(1 + \frac{a}{b} \right) L_m.$$

Cet équilibre peut s'obtenir, soit en faisant varier le coefficient d'induction mutuelle, soit en faisant varier les résistances b et c , tout en laissant leur rapport constant, soit, enfin, en disposant les circuits de telle façon que l'action due à la self-induction soit un peu supérieure à l'action de l'induction mutuelle, et en intercalant une résistance R entre les points A et B atténuant l'action de la self-induction, et que l'on fait varier jusqu'à ce que le régime permanent soit établi. On a dans ce dernier cas

$$L_s = - \left(1 + \frac{a}{b} + \frac{a+d}{R} \right) L_m.$$

Cette formule se démontre, comme les précédentes, en écrivant les relations nécessaires entre les résistances, les intensités et les coefficients d'induction pour que la différence de potentiel entre les points C et D reste nulle pendant la période variable aussi bien que lorsque le régime permanent est établi.

483. Détermination de la constante d'un galvano-

mètre balistique. — On enroule sur un tore en bois de dimensions connues deux fils de cuivre isolés parallèles formant chacun N spires.

En faisant passer un courant d'intensité I_1 dans l'un de ces fils, on produira un flux de force (470)

$$\Phi = 2\pi N I_1 (A - \sqrt{A^2 - a^2}).$$

Si le second fil est relié à un galvanomètre balistique et que la résistance totale du circuit soit R_2 , la quantité induite dans ce circuit sera

$$Q = \frac{2\pi N^2 I_1}{R_2} (A - \sqrt{A^2 - a^2}).$$

Tout étant exprimé en unités C.G.S., on aura Q en unités C.G.S., et l'on déterminera ainsi facilement la *constante balistique* de l'appareil, c'est-à-dire le facteur constant par lequel il faut multiplier l'élongation pour avoir la quantité d'électricité qui produit cette élongation. En procédant par inversion de courant, la quantité induite sera doublée ainsi que l'élongation.

484. Induction mutuelle dans les systèmes à perméabilité magnétique variable. — Les formules établies précédemment supposent *constante* la perméabilité du milieu dans lequel se produisent les phénomènes d'induction et les circuits *indéformables*, c'est-à-dire L_1 , L_2 et L_m *constants*. Il n'en est pas toujours ainsi en pratique, et en particulier lorsque le circuit magnétique renferme du fer formant un circuit magnétique plus ou moins fermé. Les variations de perméabilité magnétique du milieu, la saturation plus ou moins grande des noyaux, l'hystérésis, les courants de Foucault, etc., font que la question échappe à un calcul rigoureux. On ne peut alors, dans chaque cas, comme nous l'avons déjà dit (465), que *prévoir* l'influence de chaque action et *apprécier* sa grandeur en introduisant des hypothèses qui simplifient le problème.

APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES D'INDUCTION MUTUELLE.

Les phénomènes d'induction mutuelle sont surtout appliqués dans les *transformateurs*.

485. Transformateurs. — On donne le nom générique de *transformateur* à tout appareil ayant pour but de modifier les propriétés de l'énergie électrique, de la transformer en lui donnant des qualités nouvelles qu'elle ne possédait pas avant de traverser le transformateur. Le transformateur se distingue d'un générateur par ce fait que, recevant de l'énergie électrique, il restitue de l'énergie électrique sans en changer la nature, en n'agissant que sur les facteurs qui la caractérisent : intensité, force électromotrice et temps.

Bien qu'un grand nombre d'appareils puissent jouer le rôle de *transformateurs*, et que les accumulateurs et les condensateurs, par exemple, ne soient pas autre chose que des transformateurs, ce nom s'applique surtout aux *transformateurs d'induction*, c'est-à-dire aux appareils qui utilisent les phénomènes d'induction pour effectuer la transformation de l'énergie électrique. Ce sont les seuls que nous ayons à considérer ici.

La nature du générateur électrique alimentant un transformateur permet d'établir une classification des transformateurs consacrés par l'usage, bien que les phénomènes en jeu ne soient pas essentiellement différents. On appelle *bobine d'induction* un transformateur qui utilise le courant *continu* fourni par un générateur électrique, le nom de transformateur étant plus spécialement réservé aux *transformateurs d'induction à courants alternatifs*. Ces derniers appareils seront étudiés dans le chapitre consacré aux courants alternatifs (491).

486. Bobine d'induction. — La *bobine d'induction* ou, comme on l'appelle quelquefois du nom du constructeur qui l'a le plus étudiée et perfectionnée, la *bobine de Ruhmkorff*, est un transformateur qui est disposé le plus généralement pour produire des forces électromotrices élevées à l'aide d'un générateur continu de faible force électromotrice, tel qu'une pile ou une batterie d'accumulateurs. La bobine d'induction se compose en principe de deux bobines dont l'une, à fil gros et court, est traversée par des courants périodiquement interrompus ; c'est la bobine *inductrice*. La bobine *induite*, à fil long et fin, entoure la première et se trouve le siège de forces électromotrices d'autant plus élevées que le nombre de spires dont elle est formée est plus grand, le flux de force produit à l'inté-

rieur de la bobine induite plus intense et ses variations plus rapides.

La première bobine d'induction fut construite en 1842 par *Masson* et *Breguet*. Les interruptions du circuit inducteur étaient produites à l'aide d'un interrupteur tournant.

C'est en 1851 que *Ruhmkorff* construisit l'appareil sous la forme qu'il a conservée jusqu'ici. Autour d'un noyau formé d'un faisceau de fil de fer doux (fig. 227) sont roulés le circuit

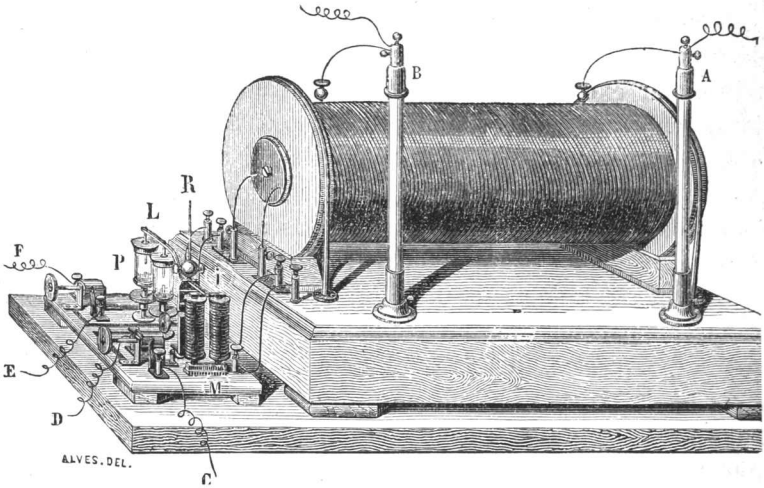


Fig. 227. — Bobine de Ruhmkorff.

inducteur et le circuit induit. Le circuit induit est périodiquement coupé par un *interrupteur* automatique entre les bornes duquel est établi un condensateur dont nous expliquerons la fonction un peu plus loin.

M. Ducretet a donné à la bobine d'induction une forme comode (fig. 228) en rendant le circuit inducteur mobile ainsi que le noyau et le condensateur. On peut ainsi se rendre compte très rapidement par l'expérience de l'influence de chacun des éléments qui concourent au fonctionnement de la bobine.

L'*interrupteur* est constitué par une lame vibrante *r* attirée par le noyau de la bobine et revenant faire contact par son élasticité en *M* lorsque le courant est interrompu et que l'aimantation du noyau a disparu. Dans d'autres appareils, l'*interrupteur*

est constitué par un marteau en fer doux O (fig. 229) attiré par le noyau M et produisant l'interruption du circuit en e. La vis V règle la tension du ressort a et la fréquence des interruptions.

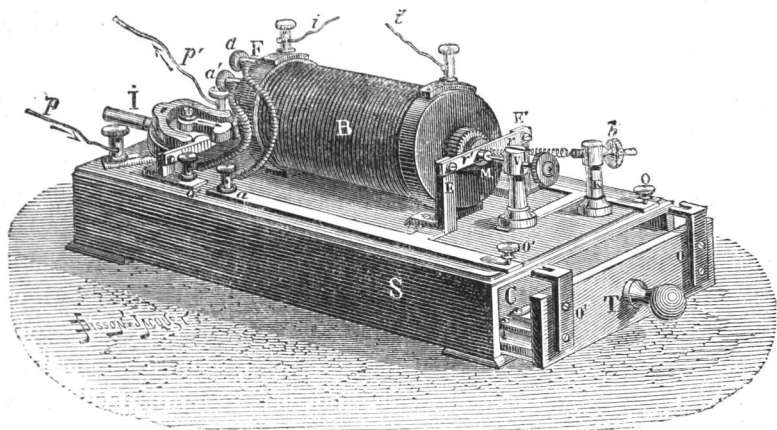


Fig. 228. — Bobine de Ruhmkorff. Modèle démontable de M. Ducretet.

Pour les bobines de grandes dimensions, *Foucault* (1856) a disposé un interrupteur spécial (fig. 230) actionné par un

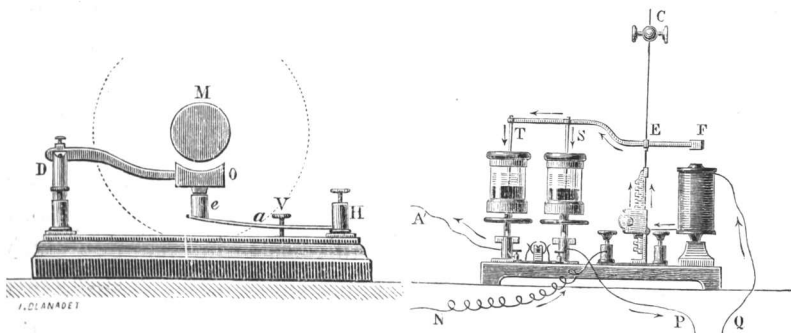


Fig. 229. — Interrupteur à marteau. Fig. 230. — Interrupteur de Foucault.

circuit distinct, et constitué par un électro-aimant F agissant sur une armature F montée sur une lame vibrante dont on fait varier la période d'oscillation à l'aide du contrepoids C. L'interruption se produit entre deux godets de mercure et deux tiges de platine T, S. Le mercure est recouvert d'une couche d'al-

cool qui a pour but de refroidir l'étincelle de rupture et d'interposer un corps isolant dans le circuit pour augmenter la résistance de ce circuit le plus vite possible.

Condensateur. — L'application du condensateur aux bobines d'induction a été faite en 1853 par *Fizeau*, dans le but d'augmenter la tension du courant secondaire produit au moment de la rupture du circuit primaire. Le condensateur est disposé en *dérivation* entre les deux points où se fait la rupture. Le rôle du condensateur ainsi disposé a été expliqué de plusieurs façons. Voici l'explication donnée par M. le D^r *Oliver Lodge* ⁽¹⁾, et qui nous paraît la plus conforme aux idées actuelles sur les phénomènes d'induction. Elle s'applique au cas où le circuit secondaire est ouvert, dans le but d'obtenir la plus grande longueur d'étincelle possible. La rupture du circuit primaire consiste à séparer deux contacts métalliques par une couche isolante. Mais la simple couche d'air interposée est plus facilement franchie par l'étincelle de rupture qui prolonge ainsi sa durée, et ne la fait cesser que graduellement. Le mode de rupture a d'ailleurs une grande influence sur la durée de l'interruption : une rupture par glissement donne de mauvais résultats, une séparation de surfaces dures est meilleure, et l'interruption est encore plus franche si la couche isolante est de l'alcool ou tout autre diélectrique difficilement traversé par l'étincelle ; c'est là le principal avantage des interrupteurs à mercure, et si l'alcool pouvait y être introduit sous une grande pression, de façon à s'intercaler plus vite entre les points de contact, on améliorerait encore l'interruption. Mais le moyen le plus rapide d'interrompre un courant par la rupture du contact entre deux pièces métalliques consiste à produire cette interruption entre les pôles d'un aimant puissant. L'extra-courant est alors bruyant, et l'étincelle du courant secondaire atteint une longueur étonnante, même sans l'emploi d'un condensateur quelconque.

Aucun de ces moyens ne peut cependant arrêter le courant d'une manière brusque, pas plus qu'un courant d'eau ne peut être brusquement arrêté par la fermeture rapide d'un robinet. Tout arrêt de cette nature est forcément accompagné d'un choc

(1) Voy. *The Electrician*, juin 1889 et *l'Électricien* du 29 juin 1889, n° 324. p. 409.

violent. Mais si un piston élastique, un ressort et un tampon est disposé pour amortir le choc, l'énergie du courant, au lieu d'être rapidement dissipée, est emmagasinée et dépensée progressivement en mouvements de va-et-vient du piston ou du ressort. Un condensateur est analogue à un tampon élastique ; il emmagasine l'énergie de l'extra-courant dans des conditions favorables et la restitue, non seulement en arrêtant le courant, mais encore en en changeant le sens. Un condensateur de capacité modérée correspondant à un ressort énergique, permettant aux pièces de contact de s'écarter d'une quantité appréciable, et de dissiper le reste de l'énergie de l'extra-courant dans la résistance offerte par l'étincelle. Plus la rupture mécanique du contact est rapide, plus la capacité du condensateur peut être réduite. La combinaison la plus parfaite consiste donc en un système d'interrupteur rapide shunté par un condensateur de petite capacité.

On peut aussi remarquer qu'une faible self-induction du circuit primaire a l'avantage de diminuer l'étincelle de rupture. Au lieu d'employer une pile de grande force électromotrice et un circuit primaire renfermant un grand nombre de spires, il vaut mieux utiliser un courant intense produit par un accumulateur de faible résistance intérieure en augmentant en proportion l'intensité du courant. Si l'on réalise une rupture satisfaisante à circuit secondaire ouvert, il en sera de même *a fortiori* lorsque le circuit secondaire sera fermé.

Noyau de fer. — Le but principal du noyau de fer est d'augmenter le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits. Un faisceau de fils de fer est, toutes choses égales d'ailleurs, plus efficace qu'un noyau plein parce qu'il s'aimante plus rapidement et n'est pas le siège de courants de Foucault.

Un circuit magnétique fermé serait moins avantageux qu'un circuit magnétique ouvert dans une bobine agissant par interruptions périodiques du circuit inducteur : les phénomènes d'hystérésis (397) limiteraient les variations d'aimantation du noyau et rendraient son action moins efficace. Cet inconvénient se trouve considérablement atténué avec les courants *alternatifs*.

Cloisonnement. — Lorsque la bobine doit produire des ten-

sions élevées, il faut isoler soigneusement les spires entre elles et les placer à des distances géométriques d'autant plus grandes que leurs différences de potentiel sont plus élevées. Ces conditions sont réalisées en employant des bobines cloisonnées de *Poggendorff* (1850) formées d'une série de disques ou de gallettes séparées entre elles par des cloisons verticales isolantes en ébonite ou en mica, et couplées en tension. On obtient ainsi un meilleur isolement qu'en roulant des couches successives.

Graduateurs. — Dans certaines bobines d'induction employées en médecine, on interpose entre le noyau et le circuit primaire ou entre les deux circuits un tube de cuivre ou de laiton appelé *graduateur*, et que l'on enfonce plus ou moins suivant les effets à produire.

Ce graduateur constitue une seconde bobine induite, de faible résistance et réagissant par sa présence sur le circuit primaire et sur le circuit secondaire. L'établissement du courant de fermeture est favorisé, tandis que le courant de rupture se trouve prolongé. Le circuit a donc pour effet d'égaliser les durées et, par suite, les intensités moyennes des deux courants induits. C'est pour cette raison que les effets physiologiques qui dépendent du maximum de E se font moins sentir lorsque le graduateur est enfoncé dans la bobine que lorsqu'il en est retiré.

Les durées si inégales des courants de rupture et de fermeture font que leurs tensions sont inégales, le courant de rupture ayant moins de durée et plus de tension que le courant de fermeture. Cette propriété est utilisée pour charger des jarres ou des condensateurs à l'aide de la bobine d'induction.

En établissant un condensateur en dérivation entre les deux bornes du circuit induit d'une bobine, le condensateur se charge et ne donne une étincelle que lorsque son potentiel correspond à la distance explosive des deux points entre lesquels l'étincelle peut jaillir. Cette disposition modifie le caractère de l'étincelle qui devient moins grêle, plus nourrie mais moins longue. Pour éviter que l'étincelle n'éclate à l'intérieur du condensateur, il est bon de le former d'une série de bouteilles de Leyde montées en cascade (131).

La durée du contact et le réglage de cette durée de contact.

ont la plus grande influence sur le courant induit ou sur la longueur de l'étincelle. Si le contact est trop court, le flux de force n'a pas le temps d'atteindre sa valeur maxima et le courant induit est faible. Si la durée du contact est trop grande, le courant inducteur passe et se dissipe en pure perte et se dissipe intégralement en chaleur à partir du moment où le flux de force inducteur arrivé à son maximum ne subit plus de variation.

Effets des courants de la bobine d'induction. — Si l'on suppose le circuit secondaire fermé sur une résistance constante, la quantité d'électricité induite pendant la fermeture du circuit primaire sera égale à celle produite par la rupture du circuit primaire.

En représentant par une courbe les deux courants induits en fonction du temps porté en abscisses et les intensités en ordonnées, les deux surfaces limitées par l'axe des temps et les courbes seront égales, bien que les valeurs à chaque instant comptées à partir de l'ouverture ou de la fermeture, ramenées à une époque commune, soient différentes. Ces différences des propriétés des courants induits de fermeture et de rupture conduisent à distinguer les effets de la bobine d'induction suivant le facteur qui joue le rôle prépondérant.

1° Effets dépendant de $\int Idt$, ou de la quantité d'électricité traversant le circuit. Ce sont, par exemple, les effets galvanométriques et électrolytiques ;

2° Effets dépendant de $\int I^2 dt$, ou de la quantité d'énergie apparaissant dans le circuit secondaire. Ce sont les effets calorifiques ;

3° Effets dépendant du maximum de E ou effets physiologiques. Ils sont d'autant plus intenses que le circuit secondaire renferme un plus grand nombre de spires et que les variations de flux sont plus rapides.

4° Effets dépendant du maximum de I . On peut citer comme exemple l'aimantation d'un noyau de fer placé à l'intérieur d'une bobine traversée par le courant secondaire.

La bobine d'induction a été utilisée dans un grand nombre de recherches scientifiques sur les propriétés des gaz et des vapeurs raréfiées, la spectroscopie, la production de l'ozone, la décomposition des composés gazeux, etc. L'examen des propriétés des courants de haute tension produits par la bobine

d'induction sortirait du cadre que nous nous sommes tracé.

En dehors des nombreuses recherches scientifiques pour lesquelles elle a été un précieux auxiliaire, la bobine de Ruhmkorff est appliquée à l'inflammation des mines, à l'inflammation des gaz pour les becs d'éclairage, aux moteurs, aux analyses eudiométriques, comme moyen de pointage et d'inscription dans certains enregistreurs, pour la production des dessins, à l'éclairage des cavités du corps humain et des galeries des mines ⁽¹⁾, etc. Nous nous contentons de mentionner ici ces applications, nous réservant de décrire celles qui présentent un intérêt industriel dans le volume consacré aux applications.

487. Balance d'induction de Hughes (1879). — Nous avons déjà signalé (467) les propriétés des écrans d'induction et indiqué comment ils modifient à la fois le courant inducteur et le courant induit. M. *Hughes* a réalisé, sous le nom de *balance d'induction*, un ingénieux appareil qui permet de montrer facilement les effets produits par ces écrans d'induction ⁽²⁾.

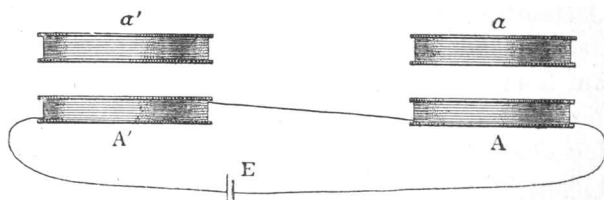


Fig. 231. — Balance d'induction de Hughes.

Cet appareil (fig. 231) se compose de deux paires de bobines égales mises en regard à des distances égales. Les bobines A et A' sont mises en circuit sur une pile E avec un interrupteur intercalé dans le circuit : les bobines a et a' sont montées en circuit avec un téléphone. Les forces électromotrices induites par A dans a sont, par raison de symétrie, égales aux forces électromotrices induites par A' dans a' ; le courant traversant le téléphone restera donc constamment nul, et le téléphone

⁽¹⁾ Les lampes à incandescence dans le vide ont fait disparaître depuis peu cette dernière application.

⁽²⁾ *Proceedings of the Royal society*, 5 mai 1879.

restera muet si les bobines sont bien symétriquement disposées et ce résultat est obtenu pratiquement en donnant un léger déplacement à l'une des bobines a ou a' . Si l'on vient intercaler entre l'une des paires de bobines une substance métallique quelconque, elle perturbera l'équilibre, soit en réduisant la résistance magnétique du circuit et en augmentant l'action de la bobine dans laquelle elle est intercalée, soit en agissant comme un écran d'induction et détruisant ainsi la symétrie. C'est un effet que l'on peut équilibrer en disposant dans la seconde paire de bobines un écran semblable, de mêmes formes, de mêmes dimensions, de même composition chimique et de même état physique. Cet écran pourra d'ailleurs produire une action négative, c'est-à-dire favoriser l'induction dans la paire de bobines où il est placé, au lieu de la contrarier. La balance d'induction constitue un intéressant appareil de recherches *qualitatives*, mais sa théorie est trop complexe pour qu'on ait pu l'utiliser jusqu'ici au point de vue *quantitatif*.

Nous trouverons dans le chapitre suivant, consacré à l'étude des *courants alternatifs*, un certain nombre d'applications des phénomènes d'induction mutuelle.

CHAPITRE XVI

COURANTS ALTERNATIFS

488. Définitions. — Nous n'avons considéré jusqu'ici que les générateurs électriques donnant une force électromotrice constante ou sensiblement telle. Nous savons cependant que certains générateurs (267) peuvent fournir des courants *périodiques alternatifs*.

Ces appareils ont pris, pendant ces dernières années, une importance industrielle considérable, et les phénomènes qu'ils produisent semblent, *a priori*, échapper aux lois qui régissent les courants continus. Il n'est donc pas inutile de leur consacrer un chapitre spécial, afin d'établir leurs propriétés générales et de résoudre, à titre d'exemples, quelques problèmes particuliers qui nous seront très utiles dans les applications industrielles.

Considérons, pour fixer les idées, un courant périodique de forme quelconque, passant par les mêmes valeurs à intervalles réguliers et ne pouvant avoir à chaque instant qu'une valeur et une seule.

Si nous portons les temps en abscisses et les intensités correspondantes à chaque instant en ordonnées, nous obtiendrons une courbe pour laquelle il n'y aura qu'une valeur de y pour chaque valeur de x .

Si compliquée que soit cette courbe, *Fourier* a démontré qu'elle peut être analytiquement représentée par la somme algébrique d'une série de termes dont le premier est une constante et les autres le sinus ou le cosinus d'un angle multiplié par une constante. Le cas le plus simple est celui dans lequel on néglige tous les termes de la série, sauf le premier.

L'expérience a démontré que cette simplification est pratiquement légitime, car la plupart des machines donnent des forces électromotrices et des courants dont la forme s'écarte très peu d'une sinusoïde. Les résultats obtenus par cette simplification s'appliqueront en toute rigueur aux machines qui serviront seulement de première approximation faisant prévoir le sens et la grandeur approximative des effets pour les machines qui s'en écartent sensiblement.

Nous avons déjà vu (267) que si on appelle

E_{\max} la force électromotrice maxima d'un générateur que nous appellerons, pour simplifier le langage, *générateur périodique simple*,

T le temps périodique,

$\frac{1}{T}$ la *fréquence*, c'est-à-dire le quotient du nombre de périodes par le temps mis à les produire,

E_t la force électromotrice à l'instant t ,

t le temps compté à partir de l'origine, on a

$$E_t = E_{\max} \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

et, en posant $\frac{2\pi}{T} = \omega$, la formule s'écrit (1)

$$E_t = E_{\max} \sin \omega t. \quad (1)$$

Nous avons déjà examiné le cas où un générateur dont la force électromotrice obéit à cette loi est fermé sur une résistance totale R . Nous allons rappeler rapidement les résultats obtenus en les reproduisant avec les noms nouveaux adoptés par le *Congrès international des Electriciens de 1889*.

489. Générateur périodique simple agissant sur une résistance constante sans self-induction. — L'intensité I_t à l'instant t a pour valeur

$$I_t = \frac{E_t}{R} = \frac{E_{\max}}{R} \sin \omega t.$$

(1) Nous prenons le symbole ω pour l'expression $\frac{2\pi}{T}$ parce que cette expression est homogène à une vitesse angulaire. ω est aussi égal à 2π fois la fréquence, ou à 2π fois le nombre de périodes par seconde.

Bien que, *théoriquement*, la force électromotrice moyenne et l'intensité moyenne produites par un courant périodique soient nulles, on désigne ordinairement par ces noms les valeurs respectives des intégrales de $\int E_t dt$ et $\int I_t dt$ prises pour une demi-période et divisées par la demi-période. On a alors

$$\text{Force électromotrice moyenne : } E_{\text{moy}} = \frac{2}{\pi} E_{\text{max}} = 0,6366 E_{\text{max}}.$$

$$\text{Intensité moyenne : } I_{\text{moy}} = \frac{2}{\pi} I_{\text{max}} = 0,6366 I_{\text{max}}.$$

On appelle *force électromotrice efficace* ⁽¹⁾ la racine carrée de la moyenne des carrés de la force électromotrice.

On appelle *intensité efficace* ⁽¹⁾ la racine carrée de la moyenne des carrés de l'intensité. On a alors

$$\text{Force électromotrice efficace : } E_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_{\text{max}} = 0,707 E_{\text{max}}.$$

$$\text{Intensité efficace : } I_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{\text{max}} = 0,707 I_{\text{max}}.$$

La *puissance moyenne* est le produit de la force électromotrice efficace par l'intensité efficace :

$$P_{\text{moy}} = E_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}.$$

La *quantité d'électricité efficace* est, en étendant les décisions du Congrès, l'intégrale, pendant un temps donné, de l'intensité efficace. C'est le facteur qui, multiplié par la force électromotrice efficace, donne la valeur de l'*énergie électrique* fournie au circuit. Ce facteur diffère de la quantité *réelle* d'électricité qui a traversé le circuit pendant le même temps lorsqu'on suppose le courant toujours de même sens. La quantité efficace est plus grande que la quantité réelle, I_{eff} étant plus grand que I_{moy} .

490. Générateur périodique simple agissant sur un circuit de résistance constante ayant un coefficient de self-induction constant. — Le cas précédent est purement théorique, car il est impossible de concevoir un générateur électrique dont le coefficient de self-induction soit nul. Dans certains cas, cependant, lorsque le circuit d'utilisation

(1) Noms adoptés par le *Congrès international des Électriciens* de 1889. E_{eff} est ce que nous avons désigné jusqu'ici par le symbole $\sqrt{(E^2)_{\text{moy}}}$, et I_{eff} est $\sqrt{(I^2)_{\text{moy}}}$.

se compose de lampes à incandescence ou de résistances sans self-induction appréciable, et qu'au lieu de considérer les forces électromotrices totales on ne fait intervenir que les différences de potentiel aux bornes des résistances sans self-induction, les formules précédentes sont applicables. Elles se trouvent considérablement modifiées, au contraire, lorsque le coefficient de self-induction du circuit n'est pas nul ou négligeable. Dans ce cas, il se développe une force électromotrice de self-induction opposée à chaque instant à la force électromotrice du générateur périodique simple et qui a pour valeur, en appelant L le coefficient de self-induction du circuit,

$$-L \frac{dI}{dt}.$$

On a alors pour valeur de l'intensité à l'instant t

$$I_t = \frac{E_t - L \frac{dI_t}{dt}}{R}.$$

D'où l'on tire, en remplaçant E_t par sa valeur (488)

$$E_{\max} \sin \omega t = L \frac{dI_t}{dt} + RI_t.$$

Cette équation différentielle linéaire intégrée ⁽¹⁾ donne, en négligeant un terme constant qui devient nul lorsque le régime est établi,

$$I_t = \frac{E_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t - \varphi)$$

avec la condition

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi L}{RT} = \omega \frac{L}{R}.$$

L'effet de la self-induction est de *diminuer* l'intensité du courant et de produire un *décalage* ⁽²⁾, un *retard* du maximum

⁽¹⁾ MASCART et JOUBERT, t. I, p. 582.

⁽²⁾ Nous nous permettons d'introduire cette expression abrégée et figurative à la place de *différence de phase*, expression plus longue et généralement moins comprise.

de I sur le maximum de E . Le radical $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ porte le nom de *résistance apparente* du circuit (1). On a évidemment

$$I_{\text{moy}} = \frac{E_{\text{moy}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}.$$

Lorsque la machine tourne très vite, que la résistance du circuit est faible et que le coefficient de self-induction est grand, R^2 devient négligeable devant $\omega^2 L^2$ et la formule donnant I devient

$$I_t = \frac{E_{\text{max}}}{\omega L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

car $\varphi = \frac{\pi}{2}$, valeur indépendante de R . Le retard est alors égal au quart de la période.

Puissances. — Dans le cas particulier, il y a à considérer trois puissances distinctes :

1° La puissance *produite* à l'instant t par le générateur qui a pour valeur $E_t I_t$;

2° La puissance *dépensée* à l'instant t dans le circuit sous forme de chaleur et qui a pour valeur $R I_t^2$;

3° La puissance *moyenne* produite par le générateur, puissance qui, en vertu du principe de la conservation de l'énergie, est égale à la puissance moyenne dissipée dans le circuit sous forme de chaleur.

Les expressions algébriques des deux premières puissances sont très compliquées; la troisième est donnée par l'une de trois formules suivantes, en considérant une demi-période :

$$P_{\text{moy}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E_t I_t dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} R I_t^2 dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{E_t^2}{R} dt.$$

La première expression donne la valeur de la puissance moyenne comme égale à la moyenne du produit de deux sinusoides décalées, l'une par rapport à l'autre, d'un angle φ . On démontre dans l'étude des fonctions périodiques que la valeur

(1) La résistance apparente porte, en Angleterre, le nom d'*impedance*.

moyenne du produit de deux fonctions périodiques simples de même période, mais d'amplitudes et de phases différentes, est égale à la moitié du produit de leur valeur maxima par le cosinus de leur différence de phase. Lorsque les deux fonctions périodiques sont décalées, l'une par rapport à l'autre, d'un quart de période, le produit moyen est nul.

Nous aurons donc, dans le cas particulier,

$$P_{\text{moy}} = \frac{E_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}}}{2} \cos \varphi,$$

et, en tenant compte des relations de E_{max} et I_{max} avec E_{eff} et I_{eff} ,

$$P_{\text{moy}} = E_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi.$$

Il faut donc connaître l'angle φ pour mesurer la puissance moyenne dépensée dans un circuit inductif, lorsqu'on a déterminé la force électromotrice efficace et l'intensité efficace. Dans un circuit sans self-induction, le décalage est nul et l'on retombe sur les formules établies dans le paragraphe précédent.

La puissance moyenne a aussi pour valeur, en tenant compte des relations entre la résistance et l'intensité,

$$P_{\text{moy}} = R I_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{2} \frac{R E_{\text{max}}^2}{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

Cette puissance moyenne varie avec la résistance du circuit et son coefficient de self-induction. Elle passe par un maximum correspondant à

$$R = \omega L$$

et a pour valeur

$$P_{\text{moy.max}} = \frac{E_{\text{max}}^2}{4R} = \frac{E_{\text{eff}}^2}{2R}.$$

Le décalage correspondant est donné par la relation

$$\text{tg } \varphi = \omega \frac{L}{R}; \quad R = \omega L; \quad \text{tg } \varphi = 1.$$

Le décalage est égal au huitième de la période.

La puissance produite et la puissance dissipée à chaque instant ont pour expression des formules compliquées qui n'ap-

prennent rien sur les variations. Il vaut mieux avoir recours à la méthode graphique, en construisant les sinusoïdes représentant E_t et I_t , et en en déduisant, par construction, les courbes représentant les puissances.

Ces courbes ont été construites sur nos indications en décembre 1886, par MM. Blanchet, Chappaz et Jordan, alors élèves de l'École de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris ⁽¹⁾, dans l'hypothèse d'un système fonctionnant dans les conditions suivantes :

$$E_{\max} = 100 \text{ volts; } R = 1 \text{ ohm; } T = 0,01 \text{ seconde;}$$

$$L = \frac{0,01}{2\pi} \text{ quadrant.}$$

Ces valeurs numériques sont telles que le générateur travaille dans les conditions de puissance moyenne maxima, avec un décalage égal au huitième de la période :

$$R = \omega L = 1 \text{ ohm; } \varphi = \frac{\pi}{4} \text{ radians.}$$

Dans la figure 232 les temps sont portés en abscisses et les valeurs correspondantes de I_t , E_t , $E_t I_t$, RI_t^2 en ordonnées ⁽²⁾. En étudiant les courbes représentant les valeurs de EI et RI^2 pour une période complète à partir de l'abscisse $\frac{1}{8}$ pour laquelle $I = 0$, on voit que depuis $\frac{1}{8}$ jusqu'à $\frac{3}{8}$ (un quart de période) la puissance produite EI est *plus grande* que la dépense RI^2 dans le circuit. La différence entre l'énergie produite et l'énergie dépensée pendant ce quart de période a été emmagasinée pour créer un flux de force dans la partie du circuit qui présente de la self-induction. La valeur de cette énergie est à chaque instant

$$W_t = \frac{1}{2} \Phi I_t = \frac{1}{2} L I_t^2.$$

Entre les époques $\frac{3}{8}$ et $\frac{5}{8}$ de la période, la dépense RI^2 dé-

(1) Voy. l'Électricien du 19 février 1887, n° 201, p. 113-118.

(2) Les indices (t) ont été supprimés sur la figure pour simplifier l'écriture.

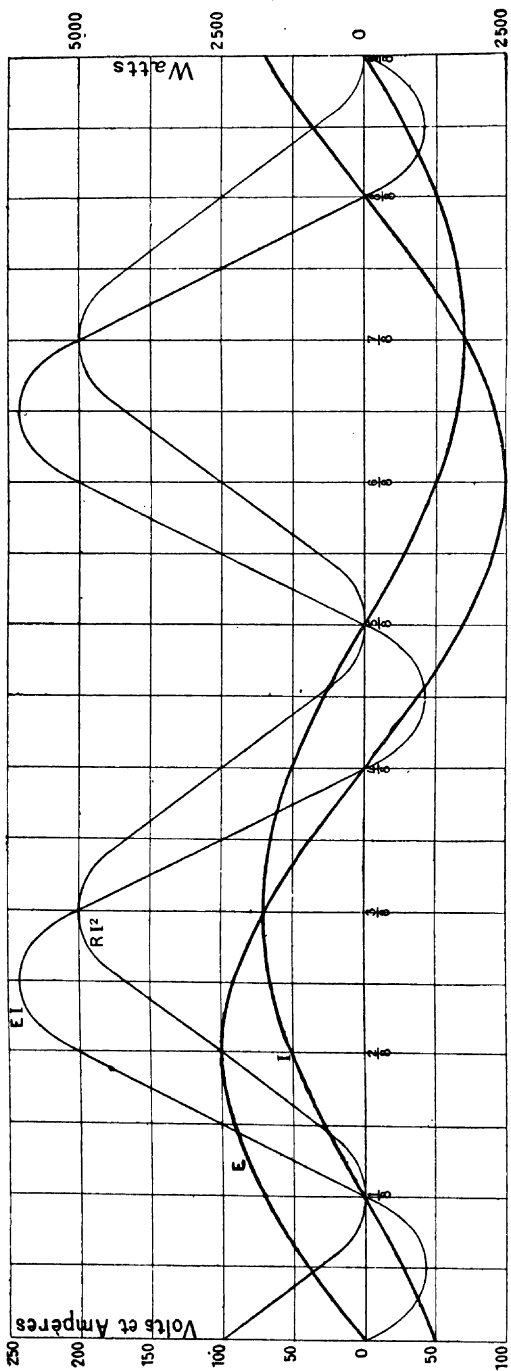


Fig. 232. — Variations des éléments de fonctionnement en fonction du temps d'un générateur périodique simple agissant sur un circuit dont le coefficient de self-induction est constant.

E , force électromotrice à chaque instant. — I , intensité correspondante. — EI , puissance *produite* par la machine à chaque instant. Elle est négative deux fois par période, RI^2 , puissance *dépendue* à chaque instant dans le circuit.

passé la production EI . Entre $\frac{4}{8}$ et $\frac{5}{8}$ la puissance produite par le générateur est même *négative*, c'est-à-dire qu'il fonctionne alors comme *moteur*, aux dépens de l'énergie préalablement emmagasinée pour créer le flux. Les mêmes phénomènes se reproduisent identiquement dans la deuxième demi-période comprise entre les époques $\frac{5}{8}$ et $\frac{9}{8}$, et ainsi de suite.

M. Abdank-Abakanowicz a bien voulu intégrer, à l'aide de son ingénieux appareil, les courbes EI et RI^2 de la puissance

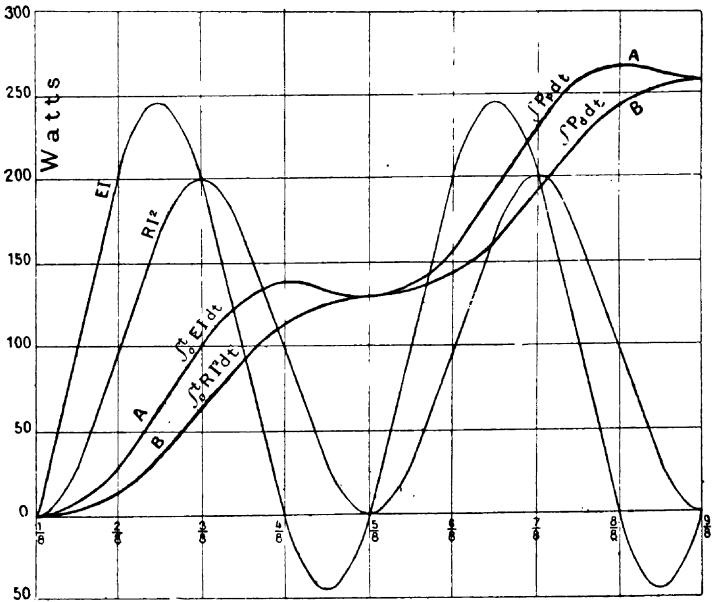


Fig. 233. — Variations de l'énergie produite et dépensée par un générateur périodique simple agissant sur un circuit présentant de la self-induction.

produite et de la puissance dépensée en fonction du temps pendant une période complète. Les courbes en gros traits de la figure 233 montrent les résultats de cette double intégration et font encore mieux saisir que les courbes de puissance les actions successives d'emmagasinement et de restitution d'énergie dues à la self-induction.

La courbe $\int P dt$ (A) a ses ordonnées proportionnellement au tra-

vail électrique produit par la machine depuis l'origine complète à partir de l'époque $\frac{1}{8}$; la courbe $\int P_d dt$ (B) donne les valeurs correspondantes du travail dépensé en chaleur. La différence des ordonnées des deux courbes donne l'énergie emmagasinée à chaque instant, sous forme de flux de force dans la partie du circuit présentant de la self-induction. On remarque que les deux courbes ont un point commun après chaque demi-période, et au moment même où l'intensité du courant passe par zéro, ce qui est d'accord avec le principe de la conservation de l'énergie, puisqu'à ce moment toute l'énergie emmagasinée a été restituée, et que l'énergie produite par la machine entre deux demi-périodes n'a pu que se transformer intégralement en chaleur dans le circuit.

491. Générateur périodique simple actionnant un transformateur à coefficients d'induction constants.

— Nous supposons, pour simplifier les calculs, que le transformateur est constitué par deux bobines fixes dans l'espace et placées dans un milieu de perméabilité magnétique invariable, de façon à rendre les coefficients d'induction constants. Soient

R_1 la résistance *totale* du circuit primaire, comprenant le générateur et le transformateur ;

L_1 le coefficient de self-induction du circuit primaire ;

R_2 la résistance *totale* du circuit secondaire ;

L_2 son coefficient de self-induction ;

L_m le coefficient d'induction mutuelle des deux circuits ;

i_1 et i_2 les intensités à l'instant t dans chacun des circuits ;

φ_1 , φ_2 les décalages correspondants de l'intensité du courant dans chaque circuit par rapport à la force électromotrice du circuit primaire.

Lorsque le régime est établi, les deux courants sont évidemment périodiques et peuvent être représentées par les formules générales

$$i_1 = A_1 \sin(\omega t - \varphi_1) = \frac{E_{1. \max}}{\rho_1} \sin(\omega t - \varphi_1),$$

$$i_2 = A_2 \sin(\omega t - \varphi_2) = \frac{E_{1. \max}}{\rho_2} \sin(\omega t - \varphi_2),$$

ρ_1 et ρ_2 étant les résistances apparentes des deux circuits, déterminées par la condition que, à un instant quelconque t , les valeurs de E_t , i_1 et i_2 satisfassent aux deux équations différentielles simultanées

$$L_m \frac{di_2}{dt} + L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 - E_t = 0,$$

$$L_m \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = 0,$$

qui donnent pour valeurs de ρ_1 et ρ_2

$$\rho_1 = \sqrt{r^2 + l^2 \omega^2}, \quad \rho_2 = \rho_1 \frac{\sqrt{R_2^2 + L_2^2 \omega^2}}{L_m \omega};$$

avec les conditions

$$\frac{2\pi}{T} = \omega, \quad \frac{4\pi^2}{T^2} = \omega^2; \quad \text{tang } \varphi_1 = \frac{l\omega}{r}, \quad \text{tang } \varphi_2 = \frac{\omega^2 L_2 l - R_2 r}{\omega r L_2 + R_2 l};$$

$$r = R_1 + R_2 \frac{L_m^2 \omega^2}{R_2^2 + L_2^2 \omega^2}, \quad l = L_1 - L_2 \frac{L_m^2 \omega^2}{R_2^2 + L_2^2 \omega^2}.$$

Lorsque R_2 est infini, les équations se réduisent à celles déjà établies pour le cas d'un générateur périodique agissant sur un circuit ne présentant que de la self-induction (310).

Les puissances à l'instant t sont :

a. Puissance totale fournie au transformateur $e_{1t} i_{1t}$.

b. Puissance dépensée dans le circuit primaire $R_1 i_1^2$.

c. Puissance dans le circuit secondaire $R_2 i_2^2$.

d. La différence entre a et $(b+c)$ représente la puissance nécessaire à chaque instant pour faire varier le flux d'induction. Cette puissance est positive lorsque ce flux augmente et négative lorsqu'il diminue, et restitue l'énergie emmagasinée pendant la période d'accroissement du flux.

Les puissances moyennes sont au nombre de quatre :

a. Puissance moyenne totale fournie au transformateur.

b. — — dépensée dans le circuit primaire.

c. — — dépensée dans le circuit secondaire.

d. — — emmagasinée dans le flux, toujours nulle pour un nombre entier de périodes.

Toutes ces quantités ont des expressions complexes qui ne se

prêtent pas facilement à la discussion : la méthode graphique permet de se rendre assez facilement compte des variations de ces différents facteurs en fonction de la résistance extérieure. Les courbes que nous reproduisons ci-dessous ont été tracées par M. Ch. Jacquïn (1), en prenant pour exemple numérique un transformateur théoriquement parfait dont les constantes de construction sont indiquées ci-après. Bien qu'il soit impossible de réaliser un transformateur *sans fer* dont les coefficients d'induction soient aussi élevés, les chiffres ont été choisis dans le but de se rapprocher des conditions ordinaires d'un transformateur employé en pratique, transformateur parfait dans lequel la perméabilité magnétique du noyau serait élevée et constante, et qui ne serait le siège d'aucun phénomène d'hystérésis ni de courants de Foucault.

Résistance du circuit primaire.	$R_1 = 1$ ohm.
Coefficient de self-induction du circuit primaire	$L_1 = 4$ quadrants.
Résistance intérieure du circuit second- aire	$r_2 = 0,01$ ohm.
Coefficient de self-induction du circuit secondaire	$L_2 = 0,04$ quadrant.
Coefficient d'induction mutuelle des deux circuits	$L_m = 0,4$ —
Coefficient de transformation.	10
Force électromotrice efficace du circuit primaire.	$E_{\text{eff}} = 1000$ volts.
Durée de la période.	$T = 0,0198$ seconde.

(T est choisi de tel façon que $\omega^2 = \left(\frac{2\pi L}{T}\right)^2 = 100\,000$.)

La figure 234 montre comment varient les valeurs moyennes des intensités, des puissances moyennes et des décalages en fonction de la résistance totale du circuit secondaire R_2 .

Les intensités, qui sont énormes lorsque le circuit secondaire est presque fermé, vont constamment en diminuant : de plus l'intensité I_2 , qui, en court-circuit, est juste 10 fois l'intensité

(1) *Étude théorique des transformateurs. Électricien, 1888.*

primaire I_1 , ne cesse de s'écarter de ce rapport à mesure que R_2 croît. En circuit ouvert, soit $R_2 = \infty$;

$$I_{1,\text{eff}} = 0,79 \text{ ampère}; \quad I_{1,\text{eff}} = 0.$$

Les puissances P_1 et P_2 dépensées dans les circuits primaire et secondaire décroissent également à mesure que la résistance R_2 du circuit secondaire croît.

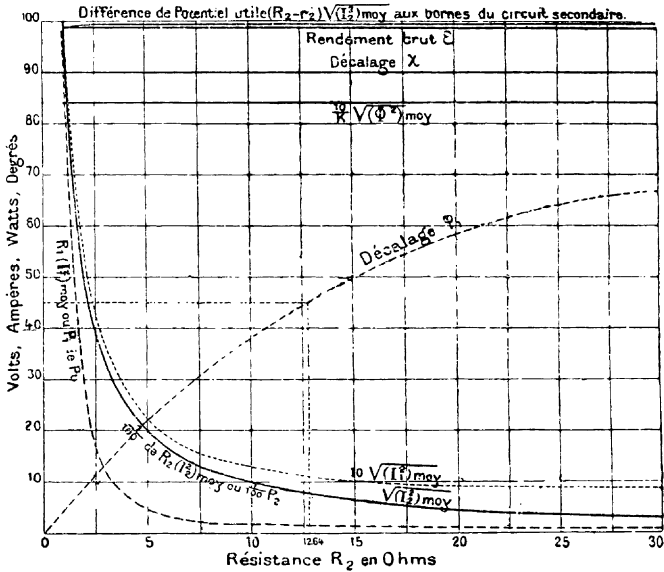


Fig. 234. — Variation des éléments de fonctionnement d'un transformateur en fonction de la résistance du circuit secondaire.

La puissance utile dans le circuit secondaire n'a pas été représentée parce qu'elle se confondrait dans toutes les parties tracées avec la puissance totale P_2 dépensée dans le circuit secondaire. Ce n'est que dans le voisinage du court-circuit que les deux courbes diffèrent.

Nous n'avons de même représenté que le rendement brut ϵ , le rendement réel ϵ' se confondant aussi, dans toute l'étendue des courbes tracées, avec ϵ ; ils diffèrent pourtant un peu au début. Le rendement brut ϵ , qui est de 50 p. 100 en court-circuit, croît rapidement, puis lentement, atteint son maximum de 99,8 p. 100 pour $R_2 = 12,64$ ohm et décroît ensuite très len-

tement. Le rendement réel ε' se comporte comme l'autre, mais il est nul pour $R_2 = r_2 = 0,01$ ohm, et son maximum de 99,7 pour 100 n'a lieu que pour $R_2 = 17,89$ ohms. Mais ces deux rendements ne varient pas de 1 pour 100 et ne diffèrent pas de 1 pour 100 entre 1 ohm et 30 ohms, tout en ayant toujours une valeur supérieure à 99 pour 100.

La différence de potentiel utile $(R_2 - r_2) I_{2,\text{eff}}$ aux bornes du circuit secondaire qui est nulle pour $R_2 = r_2 = 0,01$ ohm, croît très rapidement et à partir de 2 ohms reste constante et égale à 99,8 volts, nombre différant très peu de $E_{2,\text{eff}} = 100$ volts. Ce fait explique pourquoi les transformateurs sont des appareils éminemment propres à la distribution, puisqu'il suffit d'alimenter le circuit primaire par une différence de potentiel efficace constante pour que la différence de potentiel aux bornes du circuit secondaire reste constante, *quel que soit le débit de ce circuit secondaire.*

La courbe du flux de force efficace $\sqrt{(\Phi^2)_{\text{moy}}}$ nous montre un fait curieux, savoir, que le flux, nul pour $R_2 = r_2$, reste constant à partir de $R_2 = 0,1$ ohm, bien que la formule le représente comme la somme de deux grandeurs constamment décroissantes ; ce résultat s'explique facilement si l'on remarque que le décalage entre I_1 et I_2 diminue lorsque R_2 croît. Le flux de force restant constant, il s'ensuit que les coefficients d'induction resteront eux-mêmes constants, comme nous l'avons supposé.

Les intensités primaire et secondaire de la f. é. m. secondaire et le flux de force sont toutes représentées par des sinusoïdes décalées d'un certain angle par rapport à la sinusoïde qui exprime la force électromotrice primaire. Voyons comment varient ces angles de décalage avec la résistance R_2 du circuit secondaire.

Le décalage φ_1 entre l'intensité primaire I_1 et la f. é. m. primaire E_1 est presque nul pour $R_2 = r_2 = 0,01$ ohm. A mesure que le circuit secondaire augmente de résistance, φ_1 augmente et en circuit ouvert, il atteint presque un quart de période.

Le décalage de E_2 sur E_1 est sensiblement égal à la demi-période ; il est d'ailleurs indépendant de la résistance R_2 .

Quoique dépendant de R_2 , on trouve que le décalage φ_2 entre

l'intensité secondaire I_2 et la f. é.m. primaire E_1 reste sensiblement égal à une demi-période, quelle que soit la résistance R_2 du circuit secondaire. Par conséquent, il n'existe jamais de décalage appréciable entre l'intensité I_2 et la force électromotrice E_2 du circuit secondaire; ce fait résulte de ce que le coefficient de self-induction du circuit secondaire L_2 a été pris très faible (0,04 quadrant).

Enfin le flux de force Φ est toujours décalé de un quart de période, quelle que soit la résistance R_2 du circuit secondaire.

Les courbes de la figure 235 représentent les variations des éléments de fonctionnement en fonction du temps. Elles se rapportent au même transformateur, dont la résistance du circuit secondaire

$$R_2 = 12,64 \text{ ohms.}$$

Ce cas considéré correspond aux valeurs suivantes :

$$\text{Rendement } \varepsilon \text{ maximum} = 99,8 \text{ pour } 100;$$

$$\text{Décalage } \varphi_1 = \frac{\pi}{4};$$

$$I_{1\text{eff}} = 1,11 \text{ ampères} \quad \text{ou} \quad A_1 = 1,544 \text{ ampères};$$

$$I_{2\text{eff}} = 7,89 \text{ ampères} \quad \text{ou} \quad A_2 = 11,17 \text{ ampères.}$$

Puissance moyenne dépensée dans le circuit primaire
 $P_1 = 1,2 \text{ watts.}$

Puissance moyenne secondaire $P_2 = 789,3 \text{ watts.}$

Puissance moyenne totale $P_t = 790,5 \text{ watts.}$

Rendement réel $\eta' = 99,6 \text{ pour } 100.$

Potentiel utile $(R_2 - r_2)I_{\text{eff}} = 99,92 \text{ volts.}$

L'intensité primaire I_1 présente un retard de un huitième de période sur la force électromotrice primaire E_1 ; c'est-à-dire que cette intensité possède encore à 0 une valeur négative et ne s'annule que un huitième de période après E_1 . La force électromotrice E_2 et l'intensité I_2 du circuit secondaire présentent le même décalage de une demi-période sur E_1 . Enfin le flux de force Φ se trouve décalé de un quart de période sur E_1 .

La force électromotrice E_2 et l'intensité I_2 du circuit secondaire ne présentant pas de décalage entre elles, les deux courbes de la puissance produite $E_2 I_2$ à chaque instant et celle de la puis-

sance dépensée $R_2 I_2^2$ à chaque instant coïncident complètement.

L'intensité et la f. é. m. dans le circuit primaire présentant au contraire un décalage de un huitième de période, la puissance dépensée $P_1 = R_1 I_1^2$, dans le circuit primaire se trouve

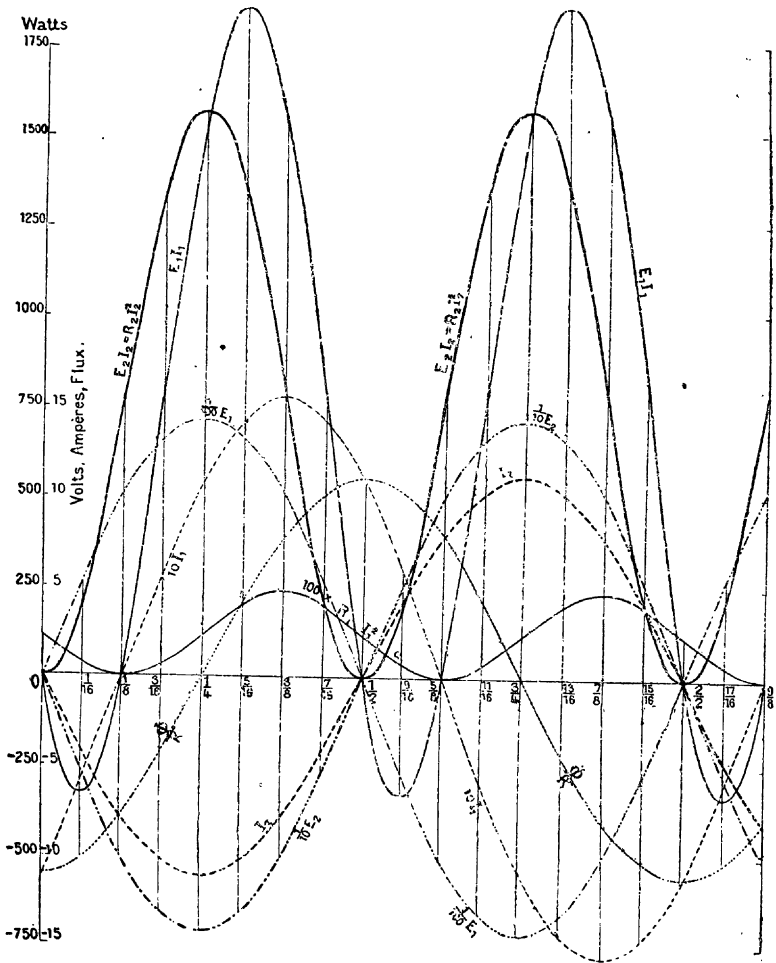


Fig. 235.

aussi décalée de un huitième de période sur E_1 . Mais cette puissance étant très faible (moins de 2 watts), il est inutile d'en tenir compte.

A cause du décalage de un huitième de période entre I_1 et

E_1 , la puissance totale produite $E_1 I_1$, à chaque instant n'est généralement pas égale à la puissance dépensée $E_2 I_2 = R_2 I_2^2$ à chaque instant dans le circuit secondaire.

Le flux est nul en $\frac{T}{4}$ parce que l'emmagasinement est nul, et en $\frac{T}{2}$ il est maximum parce qu'à ce moment l'emmagasinement est maximum. Depuis $\frac{T}{2}$ jusqu'à $\frac{3T}{4}$, la puissance dépensée est plus grande que la puissance produite, qui à un moment donné, de $\frac{T}{2}$ à $\frac{5}{8} T$, devient même négative, c'est-à-dire que la machine fonctionne *comme moteur*. L'énergie ainsi restituée est représentée par l'aire comprise à gauche entre les deux courbes et l'ordonnée considérée; cette énergie restituée entre $\frac{T}{2}$ et $\frac{3}{4} T$ est précisément égale à celle emmagasinée entre $\frac{T}{4}$ et $\frac{T}{2}$, c'est-à-dire que l'aire totale comprise à gauche entre les deux courbes est égale à l'aire totale comprise à droite.

Il n'existe que deux instants pour lesquels la puissance dépensée est égale à la puissance produite, lorsque le flux est nul ou maximum; or le décalage du flux étant toujours d'un quart de période, l'égalité se produira toujours pour $\frac{T}{4}$ et $\frac{T}{2}$.

492. Transformateur à noyau de fer. — Lorsque la perméabilité du milieu est variable, les formules établies ci-dessus, et qui se rapportent à un transformateur théorique parfait, ne sont plus vérifiées par l'expérience.

En 1886, M. G. Ferraris ⁽¹⁾ a exécuté un certain nombre de recherches au Laboratoire électrotechnique du musée de Turin dans le but de mesurer la différence de phase ou *décalage* existant entre les deux courants alternatifs, primaire et secondaire, d'un transformateur d'induction, et de voir comment variait le décalage avec les conditions de fonctionnement du

⁽¹⁾ *Memorie della Reale Accademie delle Scienze di Torino*, 1887. *Électricien du* 28 janvier 1888, n° 250.

transformateur, et plus spécialement avec les variations de résistance du circuit secondaire.

La comparaison des premiers résultats de l'expérience et ceux plus simples qu'on déduirait de la théorie élémentaire des transformateurs par induction ont mis subitement en évidence de notables différences entre la théorie et la pratique. Comme les différences constantes entre les relations montrées par l'expérience et celles déduites de la théorie élémentaire s'expliquent facilement en admettant que l'aimantation et la désaimantation du noyau s'effectuent avec un certain retard, et que ce retard doit dépendre essentiellement de la structure du noyau, M. G. Ferraris a été conduit à répéter plusieurs fois les mesures, en changeant chaque fois le noyau du transformateur.

Les expériences ont montré que les relations théoriques qu'on peut établir en tenant compte du retard aux variations d'aimantation du noyau, et du retard produit par les courants de Foucault, se trouvent en fait suffisamment vérifiées et résument bien, du moins à titre de première approximation, les propriétés principales des transformateurs. Ces relations sont utiles pour déterminer approximativement les conditions dont dépendent la production de chaleur dans le noyau et dans les parties métalliques de l'appareil, et offrent ainsi un critérium utile pour la détermination du rapport de l'énergie utilisable à celle inutilement dissipée dans le transformateur.

Les méthodes employées par M. Ferraris, pour étudier le retard d'aimantation, sont indiquées ci-après. Les conséquences de ce retard d'aimantation dans les transformateurs à noyau de fer seront étudiées dans le volume consacré aux applications industrielles.

493. Mesure de la différence de phases. — Si dans les deux circuits, fixe et mobile, d'un électrodynamomètre, on fait passer deux courants périodiques i_1 et i_2 dont la période T est très courte relativement à la durée d'oscillation de la spirale mobile, celle-ci tendra à tourner sous l'action d'un couple proportionnel à la valeur moyenne :

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt.$$

Si les conditions de construction de l'électrodynamomètre sont telles que les lectures soient proportionnelles aux couples, on aura en appelant δ la lecture et k une constante dépendant de l'appareil :

$$\delta = k \frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt.$$

Supposons les deux courants sinusoïdaux et posons

$$i_1 = I_1 \sin \omega t, \quad i_2 = I_2 \sin (\omega t - \varphi);$$

on aura alors :

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt = \frac{I_1 I_2}{2} \cos \varphi,$$

et, en représentant par k une nouvelle constante

$$\delta = k I_1 I_2 \cos \varphi. \quad (1)$$

Relation qu'on peut utiliser pour déterminer expérimentalement la différence de phase des deux courants, soit par trois lectures successives sur un seul et même électrodynamomètre, soit par trois lectures simultanées sur trois électrodynamomètres différents.

Première méthode. Les deux courants à déterminer sont représentés par les équations :

$$i_1 = A \sin \omega t, \quad i_2 = B \sin (\omega t - \varphi).$$

On fait une première lecture α en faisant passer le courant i_1 dans les deux circuits de l'électrodynamomètre :

$$I_1 = I_2 = A, \quad \varphi = 0.$$

On fait une deuxième lecture β en faisant passer le courant i_2 dans les deux circuits :

$$I_1 = I_2 = B, \quad \varphi = 0.$$

On fait une troisième lecture γ en faisant passer le courant i_1 dans le circuit fixe et le courant i_2 dans le circuit mobile :

$$I_1 = A, \quad I_2 = B,$$

La formule (1) appliquée aux trois expériences successives donne

$$\alpha = kA^2, \quad \beta = kB^2, \quad \gamma = kAB \cos \varphi.$$

d'où

$$\cos^2 \varphi = \frac{\gamma^2}{\alpha\beta}.$$

Comme l'introduction de l'électrodynamomètre dans les divers circuits modifie l'intensité moyenne et les phases du courant, il faut :

1° Substituer à chaque circuit de l'électrodynamomètre une bobine ayant même résistance et même coefficient de self-induction ;

2° Se rappeler que le décalage φ , mesuré lorsque l'électrodynamomètre est en circuit, est un peu différent de celui qu'on obtiendrait si cet instrument en était retiré. Cette seconde observation n'a pour but que de permettre de juger s'il est possible d'employer la méthode et de faire choix d'appareils mieux appropriés.

Deuxième méthode. Cette méthode exige l'emploi de trois électrodynamomètres. Le courant i_1 traverse les deux circuits du premier appareil et le circuit fixe du deuxième ; le courant i_2 traverse le circuit mobile du deuxième et les deux circuits du troisième électrodynamomètre (1).

La nécessité d'effectuer ces expériences préliminaires, et surtout celle de les répéter et de les contrôler pendant les essais constitue un inconvénient sérieux de cette méthode. Mais, par contre, elle a sur la méthode précédente, le double avantage d'assurer la constance des coefficients d'induction introduits dans les circuits et de permettre de faire les lectures simultanément, éliminant ainsi les erreurs dues aux variations d'intensité et de fréquence des courants résultant des variations de vitesse angulaire du générateur.

494. Résistance efficace des conducteurs de grosse section aux courants alternatifs. — Nous avons admis jusqu'ici que les conducteurs traversés par des courants périodiques obéissaient à chaque instant à la loi d'Ohm, et que le courant s'y répartissait d'une manière uniforme, c'est-à-dire

(1) Voir l'*Électricien* du 28 janvier 1888 ou le mémoire de M. G. Ferraris pour le développement de cette méthode.

que la densité du courant (161) était la même en tous les points de la section. Sir *W. Thomson* (1888) (1) a établi qu'il n'en était pas ainsi pour des courants périodiques de grande fréquence : le courant se localise dans les couches extérieures où la densité devient plus grande que la densité moyenne et devient plus faible au centre. Pour des conducteurs suffisamment gros, et une fréquence élevée, la densité au centre devient

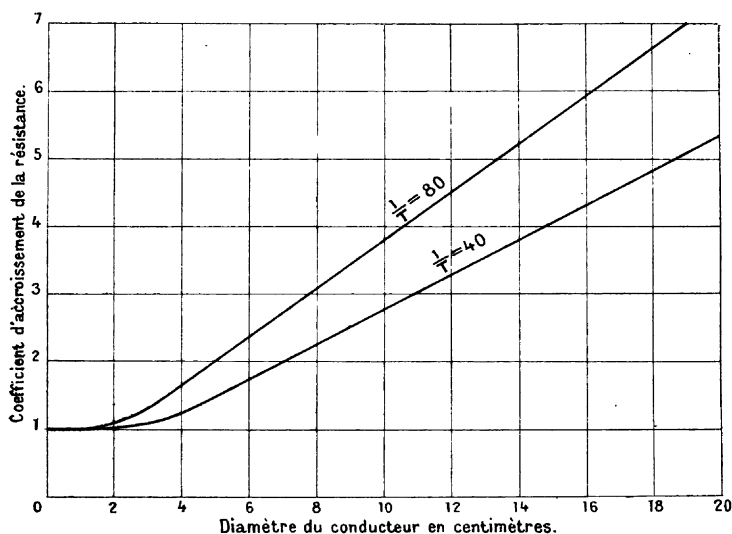


Fig. 236. — Variations de la résistance efficace d'un conducteur aux courants périodiques en fonction du diamètre.

même sensiblement nulle et un conducteur *plein* présente une résistance aussi grande qu'un conducteur *creux* de même diamètre extérieur. Cet effet correspond à un accroissement *réel* de résistance, et non plus seulement à une résistance apparente analogue à celle que présente un conducteur dont le coefficient de self-induction n'est pas nul (490). C'est cette valeur nouvelle de la résistance qu'il faut multiplier par le carré de l'intensité. Nous avons construit d'après les chiffres donnés par sir *W. Thomson*, les courbes (fig. 236) relatives à deux courants périodiques dont les fréquences sont respectivement 40 et 80 en

(1) *Institution of electrical Engineers*. Séance du 10 janvier 1889, vol. XVIII, n° 77, p. 35.

portant en abscisses les diamètres des conducteurs en cm, et en ordonnées le facteur par lequel il faut multiplier sa résistance *ohmique*, mesurée au pont de Wheatstone, pour avoir sa résistance aux courants alternatifs de fréquence 40 et 80.

C'est ainsi, par exemple, qu'un conducteur de 5 centimètres de diamètre a sa résistance doublée pour un courant périodique de fréquence 80. Un conducteur creux donnerait une résistance moins grande avec un moindre poids de cuivre. Il y a donc une limite à la grosseur des conducteurs massifs servant à la transmission des courants alternatifs.

495. Application des courants alternatifs à la mesure des coefficients de self-induction. — M. Joubert ⁽¹⁾ a fait connaître une méthode simple et élégante dont voici le principe. On monte en circuit sur une machine à courants alternatifs de période T une résistance sans self-induction R_1 et la bobine de résistance R dont le coefficient de self-induction est L. On établit successivement un même électromètre idiostatique entre les deux extrémités R_1 et R et on lit les déviations δ_1 et δ . L'intensité efficace est, pour chaque partie du circuit, égale au quotient de la résistance réelle ou apparente par la différence de potentiel efficace, on a donc, en appelant e_1 et e les différences de potentiel efficaces

$$I_{\text{eff}} = \frac{e_1}{R_1} = \frac{e}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}.$$

En élevant un carré et en remplaçant e_1^2 et e^2 par les lectures δ_1 et δ sur l'électromètre idiostatique

$$\delta_1(R^2 + L^2\omega^2) = \delta R_1^2$$

d'où

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{R_1^2 \frac{\delta}{\delta_1} - R^2}.$$

Il suffit donc de faire deux expériences, pour avoir δ_1 et δ : R_1 et R se mesurent au pont de Wheatstone, et ω se déduit de la fréquence du générateur à courants alternatifs. On peut substituer un voltmètre de Cardew à l'électromètre idiostati-

(1) *Annales de l'École normale supérieure*, t. X, 1881.

que, mais dans ce cas, il faut prendre pour δ_1 et δ_2 les carrés des lectures en volts, c'est-à-dire les carrés des différences de potentiel efficaces.

496. Bobines de sûreté ou de réaction. — Étant donné une différence de potentiel alternative entre deux points et un courant d'intensité efficace sur une résistance totale R , on peut établir dans ce circuit une *résistance inductive* telle que si la résistance devient R_1 , l'intensité ne dépasse pas une certaine valeur fixée à l'avance et égale à k fois l'intensité efficace de régime. Il est facile de calculer le coefficient de self-induction à donner à cette bobine pour une machine de période T .

C'est *M. J. E. H. Gordon* qui a le premier appliqué cette disposition aux distributions par courants alternatifs, et leur a donné le nom de *choking-coils* (bobines d'étouffement).

L'intensité dans le premier cas a pour valeur

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

et dans le second cas

$$kI_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 L^2}}$$

$$R^2 + \omega^2 L^2 = k^2(R_1^2 + \omega^2 L^2)$$

équation d'où l'on déduit l'inconnue L .

Étant donné le coefficient de self-induction et la résistance de la bobine, il est facile d'en déduire les dimensions en choisissant la forme qui correspond au coefficient de self-induction maximum, pour une longueur donnée (474). On peut aussi augmenter considérablement le coefficient de self-induction en disposant un noyau de fer doux au centre de la bobine, pour augmenter la perméabilité magnétique du milieu.

En déplaçant ce noyau de fer doux à l'intérieur de la bobine, on peut faire varier le coefficient de self-induction et utiliser l'appareil comme un régulateur de courant. Il importe de remarquer que le rôle de ce régulateur est essentiellement différent de celui du *rhéostat* équivalent qui ramènerait l'intensité efficace du courant à la même valeur. Ces bobines de réaction sont donc très avantageuses comme régulateurs d'intensité de

courant, car elles permettent de faire varier cette intensité dans de grandes limites sans abaisser autant le rendement qu'avec des rhéostats ordinaires.

497. Répulsions électrodynamiques produites par

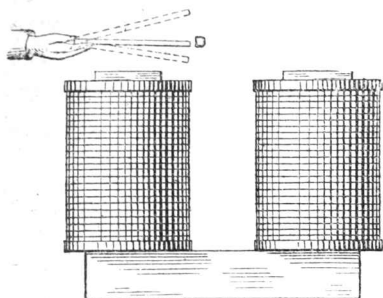


Fig. 237.

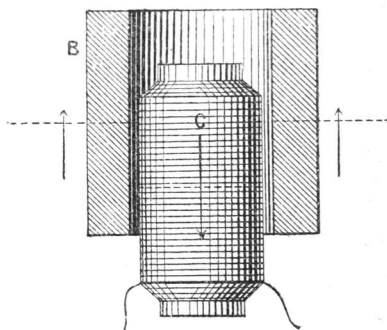


Fig. 238.

les courants alternatifs. — Lorsqu'un courant périodique alternatif traverse un électro-aimant et produit un flux de force périodique, si l'on vient à placer perpendiculairement à la direction des lignes de force du champ un disque de cuivre (fig. 237) un anneau ou un tube (fig. 238), ce disque ou cet anneau s'échauffe rapidement et est *repoussé* par le pôle de l'électro-aimant.

Ce phénomène, découvert en 1884 par M. le professeur *Elihu Thomson*, est dû à l'action électrodynamique du champ périodique produit par l'électro-

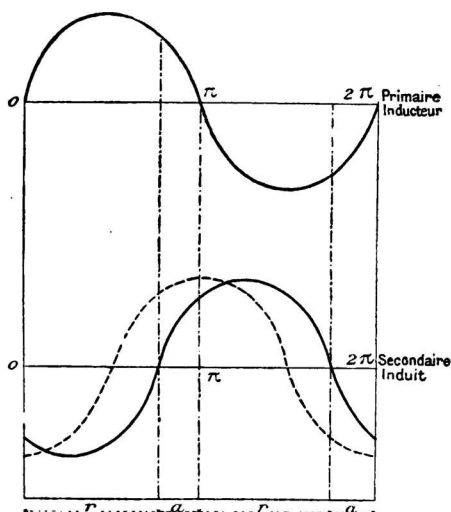


Fig. 239.

aimant sur le champ galvanique périodique développé par les courants d'induction dont le disque ou l'anneau est le siège.

Ces répulsions ne sont pas autre chose qu'un cas particulier des lois générales des actions électrodynamiques. Le courant induit dans le circuit secondaire se trouve, par le fait de sa self-induction, retardé d'une certaine quantité par rapport au circuit primaire (fig. 239). Dans ces conditions, la somme des répulsions élémentaires est plus grande que celle des attractions. C'est en vertu de la même action que la bobine C (fig. 240) traversée par un courant périodique alternatif repousse l'anneau

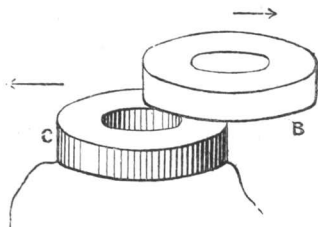


Fig. 240.

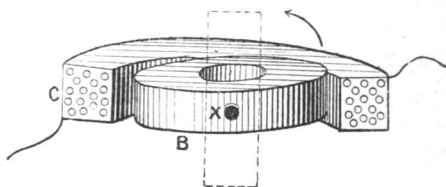


Fig. 241.

B dans le sens indiqué par les flèches, lorsque les axes longitudinaux de la bobine et de l'anneau ne coïncident pas. De même l'anneau B (fig 241) mobile autour d'un axe horizontal X prend la position indiquée en pointillé, dès que l'on envoie un courant périodique dans C.

On peut toujours prévoir le sens de l'action en observant que le courant *induit* gênant la production du courant inducteur, l'action sera de sens tel que le coefficient d'induction mutuelle devient minimum, puisque c'est dans cette position que le flux inducteur pourra être maximum.

498. Électrolyse par les courants alternatifs. — Les phénomènes qui accompagnent le passage des courants périodiques alternatifs à travers une cuve électrolytique ont fait l'objet d'une étude expérimentable récente de MM. G. Maneuvrier et J. Chappuis ⁽¹⁾, étude qui les a conduits aux conclusions suivantes :

Pour des courants d'intensité déterminée, il existe une électrode en *platine* de surface telle que les gaz ne s'y dégagent pas, et que l'électrolyse soit, ou paraisse, complètement en-

(1) Académie des sciences, séance du 18 juin, 2 et 9 juillet 1888.

rayée. Si l'on diminue alors graduellement la surface de cette électrode, en réduisant soit la longueur, soit le diamètre, le dégagement gazeux apparaît, et il est d'autant plus abondant que les électrodes ont une surface plus réduite.

Inversement, pour des électrodes en platine de dimensions déterminées, il existe une intensité de courant au-dessous de laquelle il n'y a pas de dégagement gazeux ; la décomposition se produit, au contraire, pour une intensité supérieure à cette limite et elle augmente en même temps que l'intensité.

Les gaz recueillis, à l'une et à l'autre électrode, ont la même composition. Ce sont les gaz de l'eau, formant un mélange détonant, mais avec une proportion d'oxygène inférieure au tiers du volume total. De plus, le volume de ce gaz tonnant est toujours plus ou moins inférieur à la quantité théorique qui serait dégagée dans les mêmes conditions par un courant continu.

Il se produit de l'ozone à chaque électrode, malgré la présence de l'hydrogène. Les proportions sont variables, à une même température, suivant la densité du courant (facteur principal du phénomène) et suivant la nature des électrodes et de l'électrolyte.

Étant donnée la production simultanée, sur une même électrode, d'oxygène fortement ozonisé et d'hydrogène naissant, il suffit de la moindre action extérieure pour provoquer la reconstitution de l'eau sur cette électrode et, par suite, la disparition ou, en quelque sorte, la *résorption* des gaz. Dans le cas des électrodes en platine, la cause déterminante extérieure est précisément le pouvoir condensant de ce métal, lequel s'accroît avec la surface métallique en contact avec les gaz.

Des électrodes en *cuivre* ne décomposent plus l'eau acidulée dans les mêmes conditions de densité du courant où des électrodes en platine la décomposeraient encore. Toutefois, on les voit se recouvrir d'une couche de cuivre rouge réduit, et si on leur substitue alors des fils de cuivre beaucoup plus fins, le dégagement gazeux se produit abondamment ; mais il ne dure guère, parce que ces électrodes ne tardent pas à se fondre en quelque sorte dans le liquide, en fusées de cuivre rouge réduit pulvérulent. Le cuivre a donc été oxydé d'abord par l'oxygène ozonisé, puis réduit par l'hydrogène, avec recomposition de

l'eau. Si la surface disponible pour cette réaction est suffisante, il ne peut plus se dégager la moindre bulle de gaz. Il y a donc, ici encore, *résorption* des gaz de l'eau, et la cause déterminante extérieure est une double réaction chimique.

Avec des électrodes en mercure, à large surface, il se dégage des gaz en faible quantité, et il se produit en même temps un nuage de matière blanche qui envahit peu à peu le voltamètre. Il y a encore ici reconstitution de l'eau aux dépens des gaz qui *auraient pu* se dégager, et la cause déterminante de leur recombinaison se trouve à la fois dans le pouvoir absorbant du mercure pour les gaz et dans la double réaction subie par le métal et le sulfate de protoxyde.

Par un choix convenable de l'électrolyte et des électrodes on peut réaliser, directement ou indirectement, des réactions dont les produits soient rigoureusement proportionnels à la quantité totale d'électricité qui a traversé l'électrolyte. On aura ainsi une méthode voltamétrique pour mesurer *fidt* (abstraction faite du signe); et l'appareil électrolyseur ainsi réalisé constituera un *compteur* d'électricité pour courants alternatifs.

Si l'on substitue, dans le voltamètre à fils de platine, une solution concentrée de sulfate de cuivre pur à l'eau acidulée, des courants d'une intensité moyenne de 2,5 ampères, qui produisaient précédemment un abondant dégagement de gaz tonnant, ne donnent plus rien dans le sulfate, sauf un échauffement considérable; mais si l'on réduit alors les dimensions des électrodes à 0,1 mm de diamètre et 20 mm de longueur (6 mm² environ de surface), on y fait apparaître à la fois un dégagement gazeux et un dépôt de cuivre. L'électrolyse réussit également bien avec des électrodes en cuivre de mêmes dimensions.

Dans l'électrolyse par les courants alternatifs, il est toujours possible de réaliser une sorte d'équilibre entre la *vitesse de décomposition* de l'électrolyte et la *vitesse de combinaison* de ses éléments. Une fois cet équilibre atteint, il n'y a plus, ou il n'apparaît plus, d'électrolyse proprement dite. Mais alors toutes les circonstances qui feront prédominer la première vitesse sur la seconde feront *réapparaître* les produits de l'électrolyse; toutes celles, au contraire, qui feront prédominer la vitesse de recombinaison, les feront *disparaître de nouveau*.

La *densité du courant* vient au premier rang des circonstances accélératrices de l'électrolyse. Si l'on accroît d'une part la quantité d'électricité qui traverse l'électrolyte, et qu'on diminue d'autre part la surface des électrodes, on fera prédominer la vitesse de décomposition sur la vitesse de recombinaison, et on favorisera l'apparition et le dégagement des produits de l'électrolyse.

On conçoit également que les électrodes et l'électrolyte puissent influencer, par l'intervention de leurs affinités chimiques ou de leurs propriétés physiques, sur la vitesse de recombinaison. La facilité de l'électrolyse doit donc dépendre aussi de la nature des électrodes et de l'électrolyte.

La fréquence plus ou moins grande du courant joue, toutes choses égales d'ailleurs, un rôle important dans l'apparition ou la disparition des phénomènes électrolytiques. Car, si l'on supposait que la succession des deux courants induits devint assez lente pour que les produits de l'électrolyse du premier courant eussent disparu de l'électrode, soit par dégagement direct, soit par diffusion, avant que les produits du courant inverse y eussent apparu, il n'y aurait plus de recombinaison possible : chacun des courants alternatifs se comporterait successivement, dans le voltamètre, comme un courant continu de courte durée.

Les variations de la fréquence et les variations de la densité des courants influent sur l'électrolyse en sens contraire ; on pourra manifester l'électrolyse avec des courants de densité médiocre, pourvu qu'on réduise suffisamment la fréquence. C'est ainsi qu'on s'explique que *de la Rive* ait pu, dès 1837, décomposer l'eau acidulée par les courants alternatifs des machines *magnéto-électriques* récemment inventées ⁽¹⁾.

Détonations spontanées dans l'électrolyse par les courants alternatifs. — Lorsque dans l'électrolyse de l'eau par les courants alternatifs on cherche à recueillir les gaz à l'aide du dispositif ordinaire, c'est-à-dire en coiffant directement les électrodes en platine avec les cloches à gaz, l'expérience se termine invariablement par une explosion. Le gaz tonnant, qui

(1) DE LA RIVE, *Recherches sur les propriétés des courants magnéto-électriques. Comptes rendus*, 1837, p. 835.

s'est dégagé à chaque électrode, détone spontanément au moment où, par suite du remplissage de la cloche, le fil de platine émerge du liquide presque totalement. Ce n'est pas un fait accidentel, mais un fait normal et inévitable, dans les conditions ordinaires de cette électrolyse, observé et étudié par *de la Rive* en 1837, et *Bertin* en 1857.

Le mécanisme de ces explosions paraît très simple : le gaz des éprouvettes doit détoner, comme tous les mélanges détonants, dès qu'il est mis en contact par un ou plusieurs points avec un corps incandescent. Or l'électrode peut évidemment devenir incandescente par suite de son émergence progressive du liquide, car elle est soumise, de ce chef, à trois causes d'échauffement progressif : accroissement de densité du courant, accroissement de résistance au passage, suppression du refroidissement au contact du liquide.

Toutes les circonstances qui faciliteront l'échauffement des électrodes dans le liquide devront accélérer l'incandescence et par suite l'explosion des gaz : telles sont l'accroissement d'intensité du courant et la diminution de la surface des électrodes.

Inversement, toutes les circonstances qui atténueront l'échauffement retarderont l'explosion, et elles la supprimeront tout à fait si elles empêchent l'incandescence : tel est, en particulier, le refroidissement des électrodes obtenu par leur contact *permanent* avec le liquide électrolysé. C'est un dispositif expérimental réalisant cette condition qui a permis de prévenir toute incandescence, et par suite toute explosion des gaz recueillis. Il consiste simplement à coiffer les électrodes, non plus avec les cloches elles-mêmes, mais avec un entonnoir conique ou cylindrique, surmonté d'un petit tube droit abducteur sur lequel on pose les cloches à gaz. Celles-ci peuvent alors se remplir sans que les électrodes cessent jamais d'être immergées complètement.

Nous avons traité, à titre d'exemple, quelques-uns des principaux problèmes que l'on rencontre dans l'étude des courants périodiques alternatifs. Nous en retrouverons quelques autres dans le chapitre suivant, consacré aux compléments de mesure et dans l'étude des applications industrielles.

CHAPITRE XVII

COMPLÉMENTS DE MESURE

Nous nous proposons, dans ce chapitre, de compléter les indications données dans le cours du volume sur la mesure des principaux éléments électriques, en décrivant quelques appareils dont nous n'avons pas encore parlé, pour ne pas troubler l'enchaînement naturel de notre étude. Nous ne décrirons pas ici les accessoires employés dans ces mesures, n'ayant pas pour objet de faire un traité spécial sur cette question qui demanderait de grands développements, et nous nous contenterons de signaler quelques méthodes relatives à la mesure des résistances, des intensités, des forces électromotrices, des champs magnétiques, de la puissance et de l'énergie.

RÉSISTANCES.

499. Mesure des très grandes résistances. — La mesure des résistances électriques élevées présente des difficultés spéciales dues à ce que les courants employés à mesurer ces résistances produisent des phénomènes secondaires de polarisation, d'électrolyse, etc., qui troublent l'exactitude des mesures. Nous indiquerons quelques-unes des méthodes qui donnent de meilleurs résultats.

Liquides ⁽¹⁾. — Pour des résistances comprises entre 1 et 10000 ohms, le plus simple est de ramener la mesure à une comparaison de différences de potentiel par la méthode électrométrique de M. *Lippmann*, à l'aide de l'électromètre capil-

⁽¹⁾ G. FOUSSEREAU, Recherches expérimentales sur la résistance électrique des substances isolantes, *Journal de physique*, mai 1885.

laire (506) qui présente le double avantage de donner des indications instantanées et d'être sensible au dix-millième de volt. Le liquide est contenu dans un tube de verre horizontal (fig. 242), communiquant par des ouvertures très étroites avec quatre branches verticales de même diamètre dans le liquide desquelles plongent autant de lames de platine. Les branches extrêmes servent à amener le courant, les branches du milieu constituent les dériviations. On établit dans le circuit de l'électromètre une force électromotrice auxiliaire destinée à tenir successivement en équilibre les différences de potentiel entre les points B et B' d'une part et la résistance de comparaison d'autre part : cette force électromotrice est ici un condensateur

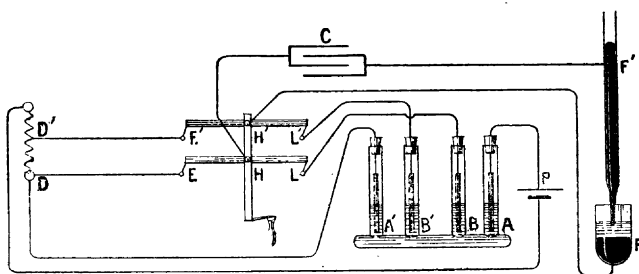


Fig. 242. — Méthode de M. Foussereau pour la mesure de la résistance des liquides.

C qui, mis en dérivation entre les points D et D' de la résistance de comparaison, prend une charge correspondant à la différence de potentiel entre D et D'.

On intercale alors un électromètre Lippmann qui reste au zéro, ses deux mercures étant au même potentiel. On substitue ensuite les deux dériviations B et B' aux points D et D' : l'électromètre doit rester au zéro. Si cette condition n'est pas réalisée, il se produit dans le circuit secondaire un courant qui modifie l'état électrique dans le condensateur et dans l'électromètre, mais la présence du condensateur limite la quantité d'électricité transmise et empêche la production d'un courant continu qui polariserait B et B'. On élimine les erreurs dues à des inégalités de température des électrodes B et B' en renversant le courant de la pile et en prenant la moyenne des deux résultats.

On peut opérer par réduction à zéro jusqu'à 100 000 ohms. Au delà il faut opérer sur des résistances inégales et déterminer leur rapport.

Lorsque la résistance de la colonne liquide à observer est trop grande pour être avantageusement comparée à l'étalon de 100 000 ohms, on prend comme terme de comparaison la résistance d'un trait de crayon tracé sur une plaque d'ébonite, résistance qui peut être considérée comme invariable pendant la durée d'une série d'expériences, et que l'on compare à une résistance métallique par les procédés ordinaires.

500. Liquides et solides. — Les corps solides sont relativement plus résistants que les liquides, on peut alors employer de grandes forces électromotrices pour lesquelles la polarisation, lente à se développer si les courants sont de faible durée, deviendra de ce fait négligeable. La méthode employée dans ce cas⁽¹⁾ consiste à établir le montage représenté fig. 243. L'interrupteur BB'B'' a pour but de fermer le circuit de la pile sur la résistance à étudier, et d'établir

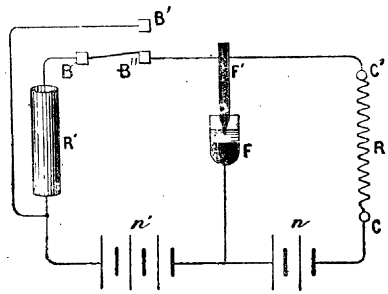


Fig. 243. — Méthode de M. Fousserau pour la mesure des très grandes résistances.

un court circuit sur le corps étudié lorsque le courant ne passe pas. On ne le fait passer, d'ailleurs, dans chaque expérience, que le temps nécessaire à la lecture de l'électromètre. On dispose n éléments dans la branche R et n' éléments, tous identiques, dans la branche R', que l'on fait varier jusqu'à ce que l'électromètre capillaire FF' reste au zéro. La résistance des éléments étant négligeable, on a simplement

$$\frac{R'}{R} = \frac{n'}{n}.$$

Si la substance à étudier se présente sous la forme d'un cylin-

(1) G. FOUSSEREAU, *loc. cit.*

dre creux limité extérieurement et intérieurement par des électrodes concentriques en platine, zinc ou cuivre, on calcule sa résistance spécifique en se servant de la formule donnée précédemment (188). Si le corps est liquide, on peut employer un tube en U de section uniforme en prenant comme longueur moyenne celle de l'axe du tube.

Lorsque les résistances dépassent 10^{10} ohms, les méthodes de différence de potentiel ne conviennent pas, l'électromètre devenant paresseux. En effet, pour un électromètre dont la capacité est de 0,25 de microfarad environ, devant accuser une charge correspondant à 0,0001 volt et placé sur une résistance de 10^{10} ohms, il faudrait 25 secondes. On mesure alors le temps nécessaire à la transmission d'une quantité donnée d'électricité à travers la résistance étudiée sous l'influence d'une force électromotrice connue. On apprécie la quantité d'électricité transmise en la recueillant dans un condensateur de capacité connue, qu'on laisse se charger dans chaque expérience jusqu'à une même différence de potentiel. C'est par cette méthode que M. Fousereau a déterminé les résistances spécifiques de différents verres (1). C'est aussi celle qui est employée pour la mesure d'isolement des joints des câbles sous-marins et des isolateurs employés en télégraphie.

501. Mesure de la résistance des liquides par les courants alternatifs. — M. F. Kohlrausch combat l'influence perturbatrice de la polarisation des électrodes en augmentant le plus possible leur surface utile et en employant des courants alternatifs de très grande fréquence. Un électrodynamomètre, ou, plus simplement, un téléphone établi dans le bras transversal sert à indiquer l'équilibre. Nous avons déjà signalé (187) les objections faites à cette méthode par MM. Bouty et Fousereau. On peut remédier aux difficultés que présente l'emploi des courants alternatifs, soit en faisant usage de rhéostats liquides, et en supprimant ainsi l'emploi de résistances métalliques non rectilignes (2), soit en employant les nouvelles résistances de M. Chaperon.

(1) G. FOUSSEEAU, *Journal de physique*, juin 1883.

(2) BOUTY et FOUSSEEAU. Sur l'emploi des courants alternatifs pour la mesure des résistances liquides, *Journal de physique*, septembre 1885.

502. Résistances parfaites. — Lorsqu'on doit effectuer des mesures de courants périodiques, il importe que l'on puisse disposer de résistances ne présentant pas d'autre propriété électrique que leur résistance *ohmique*, c'est-à-dire dénuées de self-induction, de capacité électrostatique et d'autres phénomènes mal définis, afin de n'apporter aucune perturbation dans les mesures. Une résistance *parfaite* serait celle qui ne présenterait, au point de vue électrique, d'autre propriété que sa résistance.

Conformément à l'opinion déjà exprimée d'ailleurs par Kohlrausch, M. Cornu, et d'autres observateurs, M. G. Chaperon ⁽¹⁾ a montré par des expériences qualitatives simples que la capacité électrostatique et les actions analogues, *dues à l'enroulement à fil double*, et non la self-induction, étaient la cause de ces perturbations. Il est parvenu à diminuer considérablement les effets de capacité et autres, en remplaçant l'enroulement double par un autre où l'on prend soin de ne mettre en contact que des couches de fil séparées par de faibles résistances; la self-induction qui reparaitrait est alors éliminée par une alternance de sens de toutes les couches. Cet enroulement s'exécute avec facilité au moyen d'une machine spéciale.

Les bobines ainsi construites, essayées sur un pont à fil de construction appropriée, donnent, dans les conditions de sensibilité convenables pour les mesures, la même exactitude que des résistances rectilignes.

INTENSITÉS.

Nous n'avons, pour compléter ce que nous avons dit relativement à la mesure des intensités des courants, qu'à dire quelques mots de l'électrocalorimètre, de l'emploi de l'électrodynamomètre pour la mesure des intensités efficaces, et des précautions que comporte la mesure des courants redressés.

503. Electrocalorimètre de M. Roiti. — Un courant traversant une spirale bimétallique de Breguet en élève la température et la tord ou la détord d'une quantité qui mesure cette élévation de température, et qui peut servir aussi de

(1) *Académie des sciences*, séance du 15 avril 1889.

mesure à l'intensité efficace du courant. C'est le principe sur lequel est fondé l'électrocalorimètre. L'électrocalorimètre de M. *Roiti*⁽¹⁾ est formé de deux spirales de Breguet placées l'une au-dessus de l'autre, l'une avec l'argent à l'intérieur, l'autre à l'extérieur; elles sont fixées par leurs extrémités opposées aux bornes qui amènent le courant, réunies par leurs extrémités libres et vers le milieu de la hauteur de l'appareil, par une petite tige placée suivant leur axe commun; la dilatation des deux spirales tend à faire tourner dans le même sens un index métallique ou un miroir fixé aux spirales en leur point de rencontre. Le système soutenu par deux disques d'ébonite est enfermé dans un cylindre de laiton percé de nombreuses ouvertures; ce cylindre est contenu dans une double enveloppe de grande capacité renfermant de l'eau destinée à protéger les spirales contre le rayonnement des objets extérieurs. Cet appareil peut servir à la mesure de l'intensité efficace des courants périodiques et a été appliqué par M. Ferraris à l'étude des transformateurs.

504. Intensité efficace des courants périodiques.

— L'électrodynamomètre mesure l'*intensité efficace* (489) des courants périodiques dont la période est très petite devant la durée d'oscillation de la bobine mobile, mais on peut lui objecter l'inconvénient d'introduire une perturbation dans le régime des courants à mesurer, par suite de sa *self-induction*. MM. *G. Manewrier*, et *P. Ledebœr* ont recherché théoriquement et expérimentalement l'ordre de grandeur des erreurs et le degré d'approximation qu'on peut atteindre⁽²⁾. Il résulte de ces recherches qu'un électrodynamomètre intercalé dans le circuit principal d'un générateur périodique exerce réellement, sur l'intensité efficace, une perturbation qui dépend de la fréquence, et qui grandit à mesure que celle-ci croît. Cette perturbation est notablement plus grande pour les électrodynamomètres à bobines en dérivation, comme celui de M. J. Carpentier, que pour les électrodynamomètres ordinaires. Mais, pour les uns comme pour les autres, on peut affirmer qu'elle ne dépasse pas 0,01 de l'intensité efficace du courant, du

(1) *Il Nuovo Cimento*, 1885. *Journal de physique*, décembre 1886.

(2) *Académie des sciences*, séance du 30 janvier 1898.

moins dans les limites des fréquences employées en pratique. Et quant aux courants alternatifs qui auraient une fréquence plus rapide, on pourra toujours en mesurer l'intensité efficace à l'électrodynamomètre *avec le même degré d'approximation*, à la condition de *diminuer le coefficient de self-induction de l'instrument* dans la proportion où s'accroîtra la fréquence.

Or, si l'on considère que la constance des courants des machines électriques est étroitement liée à la constance de leur vitesse angulaire, et que celle-ci, dans les meilleures conditions industrielles, dépasse rarement une régularité de 1 pour 100, on pourra conclure qu'il serait illusoire de demander aux instruments de mesure une précision supérieure à la régularité de débit des générateurs étudiés.

505. Intensité des courants redressés. — Lorsqu'un courant périodique redressé traverse un ampèremètre dont la période d'oscillation est grande comparée au temps périodique du courant, le couple exercé sur l'aiguille est à chaque instant proportionnel à l'*intensité* du courant et la position d'équilibre de l'aiguille donne la valeur de l'*intensité moyenne* (267), tandis qu'un électrodynamomètre intercalé dans le circuit fait connaître l'*intensité efficace* (489).

La première est toujours plus faible que la seconde, de là les différences observées entre les indications d'appareils qui, sur des courants continus, sont cependant rigoureusement concordants. Les différences, dans le cas d'un courant redressé parfaitement sinusoïdal (au redressement près) atteignent 10 pour 100. La même observation s'applique aux voltmètres, mais avec une nouvelle cause d'erreur introduite par le coefficient de self-induction de l'appareil, coefficient qui varie d'un appareil à l'autre. Il ne faut donc mesurer les courants redressés qu'avec les appareils appropriés à la mesure des courants alternatifs.

FORCES ÉLECTROMOTRICES.

Nous n'avons indiqué jusqu'ici, pour les mesures de différences de potentiel ou des forces électromotrices, que les électromètres, fondés sur les actions électrostatiques, et les galvanomètres qui donnent *indirectement* ces quantités. Bien d'autres

actions électriques peuvent être utilisées dans ce but : nous signalerons à titre d'exemple l'électromètre de M. *Lippmann* fondé sur les actions électro-capillaires (525) et celui de MM. *Curie* fondé sur les phénomènes de dilatation électrique (529).

506. Électromètre de M. Lippmann (1873) (1). — Cet appareil est fondé sur les variations qu'éprouve la constante capillaire d'une électrode de mercure sous l'influence de la

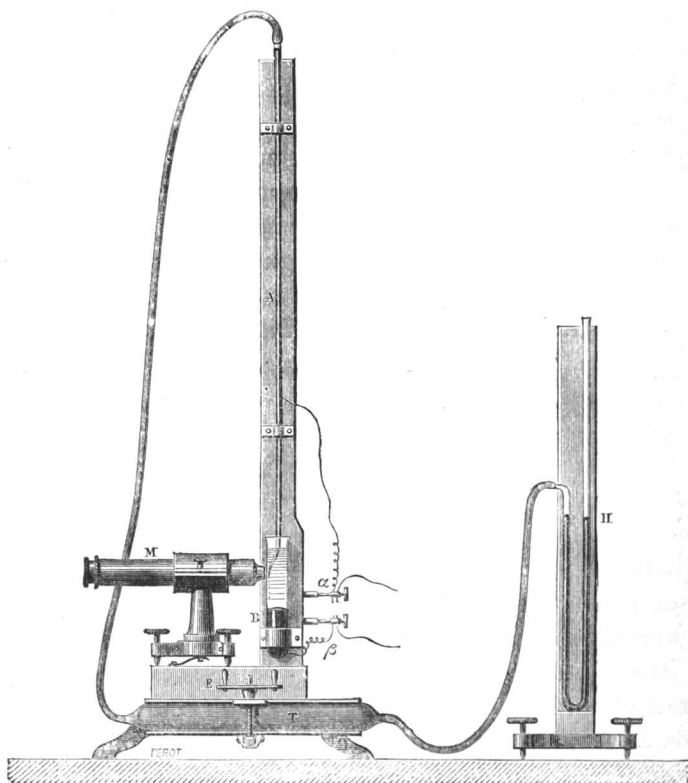


Fig. 244. — Électromètre capillaire de M. Lippmann.

polarisation produite par un courant. Il se compose d'un tube de verre vertical A (fig. 244) ouvert aux deux bouts et terminé

(1) *Annales de physique et de chimie*, 1873. MASCART et JOUBERT, t. II, p. 225.

à sa partie inférieure par une portion effilée appelée *pointe capillaire*. Ce tube renferme une colonne de mercure qui s'y maintient par l'action capillaire. La pointe plonge dans de l'acide sulfurique étendu contenu dans le vase B au fond duquel se trouve une couche de mercure. Si on établit une différence de potentiel entre le mercure de la pointe et celui du fond du vase, à l'aide de deux fils de platine reliés aux bornes α et β et touchant aux deux mercures, le potentiel le moins élevé (négatif) correspondant au tube capillaire, la polarisation augmente la valeur de la constante capillaire et l'extrémité de la colonne de mercure se relève. Les déplacements s'observent au moyen d'un microscope horizontal M grossissant 250 fois envi-

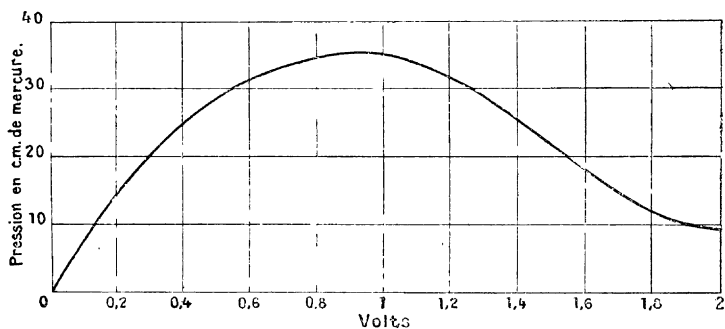


Fig. 245. — Variation de la pression en fonction de la différence de potentiel dans l'électromètre capillaire de M. Lippmann.

ron, fixé sur le socle de l'appareil, mis au point à l'aide d'une crémaillère et muni d'un micromètre oculaire. Le zéro se détermine en mettant les deux mercures en court-circuit. Dans les méthodes de réduction à zéro, il suffit d'amener le mercure du tube au même point pour constater l'égalité des potentiels; pour effectuer des mesures, on ramène au zéro en exerçant une pression que l'on mesure à l'aide d'un manomètre à air libre. Les forces électro-motrices ainsi mesurées en colonne de mercure se traduisent en volts à l'aide d'une table ou d'une courbe de graduation établie empiriquement. Dans les modèles plus récents, l'électromètre et le manomètre sont montés sur le même socle et ne forment qu'un seul appareil.

La courbe (fig. 245) indique les pressions en fonction des

différences de potentiel en volts des deux mercures pour une pression extérieure correspondant à 75 cm de mercure. On voit que cette pression passe par un maximum pour 0,9 volt environ. Il ne faut donc utiliser l'électromètre capillaire que pour des différences de potentiel inférieures à ce chiffre. La capacité de l'électromètre est relativement élevée, car une surface polarisée agit comme un condensateur de grande capacité : elle est d'au moins 0,1 microfarad par mm² de surface du ménisque dans le tube capillaire. La grande apériodicité de l'électromètre capillaire et sa sensibilité en font un appareil très précieux dans les méthodes de réduction à zéro, mais il est moins employé comme appareil à lecture directe.

On peut cependant l'utiliser pour la mesure directe des intensités de courant en s'en servant pour déterminer la différence de potentiel aux bornes d'une résistance appropriée au courant à mesurer, et assez petite, dans chaque cas particulier, pour que la différence de potentiel reste inférieure à 0,6 volt, valeur au-dessus de laquelle l'appareil donnerait des indications inexactes.

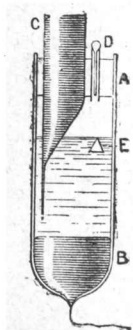


Fig. 246.

Pour se servir de l'appareil dans ces conditions il est nécessaire que, pendant le remplissage de l'appareil, tous les tubes soient toujours bien propres et constamment préservés des poussières ; il faut aussi que la concentration du liquide soit toujours la même. A cet effet, on mastique (fig. 246)

le tube AB contenant le liquide directement au tube C de l'électromètre, et on ne laisse qu'une petite ouverture par le tube capillaire D. Il suffit de verser l'acide sulfurique dilué jusqu'à la marque E, et de fermer le tube capillaire D avec une gouttelette de verre. L'évaporation se produit très lentement dans ces conditions, et l'eau évaporée peut être remplacé par le tube capillaire D.

507. Électromètre à bilame de quartz de MM. Curie (1888). — Tout phénomène de dilatation électrique (529) régulier peut servir à mesurer la cause qui le produit, mais ces phénomènes sont en général très faibles et

difficiles à utiliser dans un but de mensuration. MM. Curie ⁽¹⁾ ont levé la difficulté en amplifiant la dilatation électrique par un dispositif rappelant le thermomètre métallique de Breguet. Deux plaques sont taillées parallèlement dans un même bloc de quartz. Elles sont toutes deux normales à l'axe électrique; leur contour a la forme d'un rectangle allongé et la grande longueur de ce rectangle est normale à la fois aux axes optique et électrique. Les deux plaques, identiques entre elles, sont amincies ensemble au tour d'optique jusqu'à ce qu'elles n'aient plus qu'une épaisseur très faible, quelques centièmes de millimètre par exemple. Les plaques sont ensuite collées l'une sur l'autre, mais après avoir pris soin de retourner l'une d'elles face pour face, en sorte que les axes électriques soient de sens inverse dans les deux lames ⁽²⁾.

On réalise ainsi une bilame dont on argente les deux faces extérieures. (Le bord des faces est désargenté sur une petite largeur, pour empêcher qu'il n'y ait communication électrique entre les deux faces.) En établissant une différence de potentiel entre les deux faces de la bilame, l'une des lames tend à se dilater et l'autre à se contracter dans la direction de leur plus grand côté; comme les lames sont collées l'une sur l'autre, la bilame se courbe. En maintenant fixe l'une des extrémités de la bilame, l'autre extrémité se déplace sous l'effet de la tension électrique. Pour amplifier le phénomène, on peut fixer une aiguille à l'extrémité libre de la lame et dans son prolongement ⁽³⁾. Enfin, pour faire les mesures, on colle à l'extrémité de l'aiguille un petit micromètre (obtenu par un procédé photographique), divisé en vingt-cinquièmes ou cinquantièmes de millimètre, et sur ce micromètre on braque un microscope muni d'un réticule qui sert de repère pour les lectures.

L'instrument est apériodique et à lecture directe. Pour mesurer des différences de potentiel, il suffit d'étalonner l'ins-

(1) *Académie des sciences*, séance du 30 avril 1888.

(2) Il est bon de remarquer que ces lames, étant parallèles à l'axe même après le retournement, se dilatent également. Elles ne se recourbent donc pas par suite d'un changement de température.

(3) MM. Curie se servent d'une aiguille très légère et très rigide, fabriquée à l'aide d'une charpente en fil de verre; ce mode de construction est emprunté à un appareil inscripteur réalisé par M. C. Rozé pour le pendule de Foucault.

trument une fois pour toutes avec une force électromotrice connue. L'isolement est excellent, le quartz n'ayant pas de conductibilité sensible dans les directions normales à l'axe optique. La sensibilité n'est jamais très grande, et l'instrument servira à mesurer les potentiels élevés. En choisissant convenablement l'épaisseur des lames, on peut obtenir des instruments donnant, à 0,5 volt près, des potentiels compris entre 0 et 600 volts; on peut en construire d'autres donnant, à 20 volts près, des potentiels de plusieurs milliers de volts.

CHAMPS MAGNÉTIQUES

La mesure pratique des champs magnétiques prend chaque jour une importance plus grande. Les méthodes indiquées jusqu'ici sont plutôt théoriques que pratiques. Aussi signalerons-nous quelques méthodes récemment proposées et appliquées à la solution de ce problème complexe, surtout lorsqu'il s'agit de mesurer directement le champ intense produit par les machines dynamos.

508. Magnéto-dynamomètre de M. Eric Gerard (1886). — On sait que si l'on place dans un champ uniforme d'intensité H un conducteur rectiligne de longueur l (en centimètres), traversé par un courant d'intensité i (en unités C.G.S.), dans une direction perpendiculaire à celle des lignes de force du champ, ce conducteur sera soumis à une force f dont la valeur est donnée par la relation

$$f = H i l \text{ dynes.}$$

C'est cette relation qui est appliquée dans le *mesureur de champs magnétiques* de M. E. Gerard (fig. 247). L'appareil se compose d'une sorte de pince formée de deux lames minces isolées et articulées en O. L'une d'elles porte un manche et l'autre, parfaitement équilibrée par le contrepoids P, peut s'écarter légèrement de la première. La branche mobile porte un ressort R que l'on peut tendre plus ou moins à l'aide d'une vis micrométrique V.

Le courant arrive dans le conducteur mobile l par le bras fixe B, le fil flexible f , et revient par un curseur C et le fil flexible f' . Le curseur C a pour but de faire varier la longueur l

suivant la nature du champ à explorer : cette longueur l se lit directement sur une graduation tracée sur le levier mobile. On ramène toujours ce levier à la même position par la vis V , de sorte que, pour chaque mesure, la tension des fils f et f' se trouve éliminée.

Pour étudier un champ magnétique donné, on y place le conducteur de longueur l dans une direction telle que la force exercée sur le conducteur soit maxima, c'est-à-dire que la trac-

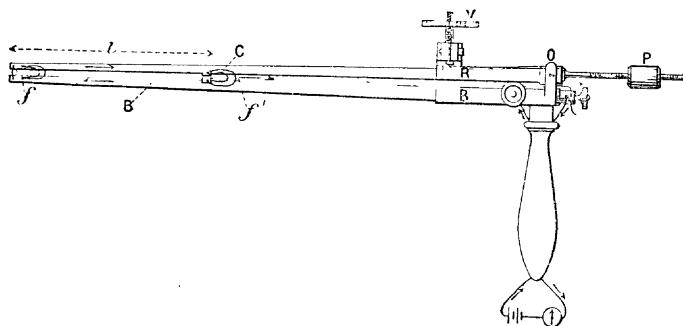


Fig. 247. — Magnéto-dynamomètre de M. E. Gerard.

tion exercée sur le ressort soit la plus grande possible. Lorsque le ressort est tendu et que l'appareil est ramené à l'équilibre, il est facile de voir que le conducteur mobile est soumis à trois forces :

- 1° La force exercée par le champ magnétique terrestre ;
- 2° La force exercée entre les deux conducteurs parallèles ;
- 3° La force produite par le champ à étudier.

Un calcul très simple démontre que les deux premières forces sont tout à fait négligeables devant celle du champ à mesurer.

L'échelle de mesure de l'instrument est très étendue, puisque l'on peut, dans l'appareil considéré, faire varier l de 1 à 20 centimètres et i de 0 à 5 ampères. La seule limite inférieure est relative à la sensibilité du ressort destiné à équilibrer la force exercée par le champ sur le courant.

509. Méthode de M. F. Stenger ⁽¹⁾. — La méthode ima-

(1) F. STENGER, *Annalen der Physik*, t XXXIII, p. 312, 1888. EDMOND VAN AU BEL, *Électricien*, septembre 1889.

ginée par M. le docteur *F. Stenger* de Dresde (1888) a pour but d'obtenir facilement et avec une grande précision l'intensité des champs magnétiques en unités C.G.S. L'appareil n'est pas autre chose, en principe, que l'inverse du galvanomètre bifilaire.

Une petite bobine est suspendue à un bifilaire dans le champ magnétique, de telle façon que le plan des spires soit vertical et parallèle aux lignes de force horizontales du champ. Cette bobine est traversée par un courant d'intensité connue i , et l'on observe avec un miroir et une échelle la déviation α de la bobine sous l'action de l'aimant. Si S est la surface des spires de la bobine, W le couple directeur de la suspension bifilaire, on a pour l'intensité H du champ magnétique :

$$H = \frac{W \cdot \text{tg } \alpha}{Si}$$

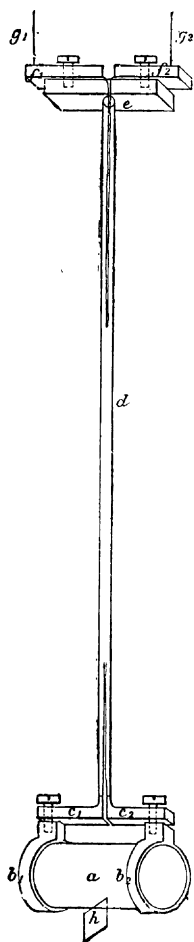


Fig. 248. — Méthode de M. le Dr Stenger.

Aux deux extrémités d'un tube de verre à parois minces (fig. 248) a se trouvent deux anneaux $b_1 b_2$ de cuivre, qui doit être absolument pur. Deux pièces de cuivre $c_1 c_2$, isolées l'une de l'autre et pressées au moyen de petites vis sur les anneaux $b_1 b_2$, sont fixées avec de la gomme laque au tube de verre mince d . L'autre extrémité du tube d traverse une petite plaque d'ébonite e , sur laquelle sont vissées les deux pièces de cuivre $f_1 f_2$, isolées l'une de l'autre. On soude à ces dernières les fins fils de suspension en platine $g_1 g_2$. c_1 et f_1 , d'une part, et c_2 et f_2 , d'autre part, sont mis en communication métallique, à l'intérieur du tube de verre d , au moyen de fils de cuivre recouverts de soie et tordus ensemble. Enfin, entre les anneaux $b_1 b_2$, on a enroulé sur le

tube de verre a une couche de fil de cuivre fin, dont les extrémités sont mises en communication métallique avec les an-

neaux. On isole convenablement avec un vernis à la gomme laque les quelques spires de fil recouvert de soie. A cause des faibles courants que l'on emploie, ce procédé d'isolement est suffisant. Pour faire les lectures des déviations, on fixe un petit miroir argenté très léger h en dessous de la bobine, et on place finalement tout l'appareil dans un gros tube de verre pour le préserver des courants d'air.

Détermination du couple directeur du bifilaire W . — On peut calculer cette quantité de deux manières :

La première méthode, employée par M. Stenger, est décrite en détail dans le *Guide de physique pratique* de M. F. Kohlrausch (1).

La longueur moyenne des fils se détermine le plus commodément par le cathétomètre. Pour mesurer les distances horizontales e_1 , e_2 des extrémités supérieures et inférieures des fils, le mieux est d'employer une machine à diviser convenablement placée et munie d'un microscope avec réticule, car une petite erreur dans la détermination de e_1 et e_2 est très appréciable dans le résultat final. Cette cause d'erreur n'existe pas dans la seconde méthode, qui, en revanche, est beaucoup plus longue.

Le principe de la méthode est fondé sur la formule suivante (2), qui donne la durée d'une oscillation simple de la bobine écartée de sa position d'équilibre :

$$t = \pi \sqrt{\frac{K}{W}},$$

dans laquelle K est le moment d'inertie du système par rapport à l'axe de rotation, et W le moment de la force pour un écart égal à 1. Pour appliquer cette formule, on place à l'intérieur de la bobine de Stenger une petite règle de bois, de forme parallélépipédique, très légère, de telle façon que le centre du parallélépipède se trouve sur l'axe de rotation de la bobine qui oscille, on y suspend des poids connus à des distances connues,

(1) F. KOHLRAUSCH, *Guide de physique pratique*, édit. française, p. 182, 1886. — Voy. aussi : MASCART et JOUBERT, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. II, p. 69.

(2) VIOLLE, *Cours de physique*, t. I, p. 432. — WÜLLNER, *Lehrbuch der Experimentalphysik*, t. I, p. 139.

et on fait osciller le système en déterminant chaque fois les durées d'oscillations.

Comme la bobine n'est formée que d'une seule couche de fil, on obtient commodément la valeur de S en multipliant par le nombre de spires la surface du cercle formé par l'axe du fil dans chacune des spires⁽¹⁾.

La quantité $tg\alpha$ se détermine par la méthode ordinaire au moyen d'une échelle dont on observe par réflexion les divisions dans un miroir.

510. Appareil de K. Ångström. — M. le docteur *Knut Ångström*, professeur à l'École supérieure de Stockholm, a ré-

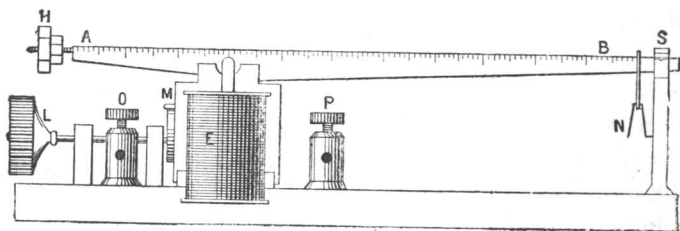


Fig. 249. — Appareil de M. Ångström; vue de face.

cemment imaginé, pour la détermination de l'intensité des champs magnétiques, un appareil fort ingénieux qui est une

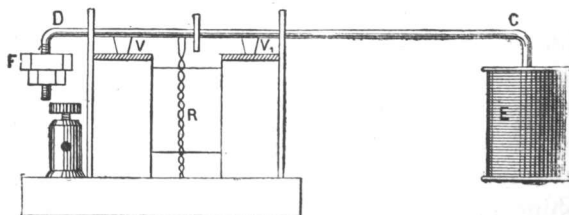


Fig. 250. — Appareil de M. Ångström, vue latérale.

heureuse modification de la méthode de Stenger⁽²⁾, et qui convient tout spécialement pour les champs magnétiques puissants. L'instrument, qui est une espèce de balance, est représenté aux

⁽¹⁾ HEMSTEDT, *Wied. Ann.*, t. XXVI, p. 555, 1885.

⁽²⁾ ÅNGSTRÖM, *Erner's Repertorium der Physik*, t. XXV, livraison 6, p. 383.

deux tiers environ de la grandeur naturelle dans les figures 249 et 250 vu de face et de côté.

AB est un fléau de balance léger reposant sur deux couteaux V_1 et V_2 fixés au tube DC. Ce tube porte une bobine d'ébonite E. sur laquelle on enroule deux couches de fil bien isolé. Le courant électrique entre dans la bobine et en sort par le fil fin R.

Ces fils ne gênent que d'une façon insignifiante le mouvement libre du fléau de la balance; ils peuvent d'ailleurs être entièrement évités, en amenant le courant et le faisant sortir, par exemple, par l'intermédiaire de petits godets contenant du mercure, voisins des couteaux de la balance; F est un contrepoids au moyen duquel on peut régler la sensibilité de la balance. En S se trouve un dispositif permettant de noter exactement la position de repos du fléau de la balance. Sur ce fléau, qui est gradué, on fait mouvoir un cavalier. On peut suspendre aussi des poids plus considérables à un petit étrier N, sous forme de fils métalliques. Enfin H est une vis de réglage, et LM un simple arrêt.

L'appareil n'exige aucune installation particulière: il suffit de placer la bobine dans le champ, de façon que l'axe de rotation du fléau de la balance soit dirigé perpendiculairement aux lignes de force du champ. On s'assure que l'action du champ magnétique ne modifie pas cette position, lorsqu'aucun courant ne traverse la bobine E. Il faut alors faire passer le courant dans cette bobine, puis équilibrer de nouveau la balance avec les poids.

Si M est la masse employée pour avoir l'équilibre,

L le bras de levier,

S la surface des spires,

et I l'intensité du courant,

l'intensité H du champ magnétique est donnée par la formule

$$H = \frac{LMg}{SI}.$$

La surface des spires peut être facilement déterminée géométriquement. Lorsque la première couche de fil est enroulée, et le diamètre de la bobine mesuré avant et après l'enroulement, les spires de fil sont recouvertes de vernis et entourées de quel-

ques couches de feuilles d'étain. On peut alors enrouler la deuxième couche de fil et faire sur celle-ci les mêmes mesures que sur la première.

La *longueur* L du bras de levier sera déterminée exactement par une double pesée. On place sur le bras A un petit poids ; l'équilibre est rompu et peut être rétabli de nouveau en plaçant une charge en un point quelconque du bras B. Soient f' et f_1 les poids qui, placés à des distances respectives x et $(x + a)$ de l'axe de rotation, rétablissent l'équilibre. Le fléau de la balance étant divisé en millimètres, la distance a est mesurée directement, et la longueur x est donnée par l'équation :

$$fx = f_1(x + a).$$

L'*exactitude* dans la détermination de M dépend naturellement de la sensibilité de la balance.

Pour la mesure de l'*intensité du courant*, M. Ångström a voulu éviter l'emploi du galvanomètre qui doit être placé à une grande distance de l'électro-aimant, condition toujours incommode à réaliser même avec un local suffisamment grand. Pour cette raison, il s'est servi de l'électromètre capillaire de Lippmann⁽¹⁾, qui peut sans inconvénient être installé à côté d'un électro-aimant, et convient très bien pour la détermination des intensités des courants en unités C.G.S. (506).

Toutes les constantes de l'instrument peuvent être assez facilement déterminées, sans grands moyens auxiliaires. L'expérimentateur n'a pas besoin d'avoir un grand local à sa disposition, car toutes les déterminations peuvent être faites dans le voisinage des machines. L'installation de l'instrument et l'exécution d'une expérience demande seulement 5 à 10 minutes, en supposant que les constantes de la balance et de l'électromètre aient été déterminées au préalable.

D'autres méthodes ont été proposées pendant ces dernières années pour la mesure de l'intensité des champs magnétiques : les unes sont fondées sur le galvanomètre à mercure de M. Lippmann, les autres sur les variations de résistance électrique du bismuth dans un champ magnétique. Elles ne paraissent pas avoir reçu jusqu'à présent de nombreuses applications.

(1) M. Leduc avait déjà proposé l'emploi de l'électromètre capillaire.

PUISSANCE ÉLECTRIQUE.

511. Définitions. — La puissance électrique a pour expression générale (166)

$$EI, \quad RI^2 \quad \text{ou} \quad \frac{E^2}{R}.$$

On peut la déterminer indirectement en effectuant deux mesures distinctes faisant connaître les deux termes qui entrent dans les trois expressions ci-dessus.

Certains appareils, appelés *wattmètres* ou *mesureurs de puissance* (1), font connaître *directement* la valeur de la puissance moyenne dépensée entre les extrémités d'un circuit. La question, qui ne présente pas de difficultés lorsque le courant est *continu*, est, au contraire, assez complexe lorsque le courant est *périodique* et que le circuit présente des phénomènes d'induction.

512. Mesure de la puissance électrique dans les circuits inductifs. — Nous appelons *circuit inductif* tout circuit dans lequel peuvent se manifester des phénomènes d'induction électromagnétique, de self-induction ou d'induction mutuelle. Dans des circuits de cette nature les réactions mutuelles modifient les phénomènes et produisent des décalages entre les éléments de fonctionnement qui rendent illusoire la mesure de la puissance et de l'énergie électriques si l'on ne tient pas compte de ces décalages. On doit donc avoir recours à des méthodes spéciales, applicables en toute rigueur chaque fois que l'on a affaire à des courants périodiques, capables de produire des effets inductifs, soit sur leur propre circuit, soit sur les appareils de mesure eux-mêmes. Un wattmètre approprié et un électromètre à quadrants sont, jusqu'à nouvel ordre, les seuls appareils qui donnent par lecture directe, à l'aide d'une seule ou de deux expériences, la puissance moyenne absorbée dans un circuit, et, par intégration, l'énergie dépensée en un temps donné.

513. Wattmètre. — Le couple exercé par un circuit fixe, traversé par un courant I sur un circuit mobile autour d'un axe et traversé par un courant I' , a pour valeur

(1) On leur a quelquefois donné, mais fort improprement, le nom d'*ergmètres* ou de *mesureurs d'énergie*.

$$W = kII'$$

k étant une constante de construction dépendant des formes et des dimensions des bobines. Si l'un des circuits, le circuit mobile, par exemple, est monté en dérivation aux bornes d'un appareil et présente une grande résistance, le courant I qui le traverse sera proportionnel à la différence de potentiel e existant entre les bornes de l'appareil, et la formule s'écrira

$$W = k'eI$$

k' étant une nouvelle constante. La mesure du couple permettra donc de déterminer la puissance eI .

La formule n'est exacte que si les deux circuits ne subissent pas de déplacement relatif et ne renferment pas de pièces de fer susceptibles d'introduire des phénomènes de saturation magnétique qui troublent la proportionnalité. Il faut aussi, comme pour la mesure des intensités efficaces des courants périodiques (504), que la période d'oscillation de la bobine mobile soit beaucoup plus grande que la période du courant à mesurer, afin que l'appareil puisse prendre un état moyen d'équilibre.

Le premier wattmètre, imaginé par M. Marcel Deprez et présenté sous le nom impropre de *mesureur d'énergie* (1880), ne remplissait pas les conditions nécessaires. Le premier wattmètre industrie la été construit, en 1882, par M. Werner Siemens en modifiant convenablement l'électrodynamomètre industriel (368). Mais le circuit mobile du wattmètre de M. Siemens présentait un coefficient de self-induction élevé qui ne permettait pas de l'appliquer aux courants périodiques de fréquence élevée sans introduire des coefficients de correction et des formules compliquées. C'est M. C. Zipernowsky qui a construit, en 1885, le premier wattmètre industriel applicable à tous les circuits, quelle que soit la forme du courant.

514. Wattmètre de MM. Zipernowsky et Bláthy (1885). — Cet appareil (fig. 251) se compose essentiellement de deux parties distinctes : le wattmètre proprement dit et une série de résistances additionnelles. Le wattmètre comprend une bobine fixe à gros fil dans lequel passe le courant total. Ce gros fil comporte deux enroulements différents (fig. 252). A

est une bobine de fil de grosse section et d'un petit nombre de spires ; B renferme un plus grand nombre de spires de fil plus fin. Des chevilles, que l'on peut placer convenablement dans les

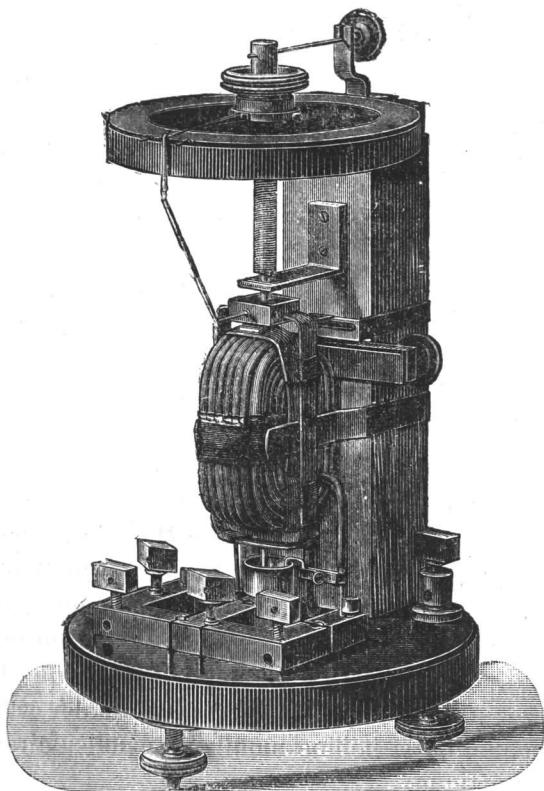


Fig. 251. — Wattmètre de MM. Zipernowsky et Bláthy.

trous *a, b, c, d*, permettent de mettre la bobine à gros fil dans le circuit, les deux bobines en tension ou les deux bobines hors circuit, sans cependant interrompre ce circuit. La dérivation, prise entre les bornes de l'appareil à étudier, passe dans la bobine mobile C formée d'un petit nombre de spires pour avoir le plus petit coefficient de self-induction possible : le courant arrive à cette bobine par deux fils d'argent, et le couple électrodynamique est équilibré par un ressort à boudin

auquel on imprime une torsion convenable à l'aide d'un bouton de torsion muni d'un index.

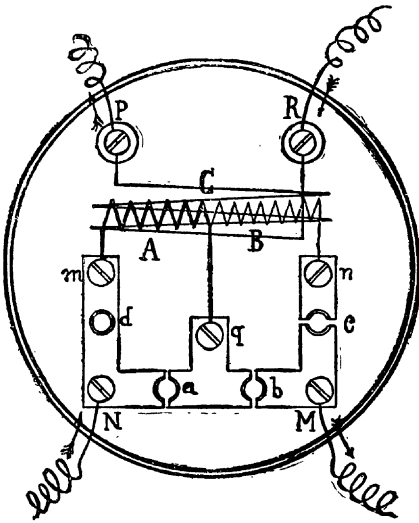


Fig. 252. — Enroulement du wattmètre.

Les résistances additionnelles sont disposées dans une boîte spéciale dont les connexions sont indiquées figure 253. P et R sont des bornes communiquant avec le wattmètre; F et G sont reliés aux extrémités du circuit à étudier; r, r_1, r_2, r_3 sont des résistances roulées en double et que l'on introduit en circuit suivant la différence de potentiel efficace à mesurer. Ces bobines sont établies pour supporter un courant de 0,1 ampère.

En H est un interrupteur pour le fil fin, en Q un inverseur de courant permettant d'avoir le couple électrodynamique toujours dans le même sens.

Lorsque l'on emploie le wattmètre avec des courants alternatifs, la résultante de l'action du champ magnétique terrestre est nulle. Avec un courant continu, on peut annuler cette action en plaçant le plan de la bobine mobile perpendiculairement au méridien magnétique.

La puissance électrique absorbée par le wattmètre n'est pas toujours négligeable devant la puissance à mesurer. On peut la rendre négligeable suivant les quantités à mesurer ou la déterminer séparément et la retrancher des résultats obtenus.

En ce qui concerne les coefficients d'induction du wattmètre, la théorie complète ⁽¹⁾ démontre que le wattmètre appliqué à un circuit périodique simple donne la valeur exacte de la puissance moyenne dans le cas où ni le circuit à fil fin ni le circuit à mesurer n'ont de self-induction, et dans le cas où les cons-

(1) J.-A. FLEMING, *The alternate current transformer in theory and practice*, vol. I, p. 145.

tantes de temps (441) de ces deux circuits sont égales. Il en résulte que, sur un circuit non inductif, le wattmètre indique *trop*, tandis qu'il indique, en général, *pas assez* sur un circuit inductif dont la constante de temps (441) est plus grande que celle du circuit à fil fin.

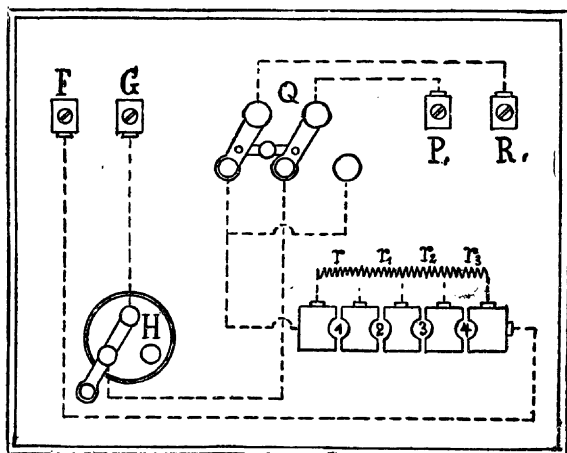


Fig. 253. — Couplage des résistances additionnelles du wattmètre.

Le facteur de correction k par lequel il faut multiplier les lectures a pour valeur, en appelant respectivement T_s et T_r les constantes de temps du circuit à fil fin et du circuit d'utilisation

$$k = \frac{1 + \omega^2 T_s}{1 + \omega^2 T_r T_s}$$

Lorsqu'on ne dispose pas d'un wattmètre (225) on peut se servir d'un électromètre à quadrants (369) par la méthode suivante.

515. Mesure de la puissance électrique moyenne dépensée dans un circuit. — *Méthode de M. Potier (1884).* La méthode de M. Potier permet de mesurer la puissance absorbée entre les bornes d'un appareil électrique présentant ou non des forces électromotrices d'induction à l'aide d'un électromètre symétrique, dont les quadrants sont reliés aux extrémités d'une résistance sans self-induction R intercalée dans le circuit. Les quadrants sont ainsi portés aux potentiels V et V_1 .

$(V - V_1)$ est la différence de potentiel aux bornes de la résistance parfaite; $(V_1 - V_2)$, la différence de potentiel aux bornes de l'appareil dont on veut mesurer la puissance.

1° On met l'aiguille au potentiel V_2 , on a une déviation δ

$$k\delta = \frac{1}{T} \int_0^T (V_1 - V) \left(V_2 - \frac{V_1 + V}{2} \right) dt. \quad (1)$$

2° On met l'aiguille au potentiel V_1 , on a une déviation δ'

$$k\delta' = \frac{1}{T} \int_0^T (V_1 - V) \left(V_1 - \frac{V_1 + V}{2} \right) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{(V_1 - V)^2}{2} dt. \quad (2)$$

Et en faisant la différence

$$\begin{aligned} k(\delta - \delta') &= \frac{1}{T} \int_0^T (V_1 - V) \left(V_2 - \frac{V_1 + V}{2} - \frac{V_1 - V}{2} \right) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T (V_1 - V)(V_2 - V_1) dt. \end{aligned}$$

Mais on a

$$I_t = \frac{V_1 - V}{R}$$

d'où

$$k(\delta - \delta') = \frac{R}{T} \int_0^T I_t (V_2 - V_1) dt. \quad (3)$$

$(V_2 - V_1)I_t$ est la puissance à l'instant t entre les points V_1 et V_2

$$P_t = I_t(V_2 - V_1).$$

L'intégrale de cette expression prise entre 0 et T représente le travail pendant la période; la puissance moyenne correspondante est

$$P_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_t (V_2 - V_1) dt.$$

En remplaçant dans (1)

$$k(\delta - \delta') = RP_{\text{moy}}$$

d'où

$$P_{\text{moy}} = \frac{k(\delta - \delta')}{R}.$$

Cette méthode élégante a l'inconvénient d'exiger l'intercala-

tion dans le circuit d'une résistance parfaite (502) assez importante et, par suite, de modifier le régime.

516. Wattmètre électrostatique de MM. Blondlot et Curie ⁽¹⁾ (1888). — L'électromètre de MM. P. Curie et Blondlot (230) donnant le produit de deux différences du potentiel, on peut prendre pour l'une d'elles celle qui existe aux bornes de l'appareil d'utilisation, et pour l'autre celle qui existe aux extrémités d'une résistance connue sans self-induction, intercalée dans le circuit. Les déviations sont alors rigoureusement proportionnelles à la puissance moyenne dépensée dans l'appareil d'utilisation, qu'il soit ou non le siège de phénomènes d'induction. Cet appareil présente l'avantage de ne rien dépenser pour la mesure dans l'appareil de mesure lui-même, mais il nécessite l'intercalation dans le circuit à mesurer d'une résistance parfaite (502) dont la dépense est souvent élevée. Il constitue donc, jusqu'à nouvel ordre, plutôt un appareil de laboratoire qu'un appareil industriel.

Le wattmètre que nous venons de décrire ainsi que la méthode de M. Potier s'appliquent également bien aux courants *redressés* ⁽²⁾ pour lesquels un ampèremètre et un voltmètre électromagnétiques donnent des indications toujours respectivement inférieures aux intensités et aux forces électromotrices efficaces, et ne tiennent pas compte du décalage produit par les phénomènes d'induction dont le circuit d'utilisation peut être le siège.

ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

517. Principe. — La détermination de l'énergie électrique produite ou dépensée par un appareil donné se réduit à la résolution, par un procédé quelconque, de l'une des intégrales

$$\int EI dt; \quad \int RI^2 dt; \quad \int \frac{E^2}{R} dt;$$

entre les deux époques considérées.

Le problème se simplifie souvent en pratique lorsque l'un des facteurs est constant. Lorsque les deux facteurs sont varia-

⁽¹⁾ *Académie des sciences*, séance du 26 novembre 1888.

⁽²⁾ *Électricien* du 20 juin 1885, n° 114, p. 417.

bles avec le temps, le plus simple est de tracer une courbe en portant les temps en abscisses, et en ordonnées l'un des trois facteurs EI , RI^2 ou $\frac{E^2}{R}$ correspondants.

L'aire limitée par l'axe des x , la courbe et les deux ordonnées extrêmes fait connaître l'intégrale cherchée.

Les appareils qui effectuent directement cette intégration sont des *mesureurs d'énergie*, des *ergmètres*, des *joules-mètres*, ou des *watts-heure-mètres*, ces différents noms portant en eux-mêmes leurs définitions.

Les mesureurs d'énergie, aujourd'hui fort nombreux, peuvent se diviser en deux grandes classes : la première comprend les appareils dans lesquels un moteur électrique convenablement disposé sur le circuit tourne à une vitesse angulaire proportionnelle à chaque instant à la puissance dépensée. Le nombre de tours effectués par l'appareil en un temps donné est égal, à un facteur constant près, à l'énergie fournie. La difficulté d'obtenir une proportionnalité convenable pour de grandes variations du débit fait que les appareils de cette classe ne sont pas encore très répandus en pratique.

La seconde classe, la plus nombreuse, comprend en réalité deux appareils distincts associés : 1° un *wattmètre* dont les déviations sont proportionnelles à la puissance électrique dépensée à chaque instant ; 2° un *intégrateur* qui, à intervalles périodiques, vient cueillir l'indication du wattmètre et fait tourner le premier mobile d'un compteur de tours d'un angle proportionnel à cette indication. Les rotations partielles totalisées par le compteur en un temps donné mesurent sensiblement l'énergie fournie pendant le même temps.

On peut encore mesurer l'énergie fournie à un circuit à l'aide d'un wattmètre enregistreur : la surface, comprise entre l'axe des x , la courbe enregistrée et les deux ordonnées correspondant à deux époques données, est proportionnelle à l'énergie dépensée entre les deux époques.

Nous étudierons les principaux types de ces appareils, à propos des distributions d'énergie électrique, dans le volume consacré aux applications.

CHAPITRE XVIII

QUESTIONS DIVERSES

Nous passerons en revue dans ce chapitre quelques-unes des questions qui n'auraient pas su trouver place dans le cours de ce volume sans troubler l'enchaînement de l'étude des grands phénomènes qui en font l'objet, ainsi que certains sujets nouveaux qui, encore mal expliqués, semblent tantôt confirmer, tantôt infirmer le grand principe de l'*unité des forces physiques*.

MACHINES ÉLECTROSTATIQUES.

On désigne sous le nom de *machine électrostatique*, ou, plus simplement, de *machine électrique*, tout appareil permettant d'obtenir de l'*énergie électrique* sous forme de *charges électrostatiques*. Une machine électrique comporte trois organes essentiels : un *producteur*, un *transmetteur* et un *collecteur*. On peut diviser les machines électrostatiques en deux grandes classes :

1° *Machines à frottement*.

2° *Machines d'induction électrostatique* ou d'*influence*.

518. Machines à frottement. — L'expérience démontre que les charges électriques développées par le frottement de deux surfaces hétérogènes dépendent de ce frottement, de l'étendue des surfaces et de leur nature, les corps les plus éloignés dans la liste d'électrisation par frottement (90) produisant les effets les plus intenses. Les machines fondées sur cette action constituent les *machines à frottement*.

C'est *Otto de Guericke* (1740) qui construisit la première

machine électrique, à Magdebourg. Elle consistait essentiellement en un globe de soufre ou de résine tournant rapidement et frotté par les mains bien sèches.

En 1744, *Winkler* remplaça les mains par un coussin de cuir; sir *Isaac Newton* remplaça le globe de soufre par un globe de verre, *Van Bosc* ajouta un collecteur sous forme d'un tube de fer isolé par des cordons de soie ou par une personne isolée sur un gâteau de résine; *Gordon*, d'Eirfurth, remplaça le globe de verre par un cylindre.

La première machine à plateau de verre fut construite par *Ramsden* en 1766. C'est la disposition qui a constitué, jusqu'à ces dernières années, la machine électrique classique de tous les cabinets de physique. On l'abandonne aujourd'hui en faveur des machines d'induction électrostatique (520).

Toutes les machines électrostatiques à frottement sont de très médiocres appareils de transformation de l'énergie mécanique fournie par l'opérateur en énergie électrostatique. C'est qu'en effet, la plus grande partie du travail dépensé pour mettre le producteur en rotation se dissipe sous forme d'échauffement par frottement du collecteur et des coussinets : le rendement est donc tout à fait insuffisant; aussi leur préfère-t-on aujourd'hui les machines d'induction, dans lesquelles cette cause de perte n'existe pas.

519. Électrisation des corps isolants. — La force électromotrice de contact d'une substance donnée avec une autre substance à une même température dépend de la grandeur de ses molécules, de leur forme, et la force électromotrice de contact de deux substances données chimiquement inactives est égale à la différence de leurs constantes de Peltier respectives (348).

Il ne paraît pas illégitime d'étendre cette propriété aux corps non conducteurs inactifs chimiquement et peut-être même à tous les corps en ce qui concerne seulement l'effet Peltier, mais c'est là, jusqu'à nouvel ordre, une pure spéculation.

En mettant deux corps non conducteurs en contact, ils prendraient donc une différence de potentiel dépendant de leurs constantes de Peltier, mais d'autres causes peuvent alors intervenir, et les charges produites par ces causes persister après la

séparation, eu égard aux propriétés isolantes des corps, tandis qu'avec des substances conductrices, les charges accidentelles sont détruites par conduction et ne laissent plus subsister que la différence de potentiel due à la force électromotrice de contact.

L'électrisation par frottement des corps isolants est donc un phénomène assez complexe dans lequel le contact des substances joue un rôle prépondérant, mais non exclusif, et dont on ne possède pas encore une explication complètement satisfaisante.

520. Machines d'induction électrostatique. — La machine d'induction la plus simple et la plus ancienne est l'électrophore de *Volta*, imaginé en 1875 et dont nous avons donné la description (138).

L'énergie représentée par chacune des décharges du plateau dépend de sa capacité, et, par suite, de ses dimensions. On a construit des électrophores qui avaient jusqu'à 2 mètres de diamètre. On obtient aujourd'hui les mêmes résultats avec des machines moins encombrantes. Quelles que soient leurs dispositions, la théorie de leur fonctionnement est toujours la même.

Théorie des machines d'induction électrostatique. — Considérons un système chargé négativement, par exemple, et plaçons en sa présence un corps conducteur mis un instant en communication avec le sol. Ce corps se chargera *positivement*. Introduisons-le dans un conducteur fermé, et faisons-le toucher la partie intérieure : le système se déchargera, et l'expérience pourra être recommencée indéfiniment. Rien, en théorie, ne limite la charge du conducteur fermé, puisque, quelle que soit déjà sa charge, un conducteur placé à l'intérieur et communiquant avec lui ne peut garder de charge. Il en est de même pour les actions de contact et les actions de *frottement*, ce frottement ne constituant qu'un contact plus intime des corps en présence. Le rôle des peignes et des pointes est de décharger le diélectrique. Il faut que la densité devienne nulle à l'extrémité de ces pointes, c'est-à-dire que le disque et les pointes arrivent au même potentiel.

L'énergie potentielle communiquée au collecteur est égale et de signe contraire au travail des forces électriques pendant le

déplacement ; il est emprunté à l'opérateur. On peut donc, au point de vue général, considérer les machines électriques d'induction électrostatique comme des électrophores *continus*, fonctionnant comme de véritables générateurs *mécaniques* d'énergie électrique.

Dans un certain nombre de ces machines d'induction le champ inducteur reste fixe. La machine de *Bertsch* et celle de *Carré* sont les types les plus connus de cette espèce : dans d'autres l'induit réagit sur l'inducteur pour augmenter sa charge et constituer les *duplicateurs* ou *multiplicateurs* dont le *replenisher* de Thomson est le type le plus parfait.

Machine de Bertsch. — Cette machine se compose d'un plateau de caoutchouc durci tournant autour de son axe horizontal devant deux peignes isolés et un inducteur fixe en regard de l'un des peignes, de l'autre côté du plateau tournant. C'est donc un électrophore continu. La palette inductrice se déchargeant par suite d'un isolement toujours imparfait, la machine cesse de fonctionner au bout d'un certain temps, puisque le champ inducteur qu'elle produisait disparaît et désamorce la machine. Pour éviter l'inconvénient que nous signalons, *M. F. Carré* a remplacé la palette inductrice par un second plateau en caoutchouc durci ou en verre plus petit, toujours électrisé par frottement. On évite ainsi le désamorçage de la machine, dans laquelle on retrouve une machine à frottement qui sert à entretenir le champ électrique dans lequel évolue le plateau de la machine d'induction proprement dite.

Les duplicateurs de Bennet, de Nicholson et de Read sont les plus anciens ; le *replenisher*, ou rechargeur de sir W. Thomson est aussi fondé sur le même principe.

521. Replenisher de sir W. Thomson. — Cet appareil, combiné dans le but de maintenir constante la charge de l'aiguille d'un électromètre (227), se compose de deux lames de laiton A et B (fig. 254) isolées électriquement, à l'intérieur desquelles peuvent tourner deux autres lames P et Q, également isolées entre elles et tournant autour d'un axe O (fig. 255). Le bouton moleté E sert à mettre le système de lames P et Q en rotation. Les lames élastiques *a*, *b*, *c* et *d* établissent entre les secteurs A, B, P et Q des communications que l'on peut voir fa-

cilement à l'inspection de la figure 255. La petite différence de charge initiale entre A et B suffit pour assurer l'amorçage de la machine.

Supposons, pour fixer les idées, A chargé positivement. Le secteur mobile P se charge négativement par induction et cède

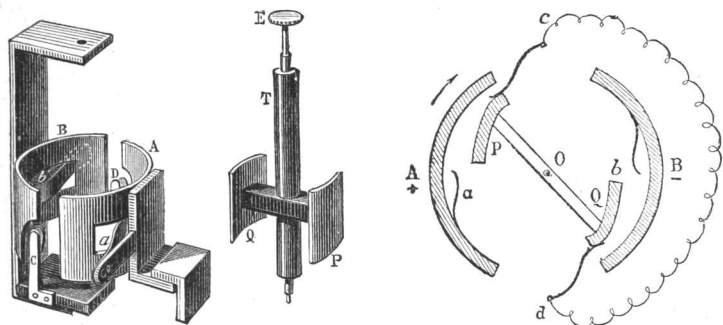


Fig. 254. — Replenisher de Thomson. Fig. 255. — Diagramme du replenisher.

sa charge au secteur B lorsque, par sa rotation, P vient toucher le ressort *b*. En touchant *d* le secteur P s'électrifie positivement par l'induction de B et cède sa charge à A lorsqu'il arrive en *a*, et ainsi de suite.

Il en est exactement de même, au signe près, pour le secteur mobile Q. Les charges s'accumulent et se *multiplient*, c'est de là que vient le nom de *multiplificateur* appliqué aux appareils fondés sur ce principe.

La machine de *Holtz* est un multiplificateur continu analogue, mais dont la théorie est plus complexe et dont on trouvera une excellente description dans le *Traité élémentaire d'électricité* de M. *Joubert* (t. I, p. 97).

522. Machine de Voss. — La machine de *Voss*, très employée aujourd'hui dans les laboratoires, est une modification heureuse de la machine de *Holtz* au point de vue de la simplicité et de la puissance spécifique. Elle se compose d'un plateau fixe jouant le rôle d'inducteur et d'un plateau mobile muni de boutons qu'un conducteur diamétral, muni de balais, vient mettre successivement en communication deux à deux pour égaliser leurs potentiels. Deux peignes collecteurs reliés à des bouteilles de *Leyde* permettent d'accumuler les charges succes-

sives que leur communiquent les boutons métalliques à leur passage devant ces peignes. La machine s'amorce par tous les temps sans qu'on lui communique une charge initiale. Son principe de fonctionnement est peu différent de celui du replenisher de Thomson (520).

Plus récemment, M. *Wimshurst* (1885) a réalisé une machine

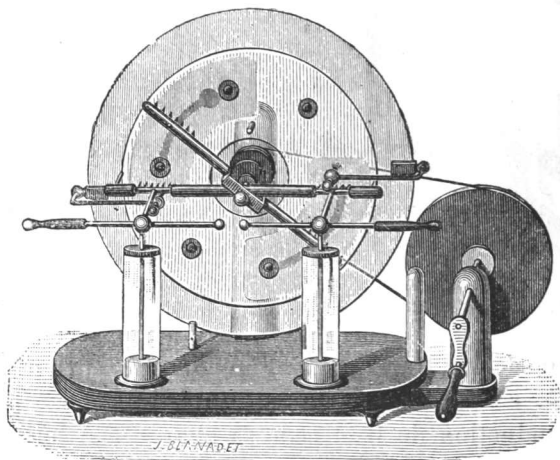


Fig. 256. — Machine de Voss.

d'induction dans laquelle l'inducteur et l'induit sont absolument identiques ⁽¹⁾. Elle se compose de deux disques de verre disposés parallèlement sur un axe commun et tournant en sens inverse. Sur chacun de ces disques sont collés un certain nombre de secteurs en papier d'étain portant chacun une pastille métallique destinée à prendre le contact des pinceaux de clinquant portés par deux conducteurs diamétraux. Des peignes horizontaux embrassent les disques et les conducteurs diamétraux sont disposés à 45° en avant du mouvement pour chacun des plateaux. Tous ces petits éléments s'induisent mutuellement et accumulent leurs charges par le jeu des contacts et des peignes, à la condition de produire un amorçage initial en approchant, par exemple, un bâton d'ébonite électrisé par frottement (90).

(1) HILLAIRET, *Société internationale des électriciens*. Séance du 4 novembre 1885.

523. Moteurs à charges électrostatiques. — Lorsqu'on met en présence des conducteurs et qu'on établit des communications avec des points de potentiel constant, nous savons que l'énergie du système tend à s'accroître et que la capacité tend vers un maximum, le travail est *positif*.

Si, lorsque cette position est acquise, par le jeu des communications, les potentiels sont répartis d'une façon différente, le système tendra vers une nouvelle position d'équilibre, et ainsi de suite. On pourra donc obtenir ainsi du travail mécanique et réaliser un *moteur à charges électrostatiques*.

C'est ce que montre expérimentalement la machine de Voss et toutes les machines fondées sur l'induction.

Les générateurs et les moteurs électrostatiques sont *réversibles* et permettent de réaliser un grand nombre d'expériences dans lesquelles l'énergie mécanique entre en jeu, comme nous allons rapidement l'indiquer dans le paragraphe suivant.

524. Effets des décharges électriques. — L'énergie emmagasinée par un système chargé a pour expression (133)

$$W = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} V^2 C = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}.$$

Lorsqu'on rétablit l'énergie électrique, cette énergie potentielle reparait sous forme de *décharge* et produit, suivant les cas, des effets mécaniques, calorifiques, lumineux, chimiques, magnétiques, physiologiques, etc.

Suivant sa nature, sa forme, son aspect, sa durée, l'énergie totale qu'elle représente et les conditions du milieu dans lesquelles elle *produit*, la décharge se manifeste sous forme d'*éclair*, d'*étincelle*, de *flux*, d'*effluve* ou de *courant*.

La décharge est *conductive* lorsqu'elle traverse un milieu solide plus ou moins conducteur où elle produit des effets variés. Le thermomètre de Riess, la fusion des métaux, le portrait de Franklin, le perce-verre, le perce-carte, etc., sont les principales expériences, variables à l'infini, qui mettent en relief les décharges conductives.

La décharge est *disruptive* lorsqu'elle se manifeste à travers un milieu gazeux qu'elle chauffe et rend le plus souvent lumineux.

Les étincelles produites par les machines et les condensateurs sont des exemples de décharges disruptives. Lorsque le débit du générateur est faible, bien que sa tension soit élevée, les décharges disruptives se présentent sous forme d'aigrettes, d'effluves ou de lueurs, tandis que la décharge disruptive d'un condensateur donne des étincelles chaudes, lumineuses et bruyantes.

Dans les gaz raréfiés, la décharge disruptive devient également lumineuse et caractéristique pour chaque gaz et chaque pression : l'œuf électrique et les tubes de Geissler sont les principales expériences qui mettent ces effets en relief, mais qui ne présentent pas, *jusqu'à nouvel ordre*, le moindre intérêt industriel.

Les effets *mécaniques* des décharges donnent lieu à un grand nombre d'expériences, telles que la grêle électrique, le carillon électrique, l'araignée électrique, l'arrosoir électrique, la danse du pantin, le tourniquet électrique, etc.

On peut même réaliser, avec la machine d'induction électrostatique, une véritable transmission de force motrice à distance. Il suffit de relier deux machines de Voss ensemble : en imprimant à l'une un mouvement de rotation, la seconde tourne elle-même. En intercalant une batterie de bouteilles de Leyde en dérivation, on pourra arrêter pendant quelque temps le mouvement de la machine génératrice, la réceptrice continuera à tourner en dépensant l'énergie emmagasinée dans la batterie, qui joue le rôle d'un accumulateur d'énergie sous forme de charge électrostatique.

Les effets *calorifiques* se manifestent par l'inflammation du coton-poudre et des gaz par l'étincelle, par le thermomètre de Kinnersley, le mortier électrique, le pistolet de Volta, l'eudiomètre, la fusion des fils de fer, l'expérience du portrait de Franklin, etc.

Les effets *lumineux* sont mis en évidence avec le tube, le globe et le carreau étincelants, les tubes à vide et les magnifiques expériences de M. Crookes sur la matière radiante.

Les effets *chimiques* se traduisent, tantôt par des décompositions des corps, tantôt par des combinaisons, la décharge servant ainsi, suivant les circonstances, à produire l'analyse ou la

synthèse. Citons, par exemple, la formation de l'acide cyanhydrique en faisant passer une série de décharges dans un mélange d'azote et d'acétylène, la formation de l'ozone par l'effluve, etc.

Les effets *physiologiques* sont des commotions et des secousses qui peuvent devenir dangereuses et même mortelles si les potentiels sont assez élevés et les quantités d'électricité mises en jeu assez grandes.

Il faudrait consacrer un volume entier à ces phénomènes, que nous nous contentons de signaler, et dont on trouvera la description dans tous les traités de physique. En réalité, ils ne diffèrent des phénomènes produits par les courants continus que par les tensions élevées et les faibles quantités d'électricité mises en jeu, et surtout le peu de durée de chaque décharge.

PHÉNOMÈNES DIVERS.

525. Phénomènes électrocapillaires. — En décomposant l'eau par une surface de mercure formant électrode négative, la différence de potentiel augmente avec la force électromotrice extérieure jusqu'à ce qu'il y ait dégagement de gaz. La tension superficielle et, par suite, les propriétés capillaires changent avec la polarisation. M. *Lippmann* a démontré (1873) que la tension du mercure en contact avec l'eau acidulée croît jusqu'à 0,9 volt et diminue ensuite à mesure que la polarisation augmente.

Ce phénomène particulier a été appliqué par M. *Lippmann* à un électromètre capillaire dont nous avons précédemment donné la description (506). Réciproquement, si on déforme la surface du mercure par un procédé mécanique quelconque, on fait varier la tension superficielle et le potentiel varie de telle manière que la tension superficielle correspondante tend à s'opposer au mouvement produit.

526. Phénomène de Hall ⁽¹⁾. — On place une feuille d'or collée sur une lame de verre entre les pôles d'un puissant électroaimant, le plan de la feuille d'or étant perpendiculaire à la direction des lignes de force. On fait traverser la feuille d'or par un courant, et on cherche à sa surface deux points au même

(1) *Philosophical Magazine*, mars et novembre 1880, septembre 1881, mai 1883.

potentiel que l'on relie par un galvanomètre. En excitant l'électro-aimant, on obtient une déviation permanente dans le galvanomètre, déviation qui change de sens lorsqu'on change le sens du courant traversant la feuille d'or ou celui du courant excitant l'électro. Pour l'or, le sens du courant est inverse de celui qu'aurait pris la feuille d'or libre de se mouvoir dans le champ ; il en est de même pour l'argent, l'étain, le cuivre, le laiton, le platine, le nickel, l'aluminium et le magnésium ; le sens est inverse pour le fer, le cobalt et le zinc : le plomb ne donne pas d'effet semblable. M. le professeur *Rowland* rattache ce phénomène à celui de la polarisation rotatoire magnétique (530), établissant ainsi une nouvelle preuve de la relation intime qui existe entre la lumière et l'électricité. M. *Shelford Bidwell* (1) est d'avis que le phénomène peut s'expliquer par la tension mécanique due à l'action électromagnétique et certains effets thermo-électriques dont la lame d'or est le siège. Nous signalons ces divergences d'opinion pour montrer combien les avis sont encore partagés sur ces phénomènes nouveaux qui semblent, par certains côtés, faire exception aux lois générales précédemment étudiées.

527. Pyro-électricité. — Les cristaux de tourmaline jouissent de la propriété de se charger d'électricité lorsqu'ils éprouvent des variations de température. Ce phénomène dit de la pyro-électricité est un des phénomènes électriques les plus anciennement connus. Les cristaux de tourmaline se présentent souvent sous la forme de prismes allongés dans le sens de l'axe principal du cristal. Si on chauffe un prisme de cette espèce, il se forme aux extrémités de l'axe des pôles électriques de noms contraires. Lorsqu'on a atteint une certaine température et qu'on cesse de chauffer, la tourmaline reste chargée pendant un temps considérable, car sa conductibilité électrique est à peu près nulle. On peut décharger les extrémités en les amenant au contact de conducteurs métalliques reliés au sol. En ramenant ensuite la température à ce qu'elle était primitivement on constate que pendant le refroidissement des pôles électriques de noms contraires se sont reformés aux extrémités du prisme ; mais la polarité est inverse de ce qu'elle était par échauffement.

(1) *Royal Society*, meeting du 21 février 1884.

Haüy, pour étudier le phénomène, plaçait les aiguilles de tourmaline horizontalement sur un petit support susceptible de pivoter sur l'extrémité d'une pointe. Lorsque la tourmaline était placée dans un champ électrique et éprouvait une variation de température, elle s'orientait absolument comme une aiguille aimantée s'oriente dans un champ magnétique.

Gaugain a étudié le phénomène en recueillant la charge à mesure qu'elle se produisait aux extrémités du cristal et en la mesurant avec son électromètre à décharge. Il a trouvé que les quantités d'électricité dégagées étaient toujours égales et de signes contraires aux deux extrémités du cristal. De plus le dégagement est proportionnel à la variation de température éprouvée par le cristal, proportionnel à la section du prisme et indépendant de sa longueur.

Le phénomène de la pyro-électricité se montre encore dans d'autres cristaux tels que ceux de calamine, de sucre, d'acide tartrique, de boracite, etc. Il est en relation directe avec certaines particularités de la forme cristalline. On est sûr de rencontrer le phénomène toutes les fois que la forme cristalline du cristal révèle une symétrie égale ou inférieure à celle d'un champ électrique.

528. Piézo-électricité. — Certains cristaux jouissent de la propriété de se charger d'électricité lorsqu'on les déforme par des actions mécaniques, d'où le nom de piézo-électricité donné à ce phénomène découvert en 1880 par MM. *J. et P. Curie*.

Tous les cristaux pyro-électriques sont en même temps piézo-électriques ; mais le phénomène se rencontre encore dans d'autres cristaux, tels que le quartz et la blende qui sont piézo-électriques mais ne dégagent pas d'électricité lorsqu'ils sont chauffés uniformément. Pour qu'une matière cristallisée soit piézoélectrique, il suffit que sa symétrie interne devienne inférieure à celle d'un champ électrique lorsqu'on lui fait subir des compressions ou des tractions dans certaines directions.

Le quartz est le meilleur corps à employer pour produire les phénomènes piézo-électriques parce que l'on peut s'en procurer des plaques d'assez grandes dimensions parfaitement pures. MM. *Curie* ont construit sous le nom de *quartz piézo-électrique* un appareil dont la partie essentielle est une plaque

de quartz convenablement taillée et dont les deux faces sont recouvertes d'étain. L'appareil constitue une sorte de condensateur dont la lame de quartz est le diélectrique et qui jouit de la propriété de se charger lui-même lorsque l'on exerce des tractions latérales sur la lame à l'aide de poids placés dans un plateau. Les quantités d'électricité dégagées sont proportionnelles à la traction; elles dépendent des dimensions de la lame. On a pour la quantité d'électricité dégagée q (en unités électrostatiques C.G.S.)

$$q = k \frac{L}{e} F$$

k est la constante diélectrique du quartz égale à $6,3 \cdot 10^{-5}$ en unités C.G.S. électrostatiques, L est la longueur de la lame dans le sens suivant lequel s'exerce la traction, e l'épaisseur de la lame et F la force de traction exprimée en dynes. Le quartz piézo-électrique constitue un étalon absolument invariable d'électricité. Joint à un électroscope, il peut servir à mesurer les charges électriques, les capacités, les pouvoirs inducteurs spécifiques et surtout les conductibilités des diélectriques.

529. Dilatation électrique du quartz. — Une idée émise par *Forbes* et *Becquerel* et précisée par *Maxwell*, pour expliquer les phénomènes pyro-électriques, peut être aussi adaptée à l'explication des phénomènes piézo-électriques. Elle consiste à supposer que les corps pyro-électriques et piézo-électriques sont polarisés intérieurement au point de vue électrique comme est polarisé, au point de vue magnétique, l'acier d'un aimant permanent. Seulement une couche d'électricité située à la surface est venue peu à peu, par conductibilité, compenser exactement l'effet extérieur des pôles, et pour qu'un phénomène électrique apparaisse il est nécessaire qu'une variation de température ou une variation de pression change l'état de polarisation interne et par suite l'intensité des pôles.

M. Lippmann a montré théoriquement, en se basant sur le principe de Carnot et le principe de la conservation de l'électricité, que les cristaux piézo-électriques doivent subir certaines contractions ou certaines dilatations lorsqu'on les place dans un champ électrique. *MM. Curie* ont constaté expérimentale-

ment l'existence des phénomènes de dilatation électrique entièrement conformes comme nature et comme grandeur à ceux prévus par la théorie. Ils ont aussi construit un *électromètre à bilame de quartz* basé sur ce phénomène (507).

ÉLECTRO-OPTIQUE.

On comprend sous le nom d'*électro-optique* l'ensemble des phénomènes qui, dans l'état actuel des connaissances, établissent une liaison directe entre les actions électriques et les actions lumineuses. Nous signalerons ici ceux qui présentent le plus d'intérêt.

530. Rotation électromagnétique du plan de polarisation de la lumière. — *Faraday* (1845) a découvert qu'un corps transparent traversé par un flux de force magnétique possède la propriété de faire tourner le plan de polarisation d'un rayon lumineux qui le traverse dans le même sens que le courant qui produirait ce champ magnétique, excepté pour les substances magnétiques qui, en général, font tourner le plan de polarisation en sens inverse du courant qui produirait le champ. Cette rotation est indépendante du sens de la propagation et ne dépend que de la direction du champ, de sorte qu'après n réflexions et passages à travers la substance étudiée, la rotation du rayon polarisé est n fois plus grande que si la substance n'avait été traversée qu'une fois.

Verdet a établi expérimentalement que, pour un rayon polarisé homogène, la rotation θ du plan de polarisation est proportionnelle à la longueur l de la substance traversée, à la composante $H \cos \beta$ de l'intensité du champ magnétique suivant la direction du rayon, et à un coefficient a appelé *constante de Verdet*, dépendant de la nature du corps, coefficient positif pour les substances diamagnétiques, négatif pour les substances magnétiques.

Pour expliquer, dans la théorie des ondulations, le pouvoir rotatoire magnétique, il faut admettre que l'état magnétique du milieu dans lequel le mouvement lumineux se propage modifie les lois d'électricité de l'éther, ou que cet état détermine la production de forces nouvelles, s'ajoutant à la force élastique de l'éther.

M. *Potier* ⁽¹⁾ s'est proposé de chercher, dans les idées de Fresnel, une explication du pouvoir rotatoire magnétique. Pour Fresnel, la matière pondérable participe dans une certaine mesure, variable avec la longueur d'onde, au mouvement lumineux. Cette participation a été mise hors de doute, indépendamment de toute hypothèse sur la nature de la lumière, par les expériences de M. Fizeau sur l'entraînement des ondes lumineuses par la matière pondérable en mouvement. D'autre part, dans un champ magnétique, chaque molécule devient un petit aimant dont l'axe, en l'absence de tout mouvement lumineux, est dirigé suivant le champ magnétique.

Pendant la propagation du mouvement lumineux, on doit donc supposer dans le milieu transparent de petits aimants disséminés et participant à ce mouvement. Si le rayon lumineux est perpendiculaire à la direction du champ, ces petits aimants, dont l'axe magnétique est dans le plan d'onde, se déplacent parallèlement à eux-mêmes, sans que leur axe magnétique change de direction, sans que leur moment magnétique varie et leur mouvement n'induit aucune force électromotrice dans le milieu ambiant; la propagation de la lumière, considérée comme une perturbation électromagnétique, n'est pas altérée.

Mais, si le rayon lumineux est dirigé suivant le champ, l'axe magnétique doit osciller dans le plan passant par le rayon et la vibration; sa direction change donc périodiquement, ainsi que les composantes de son mouvement magnétique, et des forces électromotrices perpendiculaires au plan dans lequel se meut cet axe sont induites; par conséquent, dans la théorie électromagnétique, il convient d'ajouter aux forces électromotrices induites par les courants du milieu ambiant (c'est-à-dire aux forces élastiques de la théorie ordinaire des ondu-lations) une force perpendiculaire à la vitesse, située dans le plan d'onde, périodique et proportionnelle à la vitesse angulaire de petits aimants, ce qui entraînera la rotation du plan de polarisation.

Ce résultat, à peu près évident *a priori*, peut s'établir par le calcul. Les équations auxquelles on arrive expriment que les

(1) *Académie des sciences*, séance du 11 mars 1889.

rayons circulaires de sens inverse se propagent avec des vitesses différentes ou que le milieu possède le pouvoir rotatoire. Ce pouvoir doit être, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnel à la composante, suivant le rayon lumineux, de l'intensité du champ magnétique : c'est la *loi de Verdet*.

La théorie électromagnétique de la lumière établit donc un lien entre les expériences de M. Fizeau et la découverte de Faraday.

Quoi qu'il en soit, le phénomène a été appliqué par M. *Becquerel* à la construction d'un *galvanomètre optique* constitué en principe par un tube de grande longueur terminé à ses extrémités par deux glaces planes parallèles, et rempli d'une substance à constante de Verdet la plus élevée possible.

Lorsque le tube renfermant la substance est entouré de N spires de fil traversées par un courant d'intensité I , la rotation produite θ a pour expression, en supposant le tube de longueur infinie

$$\theta = (4\pi NI)a$$

a étant la constante de Verdet propre à chaque substance.

M. *H. Becquerel* a trouvé, que pour le sulfure de carbone, la rotation du plan de polarisation des rayons jaunes d'une lampe à sodium traversant 1 mètre de longueur de sulfure de carbone à 0° C. dans un champ magnétique égal à 1 unité C.G.S. a pour valeur ⁽¹⁾

$$a = 0',04341.$$

M. *Potier* a signalé un liquide qui, toutes choses égales d'ailleurs, donne une rotation beaucoup plus grande pour une même intensité de courant. Ce liquide, que M. *Potier* a eu occasion d'étudier dans des recherches électro-optiques faites en commun avec M. *Cornu*, est une dissolution d'iodure mercurique dans l'iodure de potassium, proposé par M. *Thoulet* pour la séparation mécanique des minéraux ; le liquide saturé à 15 degrés C. a un pouvoir rotatoire magnétique 2,8 fois plus grand que celui du sulfure de carbone à la même température.

Avec une bobine de 5000 tours, un courant de 1 ampère don-

(1) *Société française de physique*, séance du 19 juin 1885.

nerait avec le sulfure de carbone une rotation de $291'$ et de $582'$ en renversant le courant.

Le liquide de M. Thoulet donnerait encore plus de sensibilité, car, d'après les expériences de M. Potier, un courant de 1 ampère environ passant dans une bobine de 50 cm de longueur et formant 5300 tours a donné dans un tube de 1 mètre de longueur une rotation simple de 115° . On pourrait se contenter d'une bobine 10 fois moins longue pour mesurer des courants de cet ordre. La proportionnalité absolue des rotations aux courants permettrait toujours d'étalonner rapidement un instrument à aimant à l'aide d'une semblable bobine. Le liquide proposé est stable et d'un maniement plus facile que le sulfure de carbone. C'est à un phénomène de même ordre que la polarisation rotatoire magnétique qu'il faut attribuer le fait découvert en 1877 par M. Kerr, de Glasgow, qu'un rayon de lumière polarisée éprouve une rotation lorsqu'il se réfléchit sur le pôle d'un aimant ou d'un électro-aimant.

C'est encore à une action optique qu'il convient de rapporter le phénomène assez mal expliqué de la variation de résistance électrique du *sélénium* exposé à la lumière, et découvert par M. May ⁽¹⁾, en 1872. Le *tellure* possède les mêmes propriétés, bien qu'à un moindre degré. Nous reviendrons sur ces propriétés à propos du *photophone*, dans le volume consacré aux applications industrielles.

531. Expériences de M. H. Hertz sur les ondulations électriques (1888). — Ces expériences ont pour but principal d'apporter une confirmation expérimentale aux vues de Faraday et de Maxwell sur la propagation des actions électromagnétiques, et la parfaite identité des ondulations électriques et lumineuses, ondulations qui ne diffèrent entre elles que par leurs amplitudes et leurs fréquences.

L'appareil employé par M. H. Hertz ⁽²⁾ se compose de deux tiges *t t'* placées dans le prolongement l'une de l'autre et à une faible distance. Sur ces tiges peuvent glisser deux sphères A, B qui servent à augmenter la capacité électrostatique du système.

⁽¹⁾ *Society of telegraph engineers*. Séance du 12 mai 1873.

⁽²⁾ H. HERTZ. *Wiedemann Annalen*, mai 1887, mars, avril, mai, décembre 1888. — J. JOUBERT. *Journal de physique*, mars 1889.

L'étincelle jaillit entre les deux boules C, D qui terminent les extrémités en regard des tiges. La capacité approximative de ce système peut se calculer par le diamètre des sphères A et B et son coefficient de self-induction L par les dimensions des tiges t et t' . En faisant glisser les sphères sur les tiges, on peut augmenter ou diminuer à volonté la longueur de celles-ci et faire varier L. Une bobine de Ruhmkorff est employée pour la charge des boules A et B. Lorsque ces boules ont atteint des potentiels suffisants, l'étincelle part entre les extrémités C D. Cette étincelle chauffe l'air entre les deux boules et prépare un chemin relativement conducteur pour les étincelles à plus bas potentiel qui se feront après elle. Quand cette décharge oscillante est terminée, une seconde vibration du trembleur de la bobine produit le courant induit qui doit élever les boules au potentiel voulu pour l'étincelle; le phénomène se reproduit ainsi indéfiniment.

Pour pouvoir étudier ces vibrations, il faut évidemment se placer dans des conditions telles que l'on ait des longueurs

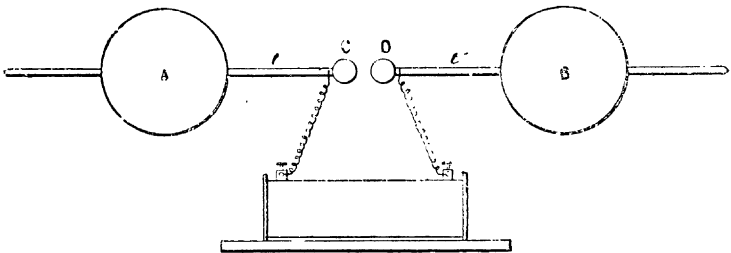


Fig. 257. — Expériences de M. Hertz sur les ondulations électriques.

d'onde relativement petites. Il faut donc arriver à des alternativités du potentiel extrêmement nombreuses dans un temps donné, telles qu'on ne peut les obtenir même avec les bouteilles de Leyde ou les bobines de Ruhmkorff. Dans une décharge oscillante, la durée de la période T , si la résistance est négligeable, est donnée par la formule :

$$T = 2\pi\sqrt{CL}$$

dans laquelle C est la capacité des conducteurs en farads et L leur coefficient de self-induction en quadrants. On peut dans

chaque décharge électrostatique arriver à une vibration assez rapide; il suffit de déterminer les valeurs de C et de L qui correspondent à une durée T assez faible pour que la longueur d'onde soit, par exemple, inférieure à 1 mètre.

Le dispositif de M. Hertz permet d'arriver à ce résultat, mais il est nécessaire que la bobine d'induction remplisse certaines conditions de dimensions et de réglage du trembleur pour avoir des effets bien caractéristiques. Il est aussi indispensable d'entretenir les boules entre lesquelles l'étincelle part dans le plus grand état de netteté.

Lorsque l'appareil fonctionne, il est la source de deux séries d'ondulations qui ont même période: celles qui propagent dans tout le milieu environnant l'action électrostatique et celles qui propagent l'action électromagnétique. Un point quelconque de l'espace est donc soumis simultanément à ces deux vibrations qui, par leurs modes d'action différents, pourront être étudiées soit séparément, soit dans leurs effets combinés.

Les lignes de force électrostatique se trouvent toutes dans des plans qui passent par les centres des deux boules A et B et vont de l'une à l'autre. Au contraire, les lignes de force électromagnétiques sont dans des plans normaux aux précédents et sont concentriques aux tiges t , t' , au moins pour la partie centrale de l'excitateur.

L'appareil employé par M. Hertz pour explorer le champ se compose d'un fil métallique recourbé sur lui-même circulairement, dont les deux extrémités sont terminées par de petites boules maintenues à distance l'une de l'autre par une vis micrométrique permettant de mesurer leur écartement. Lorsque ce cadre est coupé par les lignes de force électromagnétiques, l'induction, proportionnelle au flux de force qui traverse le cadre dans ces différentes positions, produit des étincelles qui ont une intensité maxima quand le plan du cadre passe par l'axe de l'excitateur. Outre ce phénomène, M. Hertz a constaté des effets absolument nouveaux dans lesquels l'induction simple n'a pas à intervenir.

M. Hertz a, en effet, remarqué que même lorsque le cadre est placé de telle façon qu'il ne soit coupé par aucune ligne de force magnétique, il y a un flux continu d'étincelles entre les

deux boules, mais que la position de l'étincelle par rapport au cadre n'était pas indifférente.

Avec des circuits de dimensions différentes, on observe que certains permettent d'obtenir les phénomènes avec beaucoup plus de netteté ; ce sont ceux pour lesquels les oscillations dans leur intérieur se font *synchroniquement* avec celles de l'excitateur.

M. Hertz pour l'étude du champ employait, concurremment avec le cadre, un autre appareil basé sur ce fait que, lorsque l'excitateur marche, on peut, dans tout le champ, tirer des étincelles entre deux objets métalliques quelconques, tels que des clefs ou des pièces de monnaie. Cet appareil se composait simplement de tiges métalliques assez longues placées dans le prolongement l'une de l'autre. En faisant varier la distance des deux extrémités en regard, on pouvait évaluer la grandeur des étincelles.

Dans les expériences faites au laboratoire central d'électricité, l'appareil a été complété en ajoutant (fig. 253) aux extrémités

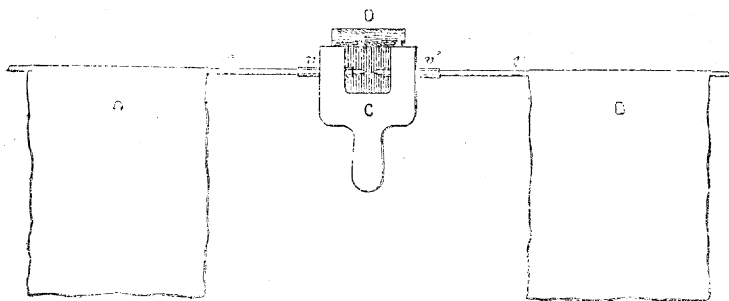


Fig. 253. — Explorateur de MM. Joubert et de Nerville.

extérieures des tiges t , t' des feuilles d'étain A, B qui, augmentant la capacité, rendent les effets beaucoup plus sensibles. Un morceau de bois C sert à maintenir les tiges à l'écartement voulu : deux tubes de verre v , v' dans lesquels passent les tiges les isolent l'une de l'autre ; un morceau de drap D placé derrière cache la lumière produite par l'excitateur.

Avec cet appareil, on a une sensibilité suffisante pour que l'on puisse obtenir des étincelles à une distance de 20 et 30 m de l'excitateur.

La distance à laquelle on obtient encore des effets sensibles est maximum, lorsque cet appareil est symétriquement placé par rapport au plan de symétrie de l'excitateur. On obtient des phénomènes de réflexion en plaçant en face de l'excitateur et parallèlement au plan vertical qui passe par son axe, un mur tapissé par des feuilles de zinc. Le zinc, comme tout autre corps bon conducteur, fait l'office de miroir pour l'électricité. Il se produit dans ce cas, comme dans celui des tuyaux fermés, un nœud sur la partie où l'onde se réfléchit, et une série de nœuds et de ventres après la réflexion par l'interférence des ondes se dirigeant sur le miroir et des ondes réfléchies. Dans cette expérience cependant on remarque que le nœud ne se trouve pas exactement sur la surface du zinc, mais à quelques centimètres derrière : cela tient, sans doute, à ce que le zinc n'est pas un conducteur parfait.

On dispose l'excitateur verticalement sur la ligne focale d'un miroir cylindrique parabolique en zinc. Une planche couverte de papier d'étain est placée à 45 degrés sur le faisceau réfléchi et un second miroir analogue au premier condense les ondes sur la ligne focale où l'on peut tirer, malgré la distance qui la sépare de l'excitateur, des étincelles assez vives.

M. Hertz a également obtenu des phénomènes de réfraction, de polarisation, etc. Les résultats indiquent que les radiations électriques se comportent absolument comme la lumière au point de vue qualitatif.

532. Expériences de M. O. Lodge. — Dans ses expériences, M. H. Hertz cherche à réaliser des ondes électriques de faible amplitude et de grande fréquence, se rapprochant le plus possible des ondulations lumineuses. M. *Oliver Lodge* (1889), prenant en quelque sorte la contre-partie des expériences de M. Hertz, est parvenu à produire des ondes de grande amplitude et d'une fréquence assez petite pour les rendre accessibles à l'ouïe. Le point de départ commun est la conception d'un milieu soumis à des tensions et à des ondulations dont nous n'observons que la résultante. C'est dans la décharge oscillante d'une bouteille de Leyde que M. O. Lodge trouve la confirmation expérimentale des idées de Faraday et de Maxwell. M. Lodge compare la décharge oscillante d'une

bouteille de Leyde à la vibration de l'anche d'un harmonium. Plus le ressort est tendu, et moins il est chargé, plus il vibre rapidement : le calcul permet de déterminer la période d'oscillation.

Le problème électrique comporte également une solution électrique. La flexibilité du ressort correspond à la capacité électrostatique ; l'inertie ordinaire de la matière est l'inertie électromagnétique ou la self-induction. L'accroissement de la capacité électrostatique correspond à un allongement du ressort, l'accroissement de la self-induction correspond à une charge.

L'amortissement des oscillations, c'est-à-dire la durée totale de la décharge est fonction de la résistance du milieu. Pour arrêter les oscillations d'un ressort vibrant, on lui applique un frottement ou on le fait mouvoir dans un milieu visqueux. Ce frottement peut être assez grand pour que les oscillations soient complètement supprimées ; le mouvement est un simple retour aperiodique à la position d'équilibre, retour qui peut durer, avec une résistance suffisamment grande, plusieurs heures et même plusieurs jours.

Ce cas, qui est fréquent avec les très grands condensateurs employés en télégraphie, est au contraire exceptionnel lorsqu'il s'agit d'une bouteille de Leyde. Il ne se produit qu'en intercalant dans le circuit une corde mouillée, un tube capillaire rempli d'eau distillée, un morceau de bois ou un conducteur particulièrement mauvais.

Mais, dans les conditions ordinaires, la décharge d'une bouteille de Leyde à travers un fil long ou court, entre les boules d'un excitateur ou entre ses bords, est du caractère oscillatoire.

Lorsque la décharge est faite au travers de l'eau ou du bois, elle n'est ni continue ni oscillante, mais intermittente : elle se fait par une série de ressauts, comme le mouvement d'un corps glissant sur une surface enduite de résine, parce que les bornes déchargent plus vite que le circuit ne peut fournir, de sorte que le flux est arrêté et recommence à nouveau. Une décharge semblable, composée en réalité d'une succession de petites étincelles, peut apparaître comme une décharge unique, mais

elle n'a pas la violence et ne produit pas le bruit de cette décharge unique, et un miroir tournant permettra de la décomposer et d'en montrer l'intermittence.

On peut donc dire que la décharge d'une jarre est oscillatoire ou intermittente, le cas intermédiaire pour lequel elle est aperiodique ne pouvant être réalisé qu'exceptionnellement, en prenant des précautions toutes spéciales.

Le frottement n'est pas la seule cause de l'amortissement des vibrations : celui-ci est dû aussi à l'énergie transmise au milieu environnant et consommée dans la production d'un son. C'est la formation et la propagation des ondes sonores qui amortissent les vibrations d'un instrument musical. Il en est de même pour l'électricité. La décharge oscillatoire d'une bouteille de Leyde perturbe le milieu environnant, le découpe en vibrations qui voyagent dans l'espace à une vitesse de 300 000 km par seconde, vitesse précisément égale à celle de la lumière.

La cause qui amortit les oscillations d'un circuit de décharge est la *radiation*, la radiation *électrique* si l'on tient à la distinguer, bien qu'elle ne diffère en rien de la radiation ordinaire ou de la radiation calorifique, comme on l'a si souvent nommée, et ne diffère en rien non plus de la lumière, si ce n'est dans le fait physiologique que le mécanisme de la rétine, quel qu'il soit, répond seulement à des ondulations d'une certaine longueur d'onde, tandis que les radiations, en général, sont des ondes dont la longueur varie entre 160 000 km et $\frac{1}{40\,000}$ de millimètre.

Une conséquence immédiate et d'une démonstration facile du caractère oscillatoire de la décharge d'une bouteille de Leyde est la production des phénomènes de *résonance sympathique*.

Un diapason peut en exciter un autre placé à une distance raisonnable s'ils sont parfaitement accordés ; le même diapason peut aussi mettre en vibration sympathique une corde tendue accordée à l'unisson avec lui ou avec l'une de ses harmoniques simples. Ces faits ont leurs correspondants en électricité : la décharge d'une bouteille de Leyde peut exciter une bouteille de

Leyde voisine synchronique et lui faire percer son diélectrique si celui-ci est suffisamment mince et peu résistant. Si on rompt l'unisson des deux bouteilles en faisant varier la capacité ou en mettant un fil plus long dans l'un des circuits, cet effet ne se produit plus.

Pour rendre visibles et audibles les oscillations de l'étincelle produite par la décharge d'une bouteille de Leyde, il faut réduire le nombre de vibrations, qui varie de 100 000 à 1 000 000 par seconde, à un nombre assez bas pour que l'oreille en soit frappée. Comme dans le cas d'un ressort vibrant, il faut pour cela augmenter la flexibilité et la charge en employant la plus grande quantité de jarres possible, et en augmentant suffisamment le coefficient de self-induction, on peut arriver à n'avoir plus que 500 vibrations par seconde, hauteur de la note qui occupe le milieu du clavier du piano.

On comprend pourquoi nous obtenons une note musicale : le bruit de l'étincelle est dû à un échauffement subit de l'air, mais si la production de chaleur est oscillatoire, le son le sera de même, mais à une octave au-dessus de l'oscillation électrique, parce que deux impulsions thermiques accompagneront chaque vibration électrique, la chaleur produite étant indépendante de la direction du courant.

Après avoir ainsi abaissé la fréquence des oscillations électriques, il devient facile de les observer ; leur analyse optique ne présente pas de difficulté : de simples jumelles que l'on fait frétiler dans les mains en regardant l'étincelle la font apparaître comme une bande lumineuse découpée. Un miroir tournant à quatre faces, animé d'une vitesse angulaire de 2 à 3 tours par seconde, suffit aussi pour montrer les décharges successives.

Pour un seul observateur, il est facile de disposer un contact sur l'axe tournant du miroir, contact qui produit la décharge au moment opportun, l'observateur regardant le phénomène dans une lunette ou dans une jumelle de théâtre ordinaire. Pour un nombreux auditoire, il faut employer un artifice, tel que celui de produire plusieurs décharges au lieu d'une seule, de multiplier les images d'une décharge unique, ou d'employer plusieurs miroirs tournants.

La meilleure disposition consiste à combiner une décharge intermittente et une décharge oscillante. A cet effet, le circuit de décharge se compose de deux parties, l'une de grande résistance pour fournir des intermittences, et l'autre de résistance ordinaire pour produire une décharge oscillatoire : le miroir tournant analyse et décompose chacune des décharges intermittentes en une bande lumineuse découpée. On n'a plus alors une étincelle, mais une succession d'étincelles qui agissent comme une seule, et assez séparées dans le miroir tournant pour être visibles de tous les côtés de la salle à la fois.

Mais il faut pour cela une source électrique puissante qui charge la batterie non seulement une fois, mais plusieurs fois de suite en un clin d'œil. Cet appareil est une bobine d'induction dont le circuit secondaire a une résistance suffisante pour produire une décharge intermittente. Une seule étincelle donne une quantité d'électricité suffisante pour remplir la jarre et produire plusieurs décharges consécutives.

On entend les étincelles produisant les mêmes notes que précédemment, mais avec un bruit de crécelle en plus, indiquant ainsi à la fois les intermittences et les oscillations. En faisant tourner le miroir, chacun peut voir l'une ou l'autre des bandes de lumière découpées après presque chaque rupture du circuit primaire de la bobine. C'est cette expérience à laquelle M. le professeur Oliver Lodge donne le nom d'*étincelle musicale*.

Le phénomène de la rotation du plan de polarisation de la lumière par l'effet d'un courant continu ou d'un champ magnétique, peut être également obtenu à l'aide de la décharge d'une bouteille de Leyde, comme l'ont montré il y a quelques années MM. *Bichat* et *Blondlot*.

Pour rendre le phénomène visible à un nombreux auditoire, M. Lodge charge la jarre avec une machine de Wimshurst et la décharge dans une spirale de fil entourant un tube renfermant du sulfure de carbone. L'analyseur de Nicol ayant amené l'obscurité, on peut apercevoir sur l'écran une restitution momentanée de lumière à chaque étincelle. Le caractère oscillatoire de cette restitution lumineuse est rendu sensible en interposant un biquartz entre les nicols. Avec un courant continu, ce système constitue un indicateur sensible de la rotation

du plan de polarisation, la teinte sensible tournant au vert d'un côté et au rouge de l'autre.

Avec un courant oscillatoire, le biquartz n'indique aucun changement de coloration. Cette preuve est confirmée par une seconde. Lorsqu'on fait tourner l'analyseur dans un sens ou dans l'autre, on affaiblit la restitution instantanée de lumière, mais on l'affaiblit d'une quantité égale pour une rotation égale, quel qu'en soit le sens. La preuve la plus convaincante consiste à faire tomber la lumière venant du tube sur le miroir tournant, après avoir traversé le polariseur et l'analyseur. A chaque décharge, la traînée lumineuse devient brillante par places, produisant de véritables perles lumineuses montrant les oscillations de la lumière polarisée absolument synchrones avec les oscillations que fournit l'étincelle elle-même.

533. Conclusions. — Toutes ces expériences et un grand nombre d'autres que nous pourrions citer tendent à confirmer l'idée émise par *Faraday*, établie théoriquement par *Maxwell*, que les phénomènes électriques, magnétiques, calorifiques et lumineux sont le résultat d'ondulations d'amplitude et de fréquence variables et variées, se transmettant à distance, avec une grande vitesse de propagation, dans tout l'univers, par l'intermédiaire d'un milieu vague infiniment subtil appelé *éther*, qui échappe encore à tous nos sens, et dont nous ne pouvons percevoir la présence que par l'imagination, que *M. H. Rowland* appelle l'œil de l'esprit.

Dans l'état actuel de la science, nous sommes donc conduit à nous associer aux conclusions de *M. H. Hertz*, relativement à l'identité de la lumière et de l'électricité ⁽¹⁾ :

« Les antiques systèmes de physique se résumaient en disant que tout est formé d'air et de feu. Bientôt la physique moderne se demandera si toutes les choses existantes ne sont pas des modalités de l'éther. C'est là la fin dernière de notre science; ce sont les sommets ultimes auxquels nous puissions espérer d'atteindre. Y parviendrons-nous jamais? Sera-ce bientôt? Nous n'en savons rien. Mais nous sommes montés plus haut que jamais, et nous possédons un point

(1) Communication faite au 62^e Congrès des naturalistes et médecins allemands à Heidelberg. *Revue scientifique* du 26 octobre 1889.

« d'appui solide qui nous facilitera l'ascension et la recherche
 « de vérités nouvelles. La voie qui s'ouvre à nous n'est pas
 « trop escarpée, et la prochaine étape ne paraît pas inacces-
 « sible... »

En attendant que de nouvelles expériences transforment la probabilité de ces hypothèses en une certitude absolue, l'industrie a su profiter des résultats déjà acquis dans un grand nombre d'applications importantes.

Leur examen fera l'objet du second volume de ce Traité.

ERRATA

- Page 8, ligne 2 en remontant. *Au lieu de* : rapport de l'espace parcouru L au, *lisez* : quotient de l'espace parcouru L par le.
 (La même incorrection de langage se répète un certain nombre de fois dans le cours de l'ouvrage. Le lecteur corrigera de lui-même.)
- 12, ligne 8. *Au lieu de* : *gramme-masse*, *lisez* : *grammes-masse*.
- 188, ligne 12. *Au lieu de* : Nous reviendrons à, *lisez* : Nous reviendrons sur.
- 205, ligne 5. *Au lieu de* : astatique, *lisez* : apériodique.
- 257, ligne 8. *Au lieu de* : loi de, *lisez* : loi des.
- 437, ligne 4. *Au lieu de* : différenciant, *lisez* : différentiant.

INDEX

Les numéros renvoient aux paragraphes.

A

- α (Résistance électrique spécifique), 168.
- Absolu** (Condensateur —), 270.
— (Électromètre —) de sir W. Thomson, 236.
- Absorption**, 274.
— électrique, 130.
- Accélération**, 18.
- Accumulateurs**, 327.
— (Formation des —), 329.
- Accumulateurs divers**, 330.
— (Facteurs caractéristiques d'un —), 331.
- Actions des charges électrostatiques** (Loi des —), 96.
- Action locale**, 301.
— magnétiques (Sens des), 70.
- Adynamiques** (Conducteurs —), 365.
- Agonique** (Ligne —), 83.
- Aimant**, 51.
— compensateur, 146.
- Aimantation** (Constantes d' —), 392.
— due aux courants, 391.
— (Durée d' —), 458.
— (Influence de la température sur l' —), 400.
— (Intensité d' —), 395.
- Aimants armés**, 73.
— (Énergie intrinsèque des —), 381, 384.
- Aimants** (Énergie potentielle des —), 381, 382.
— et courants équivalents, 196.
— (Force portante des —), 404.
— lamellaires, 380.
— permanents (Affaiblissement des —), 399.
— solénoïdal, 379.
— uniforme, 377.
— (Pôles d'un —), 51.
- Aimantation temporaire**, 430.
— induite (Coefficient d' —), 68.
— (Intensité d' —), 61.
— (Procédés d' —), 72.
- Air** (Condensateur à —), 270.
- Ajustement des faibles résistances**, 190.
- Alliages** (Résistance des —), 172.
- Alternatifs** (Courants —), 267.
- Amorces**, 339.
- Amorti** (Mouvement —), 44.
— (Galvanomètre —), 203.
- Amortissement des appareils de mesure**, 427.
- Amortisseur**, 44.
- Amortissement des oscillations**, 44.
- Ampère**, 167.
— (Formule d' —), 359.
— (Règle d' —), 142.
— (Transformation de la formule d' —), 363.
— -étalon de M. Pellat 371.

Ampère -heure, 167.
 — -tôt, 403.
Ampéremètre, 210.
 — de sir W. Thomson, 212.
 — thermique, 341.
 — seconde, 167.
Amplitude d'oscillation, 41.
Angle, 13.
 — (Mesure des —), 39, 40.
 — d'écart, 42.
Angulaire (Vitesse —), 16.
Anions, 317.
Anode, 317.
Anneau de garde, 232.
Apériodique (Mouvement —), 46.
Appareils de mesure (Amortissement des —), 427.
Armature d'un aimant, 73.
 — d'un condensateur, 121.
Astatique (Conducteur —), 363.
 — (Galvanomètre —) de Thomson, 202.
 — (Système —), 146.
Atmosphère, 23.
Atmosphérique (Électricité —), 242.
Attraction (Électromètre à —) de sir W. Thomson, 234.
 — électrique, 86.
 — magnétique, 53.
Auto-induction, 439.

B

B (Induction magnétique), 66.
B.-A. (Unité), 170.
Balance d'induction, 487.
 — électrodynamique de sir W. Thomson, 372.
Balistique (Galvanomètre —), 278, 279.
 — (Méthode —), 269.
Barlow (Roue de —), 433.
Batterie électrostatique, 130.
Bifilaire (Suspension —), 50.
Bobines (Pont à —), 179.
 — de sûreté ou de réaction, 496.
 — de champ galvanique maximum, 193.
 — d'induction parfaite, 463.
 — d'induction de Ruhmkorff, 486.

Boîte de résistances, 177.
Boussole, 78.
Bouteille de Leyde, 129.

C

C, c (Capacité), 114, 164.
Cadrans (Boîtes à —), 178.
Caisse de résistances, 177.
Calorie, 34.
Calorifiques (Actions —) du courant, 335.
Capacité, 269.
 — des condensateurs en unités électromagnétiques, 292.
 — électromagnétique, 164.
 — d'un électromètre, 240.
 — électrostatique, 92, 114.
 — inductive spécifique, 129, 275.
 — spécifique, 331.
 — (Mesure des —), 287.
 — de polarisation, 320.
 — (Self-induction et —), 446.
Capillaire (Électromètre), 50.
Cardew (Voltmètre de —), 340.
Carpentier (Électromètre apériodique de M. J. —), 229.
Cartes magnétiques, 83.
Cation, 317.
Cathode, 317.
Cascade (Charge des condensateurs en —), 131.
Centigrade (Degré —), 33.
Centimètre, 7.
 — par seconde, 15.
 — par seconde par seconde, 18.
Centrifuge (Force —), 22.
C.G.S. (Système —), 14.
Chaleur, 34.
 — (Transport électrique de la —), 350.
 — spécifique d'électricité, 350.
 — (Équivalent mécanique de la —), 35.
Champ électrique, 104.
 — galvanique, 144, 387.
 — galvanique (Intensité du —), 147.
 — galvaniques (Calculs des —), 193.
 — magnétique, 62.

- Champ** (Intensité du —) produit par un élément de courant, 151.
 — magnétique (Mesure d'un —), 508, 509, 510.
 — uniforme, 62.
- Charge**, 91.
 — (Distribution des —), 102.
 — électrostatiques (Lois des actions des —), 96.
 — (Limite de —), 102.
 — (Partage des —), 92.
 — électriques (Répartition des —), 99.
 — résiduelle, 273.
- Cheval-vapeur**, 27.
- Children** (Chaîne de —), 336.
- Circuit** inducteur, 461.
 — induit, 461.
 — magnétique, 71, 390.
 — magnétique de perméabilité variable, 456.
 — primaire, 461.
 — secondaire, 461.
- Clamond** (Pile —), 354.
- Cloisonnement** des bobines d'induction, 486.
- Coefficient** d'aimantation, 68.
 — de Coulomb, 49.
 — d'induction (Calcul des —), 468.
 — d'induction mutuelle (Détermination des —), 478.
 — d'induction mutuelle (Étalons de —), 477.
 — de Neumann, 386.
 — de self-induction, 439.
 — de self-induction (Détermination des —), 448.
 — de self-induction (Mesure des —) par les courants alternatifs, 495.
 — de température, 171.
 — de torsion d'un fil, 49.
- Coercitive** (Force —), 66.
- Collecteur**, 121.
- Comparaison** des étalons, 185.
- Compensation** (Résistance de —), 189.
- Composante** horizontale, 80.
 — verticale, 80.
- Compteurs** d'électricité, 283, 342.
- Condensant** (Pouvoir —), 121.
- Condensateurs**, 121.
 — absolus, 123.
 — à air, 270.
 — des bobines d'induction, 486.
 — (Capacité des —) en unités électromagnétiques, 292.
 — (Couplage des —), 131.
 — (Décharge d'un —), 272, 273.
 — (Décharge oscillante d'un —), 447.
 — à diélectrique solide, 274.
 — (Électroscope —), 132.
 — (Énergie potentielle des —), 135.
 — étalon, 270, 276.
 — parfait ou absolu, 270.
 — (Période variable de charge d'un —), 271.
 — (Théorie des —), 122.
- Condenseur**, 121.
- Conductance**, 169.
- Conductance** spécifique, 169.
- Conducteurs** adynamiques, 365.
 — astatiques, 365.
 — (Corps —), 93.
 — (Fusion des —), 338.
- Conductibilité**, 169.
 — relative, 169.
 — spécifique, 169.
- Conduction** (Décharge par —), 524.
- Constante** d'un appareil de mesure.
 — diélectrique, 129.
 — d'un galvanomètre, 220.
 — d'un générateur électrique, 245.
 — de temps, 441.
- Contact** (Force électromotrice de —), 294.
 — (Loi du —), 295.
 — (Phénomène de —), 293, 294.
 — successifs (Loi des —), 296.
- Continu** (Courant —), 139.
- Corps** anélectriques, 93.
 — diamagnétiques, 69.
 — électriques, 86, 93.
 — électrisés, 90.
 — magnétiques, 55, 69.
 — paramagnétiques, 55, 69.
- Coulomb**, 167.
 — (Lois de —), 57.

Coulomb (Théorème de —), 107.
Coupe-circuits, 339.
Couplage des condensateurs, 131.
 — des générateurs électriques, 247.
Couple, 28.
 — (Mesure des —), 48.
 — de torsion, 48.
Courant (Action de deux éléments de —), 359.
 — (Actions calorifiques du —), 335.
 — (Aimantation due aux —), 391.
 — alternatifs, 267, 488.
 — alternatifs (Électrolyse par les —), 498.
 — alternatifs (Répulsions électrodynamiques produites par les —), 497.
 — alternatifs (Résistance efficace des conducteurs de grosse section aux —), 494.
 — dérivés (Lois des —) dans le régime variable, 5.
 — (Période variable d'un —), 440.
 — périodiques (Intensité efficace des —), 504.
 — thermo-électriques, 345.
 — (Actions magnétiques du —), 141.
 — continu, 139.
 — équivalents (Aimants et —), 196.
 — (Densité de —), 161.
 — de Foucault, 409, 420.
 — induits de différents ordres, 466.
 — d'induction mutuelle, 461.
 — redressés (Intensités des —), 505.
 — de rupture, 442.
 — électrique, 139.
 — (Indicateurs de —), 407.
 — induit (Direction du —) dans un conducteur rectiligne, 418.
 — induits (Sens des —), 412.
 — (Intensité de —), 153.
 — ondulatoires, 268.
 — périodiques (Mesure des —), 373.

Courants redressés, 267.
 — (Régime permanent d'un —), 440.
Court-circuit d'une pile, 246.
Curie (Électromètre de MM. —) et Blondlot, 230.
Cuve électrolytique, 317.
Cycle magnétique, 397.

D

D (Densité), 23.
d, diamètre; distance.
d, différentielle.
Débit spécifique, 331.
Décades (Boîtes à —), 178.
Décalage, 490.
 — (Mesure du —), 493.
Décharge, 91.
 — d'un condensateur, 272, 273.
 — conductive, 524.
 — continue, 447.
 — disruptive, 524.
 — électriques (Effets des —), 524.
 — oscillantes, 447.
Décimale (Notation —), 10.
Déclinaison, 75, 78.
Déclinomètre, 78.
Décrément, 45.
 — logarithmique, 45.
Densité, 23.
 — de courant, 161.
 — électrique, 101.
 — magnétique, 377.
Dépolarisation par diffusion, 320.
 — des piles, 305.
Dérivation, 173.
Dérivés (Courants —), 173.
Désaimantation (Durée de —), 458.
Déviations, 39.
Diamagnétisme, 402.
Diélectrique, 92, 128.
 — solide (Condensateurs à —), 274.
Différence de potentiel, 162.
Différentiel (Galvanomètre —), 206.
Dilatation électrique du quartz, 529.
Dimensions, 5.
Disque de Faraday, 434.
Disruptive (Décharge —), 524.

Distribution des charges, 102.

Durée d'une oscillation, 41.

Dyne, 19.

Dyne-seconde, 29, 30.

E

E (Force électromotrice), 140.

ϵ (Élongation), 41.

e (Différence de potentiel), 162.

e (Base des logarithmes népériens).

Eau (Décomposition de l'—) par l'électrolyse, 321, 498.

Écrans électriques, 100.

— d'induction, 467.

Échelle transparente, 40.

Effets des courants de la bobine d'induction, 486.

— des décharges électriques, 524.

— Peltier, 348.

— Thomson, 350.

Électricité, 86.

— atmosphérique, 242.

— (Compteurs d'—), 283.

— (Quantité d'—), 98.

— négative, 89.

— positive, 89.

— résineuse, 88.

— vitreuse, 88.

Électrique (*Voir les mots correspondants auxquels cet adjectif se rapporte*).

Électrisation des corps isolants, 519.

— par frottement, 90.

— (Sources d'—), 94.

Électrisé (Corps —), 000.

Électro-aimants, 403, 405.

— (Expériences de M. Leduc sur les —), 405.

— (Force portante des —), 404.

Électrocalorimètre, 503.

Électro-capillaires (Phénomènes—), 525.

Électrochimie, 297.

Électrochimique (Équivalent—), 299.

— (Lois des actions —), 298, 299, 300.

Électrodes, 317.

— (Polarisation des —), 318.

Électrodynamique, 358.

— (Rotation —), 366, 431.

— (Rapport de l'unité —) à l'unité électromagnétique d'intensité de courant, 362.

— (Balance —) de sir William Thomson, 372.

— (Répulsion —) produite par les courants alternatifs, 497.

— (Système —), 360.

Électrodynamomètre, 367.

— balance, 369.

— de M. Pellat, 370.

— de MM. Siemens et Halske, 368.

Électrolyse, 317.

— (Exemples d'—), 321.

— de l'eau, 321.

— des métaux, 321.

— des sels, 321.

— de l'acide fluorhydrique, 321.

— (Effets secondaires de l'—), 322.

— par les courants alternatifs, 498.

Électrolyte, 317.

Électrolytique (Cuve —), 317.

Électromagnétisme, 391.

Électromagnétique (Induction —), 408.

— (Rotations —), 366, 432.

— (Système —), 152.

— (Système — C.G.S., pratique, 167.

— (Rapport de l'unité électrodynamique à l'unité —), 362.

Électromètre, 137, 223.

— aperiodique de M. J. Carpentier, 229.

— à attraction, 232.

— à bilame de quartz de MM. Curie, 507.

— à quadrants, 225.

— (Capacité d'un —), 240.

— capillaire, 506.

— de MM. Curie et Blondlot, 230.

— Lippmann, 506.

— à répulsion, 224.

— symétrique, 225.

Électrométrie, 222.

Électro-optique, 330.
Électroscope, 95, 137.
 — condensateur, 132.
Électrophore, 138.
Électrostatique, 86.
 — (Induction —), 117.
 — (Machines —), 518.
 — (Moteurs —), 323.
 — (Potentiel —), 110.
 — (Pression —), 108.
 — (Système —), 97.
Électrothermie, 335.
Éléments de courant (Action de deux —), 339.
Elongation, 41.
Énergie cinétique, 32.
 — disponible, 331.
 — électrique, 1, 163, 517.
 — électrique (Générateurs d' —) théoriques, 244.
 — intrinsèque d'un aimant, 384.
 — potentielle, 133.
 — potentielle des aimants, 381, 382.
 — potentielle des charges électriques, 133.
 — relative de deux circuits, 463.
 — spécifique, 331.
 — thermique, 335.
Équateur magnétique, 83.
Équilibre électrique, 91.
Équipage mobile, 197.
Équipotentiellés (Surfaces —), 113.
Équivalent mécanique de la chaleur (Détermination de l' —), 343.
 — électrochimique, 299.
 — mécanique de la chaleur, 35.
Erg, 26.
 — par seconde, 27.
Étalon, 2.
 — de coefficient d'induction mutuelle, 477.
 — (Comparaison des —), 185.
 — (Condensateur —), 270.
 — (Pile —), 311.
 — pratique de résistance, 176.
 — prototype de résistance, 174.
 — secondaire de résistance, 175.
États électriques, 88.
Étalonnage d'un galvanomètre, 219.
État neutre, 91.

Étincelle, 241.
Extra-courant, 442.

F

F, f (Force), 19.
 Φ (Flux de force), 64.
 \mathfrak{F} (Force magnétomotrice), 390.
Fantômes galvaniques, 144.
 — magnétiques, 52.
Farad, 167.
Faraday (Disque de —), 434.
 — (Lois de —).
 — (Théorème de —), 118.
Fer doux.
Feuillet galvanique, 388.
 — magnétique, 380.
 — magnétiques (Énergie relative de deux —), 386.
 — (Puissance magnétique d'un —), 380.
Filet magnétique, 378.
Flux de force électrique, 106.
 — de force magnétique, 64, 378.
 — d'induction (Conservation du —), 119.
 — d'induction (Détermination du —), 459.
Forbes (Compteur de —), 342.
Force, 19.
 — centrifuge, 22.
 — coercitive, 66.
 — condensante, 122.
 — électrique, 105.
 — électrique (Flux de —), 106.
 — électromotrice, 140, 162.
 — électromotrices (Calcul des —) par les chaleurs de combinaison, 303.
 — électromotrice d'induction, 413.
 — électromotrice efficace, 489.
 — électromotrice (Étalon de —), 311.
 — électromotrice de contact, 294.
 — électromotrice des générateurs électriques, 251.
 — électromotrices (Mesure des —), 506.

- Force** électromotrice moyenne, 489.
 — électromotrice de polarisation (Mesure de la —), 319.
 — électromotrices des piles (Tableau des —), 309.
 — (Impulsion d'une —), 29.
 — (Ligne de —), 378.
 — exercée par la pesanteur, 20.
 — magnétique, 56.
 — magnétisante, 392.
 — magnétomotrice, 390.
 — motrice (Transmission de —), 436, 437.
 — portante des aimants, 404.
 — portante des électro-aimants, 404.
 — (Tube de —), 378.
- Formation** des accumulateurs, 329.
- Formule** d'Ampère, 359.
 — de mérite d'un galvanomètre, 221.
 — de Laplace, 149.
 — de Neumann, 386.
- Foucault** (Courants de —), 420.
- Fréquence**, 488.
- Fusion** des conducteurs, 338.
- G**
- g (Gramme), 8, 21.
 g (Accélération due à la pesanteur), 18.
 γ (Accélération), 18.
- Galvanique** (Champ —), 387.
 — (Feuillet —), 388.
 — (Solénoïde —), 387.
- Galvanomètres** (Classification des —), 197.
 — (Principe des —), 155.
 — (Définition des —), 197.
 — amorti, 203.
 — apériodique, 203, 208.
 — apériodique de MM. Deprez et d'Arsonval, 208.
 — astatique de Thomson, 202.
 — balistique, 278, 279.
 — balistiques (Shuntage des —), 428.
 — à circuit mobile, 207.
- Galvanomètre** (Constante d'un —), 220.
 — différentiel, 206.
 — (Étalonnage d'un —), 219.
 — (Formule de mérite d'un —), 221.
 — (Graduation d'un —), 218.
 — à indications rapides, 214.
 — à mercure de M. Lippmann, 209.
 — optique de M. Becquerel, 530.
 — (Shuntage des —), 189.]
 — des sinus, 205.
 — des tangentes, 156, 199.
 — des tangentes (Formule du —), 200.
 — des tangentes (Théorie du —), 157.
 — (Mesure de la résistance d'un —), 216.
 — de sir W. Thomson, 201.
 — de torsion de MM. Siemens et Halske, 213.
 — de Wiedemann, 204.
- Galvanométrie**, 193.
- Gaugain** (Galvanomètre des tangentes de —), 158.
- Galvanoscope**, 143.
- Garde** (Anneau de —), 232.
- Gauss** (Système de —).
 — (Méthode de —), 81.
 — (Théorème de —), 106.
- Gaz** (Pile à —), 310.
- Générateur** électrique, 139, 244.
 — électrique (Constantes d'un —), 245.
 — électriques (Couplage des —), 247.
 — (Force électromotrice des —), 251.
 — périodique simple, 488, 489, 490, 491.
 — thermo-électrochimique, 355.
- Génératrice**, 436.
- Giration** (Rayon de —), 31.
- Graduateur** des bobines d'induction, 486.
- Graduation** d'un galvanomètre, 218.
- Gramme**, 21.
 — masse, 8.
- Grammètre**, 26.

H

- H** (Intensité de champ magnétique), 64.
HC (Force magnétisante), 392.
Hall (Phénomène de —), 526.
Hertz (Expériences de M. —) sur les ondulations électriques, 533.
Hétérostatique (Méthode —), 227.
Homogénéité, 6.
Homostatique (Méthode —), 227.
Horizontale (Composante —), 80.
Horse-power, 27.
Hydro-électriques (Piles —), 301, 302.
Hystérésis, 397.
 — (Énergie dissipée par l'—), 457.

I

- I** (Intensité de courant), 153.
J (Intensité d'aimantation), 61.
Idiostatique (Méthode —), 227.
Impulsion d'une force, 29.
Inclinaison, 75, 79.
Inclinomètre, 79.
Index, 197.
Indicateurs de courant et de potentiel, 210, 407.
Indications rapides (Galvanomètres à —), 214.
Inductance, 439.
Inducteur, 461.
Induction (Balance d' —), 487.
 — (Bobine d'—) parfaite, 465.
 — (Calcul des coefficients d'—), 468.
 — (Définition de l'unité C.G.S. de force électromotrice par l'—), 419.
 — électrique, 104, 117.
 — électromagnétique, 408.
 — électrostatique (Machines d'—), 520.
 — (Formules élémentaires de l'—), 417.
 — (Force électromotrice d'—), 413.
 — (Loi générale de l'—), 409.
 — magnétique, 66, 393.
 — mutuelle, 461.
 — mutuelle dans les circuits à

perméabilité magnétique variable, 484.

- Induction** mutuelle de deux circuits, 462.
 — propre, 439.
 — (Travail d'—), 415.
 — unipolaire, 433.
Induit, 461.
 — (Courants —) de différents ordres, 466.
Inertie, 19.
 — (Moment d' —), 31.
Influence, 117.
Intensité, 193.
 — d'aimantation, 61.
 — de champ électrique, 105.
 — de champ magnétique, 63.
 — d'un courant, 140, 153.
 — (Mesure de l' —), 503.
 — de courant (Unité électrodynamique d'—), 360.
 — du champ magnétique terrestre, 77.
 — efficace, 489.
 — efficace des courants périodiques, 504.
 — moyenne, 489.
 — de pôle, 59.

Interrupteur de bobine d'induction, 486.

Inversion thermo-électrique, 347.

Ion, 317.

Isochrones (Oscillations —), 42.

Isoclinique (Ligne —), 83.

Isodynamique (Ligne —), 83.

Isogonique (Ligne —), 83.

Isolants (Corps —), 92.

Isolateurs, 242.

Isolement (Résistance d' —), 188.

Isoloirs, 242.

J

Jarres, 130.

Jauge, 236.

Joule, 167.

— (Loi de —), 335.

K

K (Moment d'inertie), 31.

× (Susceptibilité magnétique), 68.

k (Capacité inductive spécifique) 129.
Kilo, 10.
Kilogrammètre, 27.
 — par seconde, 27, 167.
Kirchhoff (Lois de —), 250.

L

L, l (Longueur), 7.
 L_s (Coefficient de self-induction), 439.
 λ (Décrément logarithmique), 45.
Lamellaire (Aimant —), 380.
Laplace (Loi élémentaire de —), 149.
Leduc (Expériences de M. —) sur les électro-aimants, 405.
Légales (Unités —), 170.
Lenz (Loi de —), 412.
Leyde (Bouteille de —), 130.
Ligne de force, 378.
 — équipotentielle, 113.
Limite de charge, 108.
Lippmann (Électromètre à répulsion de —), 224.
 — (Électromètre à mercure (de —), 506.
 — (Galvanomètre de —), 209.
Liquides (Résistance des —), 187.
Locale (Action —), 301.
Loi du contact, 295.
 — des contacts successifs, 295.
 — de Coulomb.
 — de Faraday.
 — de Joule.
 — de Kirchhoff, 250.
 — de Laplace, 149.
 — de Lenz, 412.
 — de Magnus, 346.
 — de Ohm, 140.
 — de Volta, 346.
 — générale de l'induction, 409.

Longueur, 7.

Lunette (Emploi de la —), 40.

M

M (Masse), 7, 21.
 m (Mètre), 7.
 m (Pôle magnétique), 59.
 μ (Perméabilité magnétique), 67.
 \mathfrak{M} (Moment magnétique), 60.
Machines électriques, 138.

Machines électrotastiques, 518.
 — à frottement, 518.
 — d'induction électrostatique, 520.
 — rhéostatique, 135, 289.
 — de Voss, 521.

Magnétique (Attraction —), 54.

— (Champ —), 62.
 — (Circuit —), 390.
 — (Corps —), 55.
 — (Cycle —), 397.
 — (Densité —), 377.
 — (Détermination des propriétés des substances —), 430.
 — (Équateur —).
 — (Feuillet —), 380.
 — (Force —), 56.
 — (Fantôme —), 52.
 — (Induction —), 393.
 — (Méridien —), 75.
 — (Moment —), 60.
 — (Orages —), 84.
 — (Perméabilité —), 67, 394.
 — (Potentiel —), 376.
 — (Puissance —) d'un feuillet, 380.
 — (Puissance —) d'un solénoïde, 379.
 — (Répulsion —), 54.
 — (Résistance —), 390.
 — (Saturation —), 396.
 — (Solénoïde —), 379.
 — (Spectre —), 52.
 — (Susceptibilité —), 68.

Magnétisante (Force —), 392.

Magnétisme, 51.

— (Compléments de —), 375.
 — rémanent, 166.
 — résiduel, 398.
 — terrestre, 75.
 — terrestre (Détermination des éléments du —), 429.

Magnéto-dynamomètre de M. Éric Gerard, 508.

Magnétomètre, 80.

Magnétographes, 84.

Magnétomotrice (Force —), 390.

Magnus (Loi de —), 346.

Mascart (Isoloirs de M. —), 242.

Masse, 8, 21.

— électrique, 96.

Masse magnétique, 59.
 — métalliques (Courants induits dans des —), 420.
Maxwell (Règle du tire-bouchon de —), 143.
 — (v de —), 290.
Méga, 10.
Métaux (Résistance des —), 172.
Méthode balistique, 269.
 — hétérostatique, 227.
 — idiostatique, 227.
 — d'oscillation, 48.
 — de réduction à zéro, 36.
 — optique de M. d'Arsonval, 40.
Méridien magnétique, 75.
Mesure (Appareils de —), industriels des intensités, 210.
 — (Méthodes de —), 36.
 — directes, 36.
 — indirectes, 37.
Mètre, 7.
Mho, 169.
Micro, 10.
Microfarad, 167.
Microhmmètre, 183.
Miroir (Méthode du —), 40.
Moment d'une force, 28.
 — d'un couple, 28.
 — d'inertie, 31.
 — magnétique, 60.
Moteur électrique, 434, 435.
 — à charge électrostatique, 523.
 — thermomagnétique, 404.
Mouvement amorti, 45.
 — apériodique, 46.
 — oscillatoire, 41.
 — pendulaire, 43.
 — périodique, 41.
 — varié, 16.
 — (Quantité de —), 30.
Multiples, 10.
Multiplicateur de Schweigger, 146.

N

N, n, nombre abstrait.
Négatif (Pôle —), 139.
Négative (Électricité —), 89.
Neumann (Coefficient de —), 386.
Noé (Pile —), 353.
Nobili (Galvanomètre de —), 198.

Nombre d'éléments (Calcul du —, d'un générateur électrique, 248, 249.
Nord (Pôle —), 54.
Notation décimale, 10.
Noyau d'un électro-aimant, 406.

O

ω (Vitesse angulaire), 16.
Ohm, 167.
 — centimètre, 168.
 — (Loi d'), 140.
 — B. A. 170.
 — légal, 170.
 — -mètre, 184.
 — -seconde, 439.
Ondulations électriques (Expériences de MM. Hertz sur les —), 533.
Ondulateurs (Courants —), 268.
Orages magnétiques, 55.
Oscillations (Observation des —), 47.
Oscillante (Décharge —), 447.
Oscillation isochrone, 42.
 — (Méthode d'), 48.
 — simple, 41.
Oscillatoire (Mouvement), 41.

P

P (Puissance), 27, 166.
 p (Pression), 25.
 \mathcal{P} (Potentiel magnétique), 376.
Parallaxe, 39.
Paramagnétiques (Corps —), 55.
Pellat (Ampère-étalon de M. —), 371.
 — (Électrodynamomètre de M. —), 370.
Peltier (Effet —), 348.
Pendulaire (Mouvement —), 43.
Pendule électrique, 87.
Période, 41, 267.
 — variable d'un courant, 440.
 — variable (Énergie emmagasinée pendant la —), 443.
Périodique (Générateurs à force électromotrice —), 267.
 — (Mesure des courants —), 373.
 — (Mouvement —), 41.
 — (Temps —), 267.
Perméabilité magnétique, 67.

Permanent (Régime —), 440.
Perturbations magnétiques, 84.
Phases (Mesure de la différence de —), 493.
Phénomènes de contact, 293, 294.
Piézo-électricité, 528.
Pile Clamond, 354.
 — (Constantes de débit d'une —), 316.
 — à dépolarisant liquide, 308.
 — à dépolarisant solide, 307.
 — sans dépolarisant, 306.
 — diverses, 310.
 — à deux liquides, 309.
 — étalon, 311.
 — à gaz, 310.
 — hydro-électriques, 301.
 — Noé, 353.
 — (Principe de la —), 139.
 — thermo-électriques (Description des —), 352.
 — thermo-électriques (Rendement des —), 351.
 — (Résistance intérieure des —), 260.
 — réversibles, 327.
 — réversible (Théorie de la —), 304.
 — secondaires, 327.
 — thermo-électrique (Théorie de la —), 346.
Plan d'épreuve, 99.
 — directeur, 149.
Planté (Couple secondaire de —), 328.
 — (Machine rhéostatique de —), 289.
Platinoïde, 172.
Platymètre, 270.
Poids, 20, 21.
 — spécifique, 24.
Pointes (Pouvoir des —), 102.
Point d'inversion, 347.
 — matériel, 14.
 — neutre, 347.
Polarisation, 305.
 — (Capacité de —), 320.
 — des électrodes, 318.
 — (Rotation électromagnétique du plan de —) de la lumière, 530.

Pôles d'un aimant, 51.
 — sud, 54.
Pont à bobines, 180.
 — à fil divisé, 181.
 — de Wheatstone, 179.
Positif (Pôle —), 139.
Positive (Électricité —), 89.
Potentiell, 110.
 — (Différence de —), 140.
 — d'aimantation, 4.
 — électrostatique, 110.
 — (Indicateur de —), 407.
 — magnétique, 376.
 — (Mesure du —), 223.
Potentielle (Énergie —) des aimants, 381, 382.
 — (Mesure des hauts —), 288.
Potentiel zéro, 112.
Potentiomètre de Clark (Méthode du —), 259.
Pouillet (Galvanomètre de —), 159.
Pouvoir condensant, 122.
 — inducteur spécifique, 129, 275.
 — des pointes, 102.
 — thermo-électrique, 345.
Pression, 25.
 — électrostatique, 108.
Primaire (Circuit —), 485.
Producteur, 518.
Puissance, 27.
 — électrique, 166.
 — électrique (Mesure de la —), 511, 515.
 — électrique (Mesure de la —) dans les circuits inductifs, 512.
 — magnétique d'un solénoïde, 379.
 — magnétique d'un feuillet, 380.
 — moyenne, 489.
 — thermique, 335.
 — utile spécifique, 331.
 — vive, 32.
Pyro-électricité, 527.

Q

Q, q (Quantité d'électricité), 98, 160.
Quadrant, 439.
 — (Électromètre à —), 225.
Quantité, 269.

- Quantité d'électricité**, 98, 160.
 — d'électricité efficace, 489.
 — d'électricité induite, 416.
 — d'électricité (Mesure des —), 282.
 — de mouvement, 30.
 — physique, 5.

R

- R**, *r* (Résistance), 163.
 \mathcal{R} (Résistance magnétique), 390.
 ρ (Résistance magnétique spécifique), 390.
Radian, 13.
Rayon de giration, 31.
Réceptrice, 436.
Rechargeur, 522.
Redressés (Courants —), 268.
Réducteurs, 189.
Régime permanent d'un courant, 440.
 — variable (Lois des courants dérivés dans le —), 445.
Reluctance, 169.
Rémanent (Magnétisme —), 398.
Rendement, 246.
 — en quantité d'un accumulateur, 331.
 — en énergie d'un accumulateur, 331.
Répartition des charges électriques, 99.
Replenisher de sir W. Thomson, 521.
Répulsion électrique, 87.
 — magnétique, 54.
Résiduel (Magnétisme —), 398.
Résiduelle (Charge —), 274.
Résistance, 140, 163, 168.
 — apparente, 490.
 — (Caisse de —), 177.
 — (Couplage des —), 173.
 — des liquides, 187.
 — (Détermination de l'unité de —), 422.
 — de compensation, 189.
 — (Détermination des —), 174.
 — efficace des conducteurs de grosse section aux courants alternatifs, 494.

- Résistance** (Étalons de —), 174.
 — d'un galvanomètre (Mesure de la —), 216.
 — intérieure des piles, 260.
 — magnétique, 390.
 — magnétique spécifique, 390.
 — (Mesure des —) des liquides et des solides, 500, 501.
 — (Mesure des très faibles —), 186.
 — (Mesure des très grandes —), 499.
 — parfaite, 502.
 — réduite, 173.
 — spécifique, 168.

Réticule, 40.**Rhéostat**, 192.

— (Calcul des —), 337.

Rheostatique (Machine —) de G. Planté, 289.**Rhéotome liquide**, 322.**Rotations électrodynamiques**, 366, 431.

— électromagnétiques, 366, 432.

— électromagnétique du plan de polarisation de la lumière, 530.

Roue de Barlow, 435.**S****S**, *s* (Surface), 11.*s* (Seconde), 9. σ (Densité électrique), 101.**Saturation magnétique**, 396.**Secohm**, 439.**Secohmmètre**, 451.**Secondaire** (Circuit —), 485.**Seconde**, 9.**Seconde-ohm**, 439.**Self-induction**, 439.

— maxima (Bobines de —), 474.

— (Détermination de coefficients de —), 448.

— (Effets de la —), 440.

— et capacité, 446.

— (Moyens d'atténuer les effets de —) dans la période de rupture, 454.

Sens des actions magnétiques, 70.

— des courants induits, 412.

Sensibilité absolue, 215.
 — relative, 215.
Shunt, 189.
 — (Pouvoir multiplicateur du —), 189.
Shuntage des galvanomètres, 189.
 — des galvanomètres balistiques, 428.
Siemens et Halske (Électrodynamomètre de —), 368.
 — (Unité —), 170.
Sinus (Galvanomètre des —), 203.
Solénoïdal (Aimant —), 379.
Solénoïde annulaire, 389.
 — (Attraction d'un —), 406.
 — galvanique, 387.
 — magnétique, 379.
 — (Puissance magnétique d'un —), 379.
Sources électriques, 94.
Spécifique (Conductibilité —), 169.
 — (Poids —), 24.
 — (Résistance —), 168.
Spectre magnétique, 32.
Sphère (Moment d'inertie d'une —), 31.
 — (Capacité d'une —), 113.
Substances magnétiques (Détermination des propriétés des —), 430.
Sud (Pôle —), 54.
Surface, 11.
 — équipotentielle, 113.
Susceptibilité magnétique, 68.
Suspension d'un galvanomètre, 197.
 — bifilaire, 50.
 — unifilaire, 49.
Symétrique (Électromètre —), 225.
Système astatique, 197.
 — C. G. S., 4.
 — électrodynamique, 360.
 — électromagnétique, 147, 152.
 — électromagnétique C. G. S. pratique, 167.
 — électrostatique C. G. S., 97.
 — magnétique C. G. S., 58.

T

T, t (Temps), 9.
⁴ (Température), 33.

Tangentes (Galvanomètre des —), 156, 199.
Téléphone, 237, 438.
Température, 33.
 — (Coefficient de —), 171.
 — (Détermination des —), 191, 356.
 — (Influence de la —) sur l'aimantation, 400.
 — (Mesure des —) élevées, 357.
Temporaire (Aimantation —), 430.
Temps, 9.
 — (Constante de —), 441.
 — périodique, 41, 488.
Tension électrostatique.
Terrestre (Magnétisme —), 75.
Thermique (Ampèremètre —), 341.
 — (Voltmètre —), 340.
Thermo-électricité, 345.
Thermo-électrique (Courant —), 345.
 — (Inversion —), 347.
 — (Pouvoir —), 345.
 — (Rendement des piles —), 351.
 — (Théorie de la pile —), 346.
Thermo-électrochimiques (Générateurs —), 355.
Thermomagnétique (Moteur —), 401.
Thomson (Ampèremètre de —), 212.
 — (Balances électrodynamiques de sir W. —), 372.
 — (Effet —), 350.
 — (Électromètre absolu de sir W. —), 236.
 — (Électromètre à attraction de sir W. —), 234.
 — (Galvanomètre de —), 201.
 — (Galvanomètre à circuit mobile de —), 207.
 — (Replenisher de —), 321.
 — (Voltmètre de —), 211.
 — (Voltmètre électrostatique industriel de sir W. —).
Tire-bouchon de Maxwell (Règle du —), 145.
Time constant, 441.
Torsion (Couple de —), 48.
 — (Galvanomètre de —) de MM. Siemens et Halske, 213.
Transformateur, 485.
 — différenciel, 333.
 — parfait, 491.

Transformateur à noyau de fer, 492.
Transformations de l'énergie électrique, 333.
Transmission de force motrice, 436.
Transport électrique de la chaleur, 350.
Travail, 26.
 — d'induction, 415.
 — de déplacement des charges électriques, 436.
Tube de force, 378.

U

Unifilaire (Suspension —), 49.
Uniforme (Aimant —), 377.
 — (Champ —), 62.
Unipolaire (Induction —), 433.
Unités, 2.
 — (*Voir le mot correspondant à chaque quantité physique.*)
 — B. A., 170.
 — C. G. S., 4.
 — C. G. S. de force électromotrice par l'induction (Définition de l'—), 419.
 — de résistance (Détermination de l'—), 422.
 — dérivées, 2, 14.
 — fondamentales, 7.
 — légales, 170.
 — Siemens, 170.

V

V (Volume, potentiel électrostatique), 12.
v (Vitesse), 45.
v (Définition de —), 290.
Variable (Période —), 440.

Variations magnétiques, 80.
Verdet (Loi de —), 530.
Vitesse, 15.
 — angulaire, 16.
Volt, 167.
Volta (Loi de —), 346.
Voltmètre, 317, 323.
 — à argent et à cuivre, 326.
 — à dépôts métalliques, 325.
 — à gaz, 324.
Volt-ampère, 167.
Volt-coulomb, 167.
Voltmètre, 210.
 — de Cardew, 340.
 — thermiques, 340.
 — de Thomson, 211.
Volume, 12.

W

W (Travail, moment d'un couple), 22.
 — (Énergie électrique), 165.
Watt, 167.
Watt-heure, 167.
Wattmètre, 513.
 — de MM. Zepernowsky et Bláthy, 514.
 — électrostatique de MM. Curie et Blondlot, 516.
Weber (Électrodynamomètre de —), 367.
Wiedemann (Galvanomètre de —), 264.
Wheatstone (Pont de —), 179.

X Y Z

Zéro (Méthode de réduction à —), 36.
Zinc amalgamé, 301.

FIN DE L'INDEX.