

E. HOSPITALIER

FORMULAIRE PRATIQUE

DE

L'ÉLECTRICIEN

3^{me} ANNÉE 1885

PARIS

G. MASSON ÉDITEUR

CAOUTCHOUC ET GUTTA-PERCHA

MENIER, 7, rue du Théâtre, à Paris-Grenelle

DEUX MÉDAILLES D'OR A L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1878

MÉDAILLE D'OR ET CROIX DE LA LÉGION D'HONNEUR A L'EXPOSITION INTERNATIONALE
D'ÉLECTRICITÉ DE 1881

DIPLOME D'HONNEUR, MÉDAILLE D'OR ET CROIX DE LA LÉGION D'HONNEUR A L'EXPOSITION
D'AMSTERDAM DE 1885

ARTICLES EN CAOUTCHOUC SOUPLE ET DURCI POUR EMPLOIS INDUSTRIELS

- Courroies** pour transmissions, pour élévateurs de betteraves; Courroies-guides pour papeteries.
- Clapets** de pompes et condenseurs. — **Boulets** pour soupapes de pompes.
- Rondelles-Tampons** pour chemins de fer; Rotules. — **Sucettes** pour raffineries.
- Rondelles** pour presse-filtres Durieu; Rondelles pour mineurs.
- Cylindres** pour papeteries, imprimeries et rouleaux d'essoreuses.
- Garnitures** de poulies de scies à rubans; — de chariots pour intérieur de gares, d'usines. — Garnitures de presse-étoupes.
- Calfats.**
- Tabliers de machines**, pour papeteries.
- Tapis** pleins et découpés; — **Anneaux; Bagues; Cordes.**
- Joints** pour eau et vapeur, en feuilles ou découpés sur modèles. — Pièces moulées en tous genres.
- Feuilles et Plaques** de toutes qualités et dimensions, et pour emplois divers.
- Tuyaux** pour eau, acide, huile, gaz, vapeur; pour décantation de jus et vidange; pour aspiration et refoulement à toutes pressions.
- Tuyaux** pour irrigateurs et clysos.
- Tuyaux brevetés** pour pompes à incendie, adoptés exclusivement par les corps de sapeurs-pompiers de Paris, Lyon, Toulouse, Rouen, le Havre, Alger, Vienne, etc.
- Feuilles, Tubes, Rouleaux** en caoutchouc durci.
- Pompes** pour acides en caoutchouc durci.

ARTICLES EN GUTTA-PERCHA

- Tuyaux** pour vins, acides, alcali et produits chimiques.
- Courroies, Seaux, Brocs, Entonnoirs, Siphons, Robinets, Hottes et Bassines** pour papeteries.
- Cuvettes** pour photographie.
- Fils conducteurs** isolés au caoutchouc et à la gutta pour télégraphie électrique.
- Câbles** souterrains et sous-marins. — **Remorques** pour torpilles.
- Câbles** téléphoniques. Fils isolés pour amorces de torpilles.
- Spécialité de câbles** pour lumière électrique à deux conducteurs concentriques, treuils brevetés pour suspension de régulateur.
- Gutta-percha** pour galvanoplastie.
- Caoutchouc** durci en feuilles, bâtons, tuyaux, vases de toutes formes pour piles électriques, isolateurs, socles, rondelles pour plots et pièces diverses en ébonite.

CAOUTCHOUC ET GUTTA-PERCHA

MENIER, 7, rue du Théâtre, à Paris-Grenelle

DEUX MÉDAILLES D'OR A L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1878

MÉDAILLE D'OR ET CROIX DE LA LÉGION D'HONNEUR A L'EXPOSITION INTERNATIONALE
D'ÉLECTRICITÉ DE 1881

DIPLOME D'HONNEUR, MÉDAILLE D'OR ET CROIX DE LA LÉGION D'HONNEUR A L'EXPOSITION
D'AMSTERDAM DE 1883

ARTICLES EN CAOUTCHOUC SOUPLE ET DURCI POUR EMPLOIS INDUSTRIELS

Courroies pour transmissions, pour élévateurs de betteraves; Courroies-guides pour papeteries.

Clapets de pompes et condenseurs. — **Boulets** pour soupapes de pompes.

Rondelles-Tampons pour chemins de fer; Rotules. — **Sucettes** pour raffineries.

Rondelles pour presse-filtres Durieu; Rondelles pour mineurs.

Cylindres pour papeteries, imprimeries et rouleaux d'essoreuses.

Garnitures de poulies de scies à rubans; — de chariots pour intérieur de gares, d'usines. — Garnitures de presse-étoupes.

Calfats.

Tabliers de machines, pour papeteries.

Tapis pleins et découpés; — **Anneaux; Bagues; Cordes.**

Joints pour eau et vapeur, en feuilles ou découpés sur modèles. — Pièces moulées en tous genres.

Feuilles et Plaques de toutes qualités et dimensions, et pour emplois divers.

Tuyaux pour eau, acide, huile, gaz, vapeur; pour décantation de jus et vidange; pour aspiration et refoulement à toutes pressions.

Tuyaux pour irrigateurs et clyso.

Tuyaux brevetés pour pompes à incendie, adoptés exclusivement par les corps de sapeurs-pompiers de Paris, Lyon, Toulouse, Rouen, le Havre, Alger, Vienne, etc.

Feuilles, Tubes, Rouleaux en caoutchouc durci.

Pompes pour acides en caoutchouc durci.

ARTICLES EN GUTTA-PERCHA

Tuyaux pour vins, acides, alcali et produits chimiques.

Courroies, Seaux, Brocs, Entonnoirs, Siphons, Robinets, Hottes et Bassines pour papeteries.

Cuvettes pour photographie.

Fils conducteurs isolés au caoutchouc et à la gutta pour télégraphie électrique.

Câbles souterrains et sous-marins. — **Remorques** pour torpilles.

Câbles téléphoniques. Fils isolés pour amorces de torpilles.

Spécialité de câbles pour lumière électrique à deux conducteurs concentriques, treuils brevetés pour suspension de régulateur.

Gutta-percha pour galvanoplastie.

Caoutchouc durci en feuilles, bâtons, tuyaux, vases de toutes formes pour piles électriques, isolateurs, socles, rondelles pour plots et pièces diverses en ébonite.

POSTE TÉLÉPHONIQUE MILDÉ COMPLET A 25 FR.

[INSTALLATIONS ÉCONOMIQUES POUR USINES, HÔTELS, CHATEAUX

POSTE MILDÉ

A

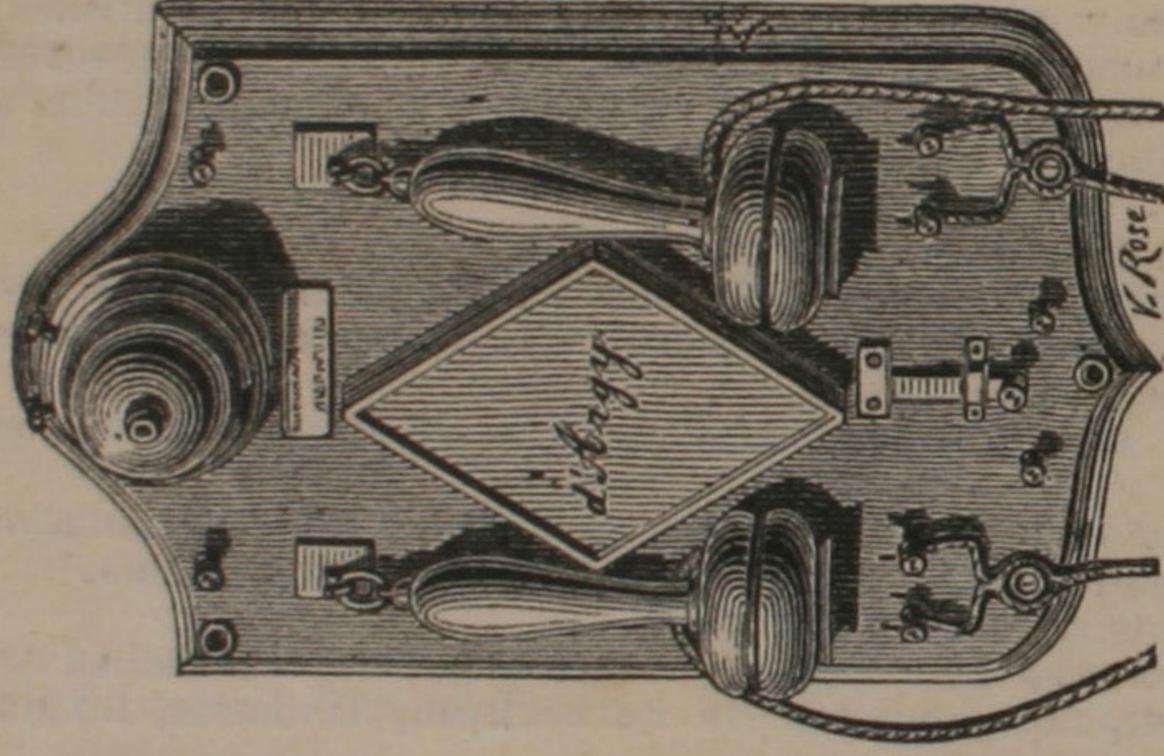
60 francs

POUR LES GRANDES DISTANCES

ET

65 francs

AVEC SONNERIE



ENVOI GRATUIT

DU

Catalogue

AVEC

139 FIGURES DANS LE TEXTE

ET

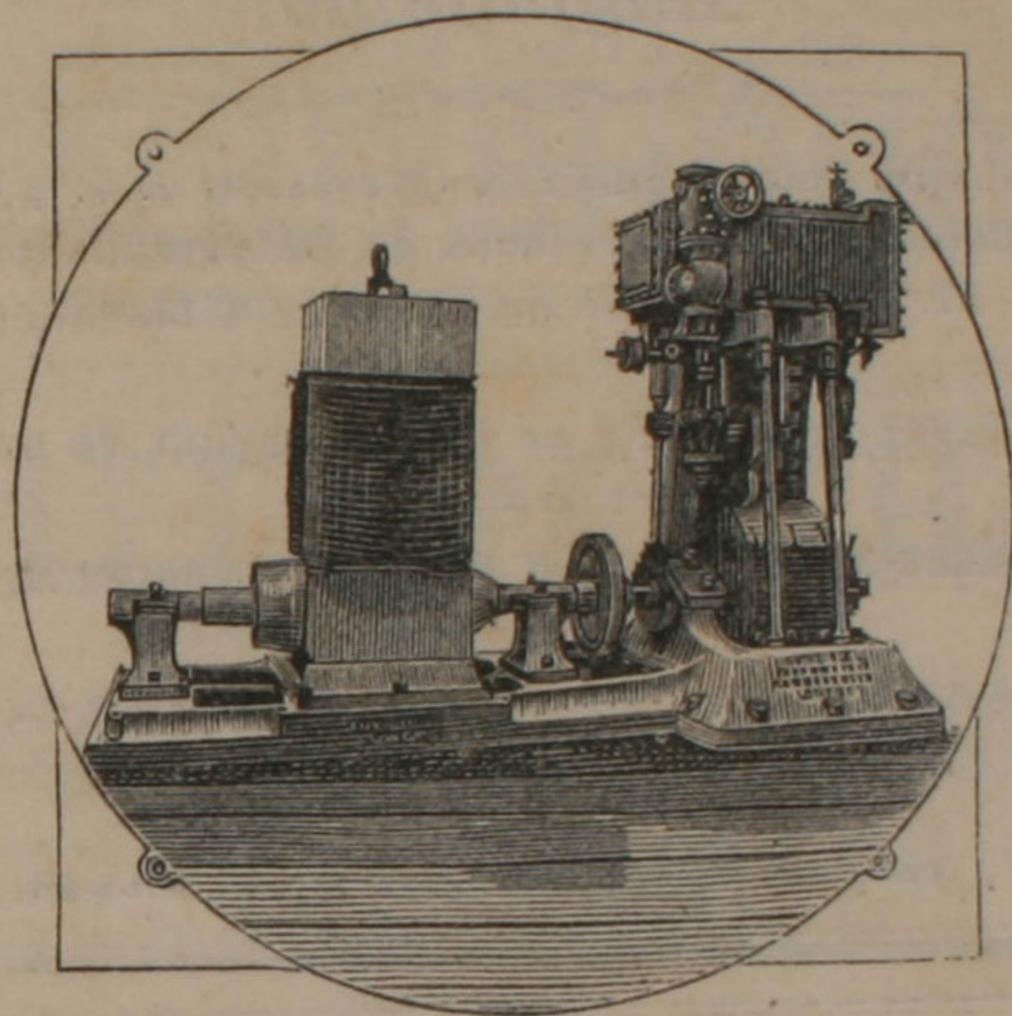
Plans des poses

Plus de cent postes sont installés à l'hôtel de ville de Paris

Ch. MILDÉ Fils & C^{ie} à Paris, 26, rue Laugier

LUMIÈRE ÉLECTRIQUE

"INVINCIBLE" MOTEUR A GRANDE VITESSE
Actionnant directement les Dynamos



Ces moteurs sont également construits avec poulies à gorges pour actionner directement les dynamos au moyen d'un câble sans fin. — Un grand nombre d'installations ont été faites à bord des navires de guerre de la Marine anglaise, ainsi qu'à bord des steamers des principales Compagnies françaises et anglaises.

JOHN & HENRY GWYNNE **DE LONDRES**

MM. JOHN ET HENRY GWYNNE

Ingénieurs, Constructeurs des célèbres "Invincibles", moteurs à grande vitesse, viennent d'installer un bureau à Paris. Ils sont également les constructeurs brevetés des Pompes centrifuges actionnées directement et des Machines-pompes combinées.

M. L. LARRUE, ingénieur à la Société électrique Edison,
est leur agent général en France

BUREAUX : 8, AVENUE PERCIER (VIII^e ARR^t)

LAZARE WEILLER & C^{IE}

Angoulême

FILS DE BRONZE SILICEUX (breveté s. g. d. g.)
POUR TRANSMISSIONS TÉLÉGRAPHIQUES ET TÉLÉPHONIQUES AÉRIENNES
ET TRANSPORT DE LA FORCE A DISTANCE

FILS DE CUIVRE PUR AYANT LA CONDUCTIBILITÉ DE L'ARGENT

PIÈCES MÉCANIQUES EN BRONZE PHOSPHOREUX

REPRÉSENTANT POUR LA FRANCE ET LES COLONIES :

HENRY VIVAREZ

8, rue de Saint-Petersbourg — PARIS

ATELIERS DUCOMMUN

Fondés en 1834

HEILMANN-DUCOMMUN & STEINLEN

Successieurs de J. DUCOMMUN & C^{ie}

Constructeurs-Mécaniciens à MULHOUSE (Alsace)

Dépôt et représentation à PARIS, 18, boulevard de Magenta

MACHINES-OUTILS

VENTILATEURS ROOTS A PRESSION B.-S.G.D.G.

INSTALLATIONS D'ÉCLAIRAGES ÉLECTRIQUES

ET DE TRANSMISSIONS DE FORCE

MANUFACTURE GÉNÉRALE DE

CAOUTCHOUC

SOUPLE & DURCI

TISSUS ET VÊTEMENTS IMPERMÉABLES

GUTTA PERCHA

CONSTRUCTION DE

CABLES, FILS ET APPAREILS

TÉLÉGRAPHIQUES

97, Boul. Sébastopol.

PARIS

THE INDIA RUBBER, GUTTA PERCHA
& TELEGRAPH WORKS C^o (LIMITED)

USINES :

PERSAN-BEAUMONT (Seine-et-Oise)

SILVERTOWN (Angleterre)

Médailles d'Or aux Expositions de Paris 1878 et 1881

Envoi **franco**, sur demande, de **Tarifs**,
comprenant tous les articles de notre fabri-
cation.

SAUTTER LEMONNIER ET C^{IE}

26, avenue de Suffren, Paris

MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES DE GRAMME

BREVETÉES S. G. D. G.

Seuls concessionnaires des machines de GRAMME
à courants continus donnant plusieurs lumières
et de la

LAMPE A ARC DE GRAMME

BREVETÉE S. G. D. G.

FABRIQUE DE CRAYONS ÉLECTRIQUES POUR ARC VOLTAÏQUE

APPAREILS PROJECTEURS DE LUMIÈRES ÉLECTRIQUES

BREVETÉES S. G. D. G.

Pour les marines marchandes et militaires

MOTEURS A VAPEUR A GRANDE VITESSE

Spéciaux pour la conduite des machines dynamo-électriques

FORMULAIRE PRATIQUE
DE
L'ÉLECTRICIEN

—
TROISIÈME ANNÉE — 1885

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

LES PRINCIPALES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ. — 3^e édition,
entièrement refondue. — G. Masson, éditeur.

L'ÉLECTRICITÉ DANS LA MAISON. — 1 vol. in-8^o avec 150 figures.
G. Masson, éditeur.

*L'Auteur et l'Éditeur se réservent expressément le droit de reproduction
même partielle, et de traduction.*

FORMULAIRE PRATIQUE
DE
L'ÉLECTRICIEN

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 »

Toute science à laquelle la mesure, le poids et le calcul ne sont pas applicables ne peut être considérée comme une science exacte : elle constitue un assemblage d'abstractions sans lien ou de simples conceptions de l'esprit...

(STAS. *La Science et l'Imagination.*)

TROISIÈME ANNÉE — 1885

PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, EN FACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE

PRÉFACE

DE LA TROISIÈME ANNÉE

Les changements apportés à la troisième année du *Formulaire*, consistent tout d'abord en corrections d'un certain nombre d'erreurs typographiques qui, malgré toutes les précautions prises, s'étaient glissées dans les années précédentes.

Les unités de mesure électrique prêtent encore à certaines confusions, particulièrement en ce qui concerne la *puissance* et le *travail*. Nous avons eu bien soin de faire la distinction, devenue chaque jour plus nécessaire, entre le kilogrammètre et le kilogrammètre par seconde, le *joule* ou volt-coulomb, et le *watt* ou volt-ampère, etc.

La Conférence internationale pour la détermination des unités électriques a, dans sa séance du 3 mai 1884, fixé la longueur de la colonne de mercure de 1 millimètre carré de section dont la résistance représente l'*ohm légal*.

Nous avons signalé cette décision et donné les rapports qui permettent de passer rapidement des ohms B.A. aux ohms légaux, et réciproquement.

Les considérations du *flux de force* magnétique et des variations du champ magnétique sont de plus en plus employées aujourd'hui dans l'explication des phénomènes d'induction, qui

devient très simple par l'emploi de ces considérations. Nous avons tenu compte de cette heureuse tendance en modifiant l'énoncé des principes de l'induction, pour les mettre d'accord avec cette nouvelle manière d'envisager les phénomènes.

Les nouveautés dans les applications de l'électricité ont été assez rares pendant l'année 1884.

Beaucoup de questions sont à l'étude; il en est peu d'assez mûres pour que nous puissions en faire profiter cette édition.

A l'heure où nous écrivons, les expériences de Creil, sur lesquelles les promoteurs fondaient de si grandes espérances, sont remises à une époque indéterminée.

Plusieurs constructeurs étudient leurs machines et créent de nouvelles séries, sans pour cela avoir renoncé aux anciennes. Nous attendons que ces séries soient définitivement établies et aient fait leurs preuves pour les substituer aux anciennes.

C'est donc une année de répit que semblent nous accorder les progrès des applications industrielles de l'électricité.

Nous en profiterons pour mûrir des modifications importantes que nous préparons pour l'année prochaine, et pour lesquelles nous faisons encore une fois appel à nos correspondants, en les remerciant à l'avance de leur précieuse collaboration, à laquelle appartient le meilleur de ce livre.

E. H.

Paris, mars 1885.

PRÉFACE

DE LA PREMIÈRE ANNÉE

Le titre du livre que nous publions indique nettement ce qu'il est : il a pour but de fournir aux électriciens de profession, comme aux amateurs d'électricité, c'est-à-dire aux *praticiens*, les formules qu'ils auraient à chercher dans un nombre considérable de traités français ou étrangers, les notions fondamentales qui se rattachent aux différentes opérations électriques qu'ils peuvent avoir à exécuter, les recettes et les procédés qui sont susceptibles de leur être utiles dans leurs expériences ou de leur faciliter leurs constructions.

La *première partie* renferme, résumés aussi succinctement que possible, les définitions, les principes et les lois générales ; dans la *deuxième partie*, consacrée aux unités de mesure, nous définissons les unités pratiques basées sur le système C.G.S., et sanctionnées par le Congrès international des Électriciens de 1881. Des tables à double entrée donnent les relations numériques de ces unités pratiques à celles qui ont été ou sont encore quelquefois en usage en France et à l'étranger.

Dans la *troisième partie*, nous passons en revue les appareils et les méthodes de mesure dont l'électricien fait un usage direct et constant. Viennent ensuite les renseignements pratiques,

formules algébriques, tables trigonométriques, tableaux de densité, de barométrie, de thermométrie, etc., qui éviteront aux opérateurs bien des calculs et bien des recherches; résistances électriques des différents corps, conducteurs, aimants et électro-aimants, documents fondamentaux de la science électrique pratique. La production et les applications de l'électricité, piles primaires et secondaires, piles thermo-électriques, électro-métallurgie, générateurs mécaniques d'électricité, moteurs, transmission de force à distance, lumière électrique, télégraphie et téléphonie, forment la *quatrième partie* de l'ouvrage; la dernière partie comprend enfin les recettes et les procédés.

Nous espérons que notre formulaire sera utile aux praticiens et leur facilitera leurs travaux. Si nous avons réussi selon nos vœux, nous leur demanderons, à notre tour, de compléter eux-mêmes le travail qu'ils ont sous les yeux en nous adressant les documents pratiques qui y feraient défaut; nous les ajouterions dans les éditions suivantes, et le lecteur nous aiderait ainsi, au profit de tous, à créer le véritable *vade-mecum* des électriciens.

E. H.

Paris, avril 1883.

SOCIÉTÉS SAVANTES

SÉANCES ET RÉUNIONS DES SOCIÉTÉS SAVANTES DE PARIS

Académie des sciences. — Séance publique hebdomadaire tous les lundis, à trois heures, à l'Institut.

Société internationale des Électriciens. — *Siège social* : 3, rue Séguier. Réunions mensuelles le premier mercredi de chaque mois, à l'hôtel de la Société de Géographie, 184, boulevard Saint-Germain.

Société française de physique. — Séances les premier et troisième vendredis de chaque mois, à huit heures et demie du soir, 44, rue de Rennes.

Société des Ingénieurs civils. — *Siège social* : 10, cité Rougemont. Séances les deuxième et quatrième vendredis de chaque mois, à huit heures et demie du soir, 10, cité Rougemont.

Société d'Encouragement pour l'industrie nationale. — *Siège social* : 44, rue de Rennes. Séances les deuxième et quatrième vendredis de chaque mois, à huit heures et demie du soir, 44, rue de Rennes. Vacances du 15 août au 15 octobre.

Association française pour l'avancement des sciences. — *Siège social* : 4, rue Antoine-Dubois. Le Congrès de 1885 sera tenu à Grenoble, en septembre.

Société chimique. — Séances les deuxième et quatrième vendredis de chaque mois, à huit heures et demie du soir, à l'hôtel de la Société géologique, 7, rue des Grands-Augustins.

M. E. HOSPITALIER (6, RUE DU BELLAY. — PARIS) recevra avec reconnaissance tous les renseignements que voudront bien lui communiquer les savants, les inventeurs, les constructeurs, etc., pour améliorer et compléter ce FORMULAIRE, et tenir les éditions ultérieures au courant des progrès les plus récents de la science électrique.

ABBREVIATIONS ET SYMBOLES

m.	mètre.	L.	longueur.
cm.	centimètre.	M.	masse.
mm.	millimètre.	T.	temps.
m ² .	mètre carré.	R.	résistance.
m ³ .	mètre cube.	I.	intensité.
cm ² .	centimètre carré.	Q.	quantité.
cm ³ .	centimètre cube.	E.	force électromotrice.
g.	gramme.	C.	capacité.
mg.	milligramme.	U.	coefficient de self-induction.
kg.	kilogramme.	W.	travail ou énergie.
kgm.	kilogrammètre.	<i>r</i> .	résistance intérieure.
mfd.	microfarad.	G.	résistance d'un galvanomètre.
log.	logarithme décimal.	G ₁	résistance d'un galvanomètre shunté.
log _e .	logarithme népérien.	S	résistance d'un shunt.
sin.	sinus.	<i>d</i> .	densité.
cos.	cosinus.	<i>e</i> .	base des logarithmes népériens ou équivalent chimique.
tang.	tangente.	<i>m</i> .	pouvoir multiplicateur du shunt d'un galvanomètre.
temp.	température.	<i>v</i> .	rapport des unités électrostatiques aux unités électromagnétiques.
rés.	résistance.	<i>z</i> .	équivalent électro-chimique.
f.é.m.	force électromotrice.		
g.-d.	gramme-degré.		
kg.-d.	kilogramme-degré.		
galv.	galvanomètre.		
C.	degré centigrade.		
C.G.S.	centimètre-gramme-seconde.		

FORMULAIRE PRATIQUE

DE

L'ÉLECTRICIEN

TROISIÈME ANNÉE. — 1885

PREMIÈRE PARTIE

DÉFINITIONS — PRINCIPES — LOIS GÉNÉRALES

Les phénomènes physiques dont on embrasse l'étude sous le nom d'*électricité et magnétisme* peuvent se subdiviser en plusieurs groupes qu'à défaut d'une classification générale et méthodique, on peut étudier dans l'ordre suivant :

1° *Magnétisme*. — Actions des aimants sur les corps magnétiques et des aimants entre eux.

2° *Électricité statique*. — Actions des charges électriques.

3° *Électricité dynamique*. — Lois des courants. Actions chimiques et thermiques.

4° *Électro-dynamique*. — Actions mutuelles des courants.

5° *Électro-magnétisme*. — Actions magnétiques produites par les courants.

6° *Induction*. — Courants développés dans des circuits fermés par des actions extérieures électriques ou magnétiques.

C'est cet ordre que nous adopterons dans l'exposé des lois électriques des méthodes de mesure et des résultats pratiques. Cette classification ne présente peut-être pas toutes les qualités nécessaires au point de vue philosophique, mais elle a l'avantage d'établir des subdivisions commodes pour faciliter les recherches, et de s'opposer dans une certaine mesure à l'empiètement des différents sujets.

MAGNÉTISME

On donne le nom d'*aimant* à tout corps capable d'attirer le fer. L'ensemble des propriétés des aimants et leur étude constituent le *magnétisme*.

On distingue trois classes d'aimants :

1° *Les aimants naturels*. — Oxyde de fer magnétique ou *magnétite* (Fe^2O^3);

2° *Les aimants artificiels*. — Acier trempé ou comprimé;

3° *Les électro-aimants*. — Fer plus ou moins pur aimanté par l'action d'un courant.

Les aimants artificiels affectent, suivant les besoins, la forme de barres d'aiguilles, de fer à cheval, d'U, etc.

Un aimant est *toujours* constitué au moins par deux pôles.

La ligne *axiale* est celle qui joint les pôles d'un aimant; la ligne *équatoriale* celle qui lui est perpendiculaire.

Dans une aiguille aimantée, le pôle qui se dirige vers le *nord* prend le nom de pôle nord, pôle austral, pôle marqué ou pôle rouge d'Airy; il s'indique par la lettre N ou A. Celui qui se dirige vers le *sud* s'appelle pôle sud, pôle boréal, pôle non marqué ou pôle bleu d'Airy; il s'indique par la lettre S ou B.

Les corps *magnétiques*, *ferro-magnétiques*, ou *paramagnétiques* sont ceux qui, sans magnétisme propre, sont attirés par les aimants. Les corps *diamagnétiques* sont, au contraire, repoussés par les aimants.

Lois des actions magnétiques. — Deux pôles de même nom se repoussent, deux pôles de noms contraires s'attirent.

La force f exercée entre deux pôles magnétiques m et m' est proportionnelle au produit de leurs intensités et inversement proportionnelle au carré de leur distance d :

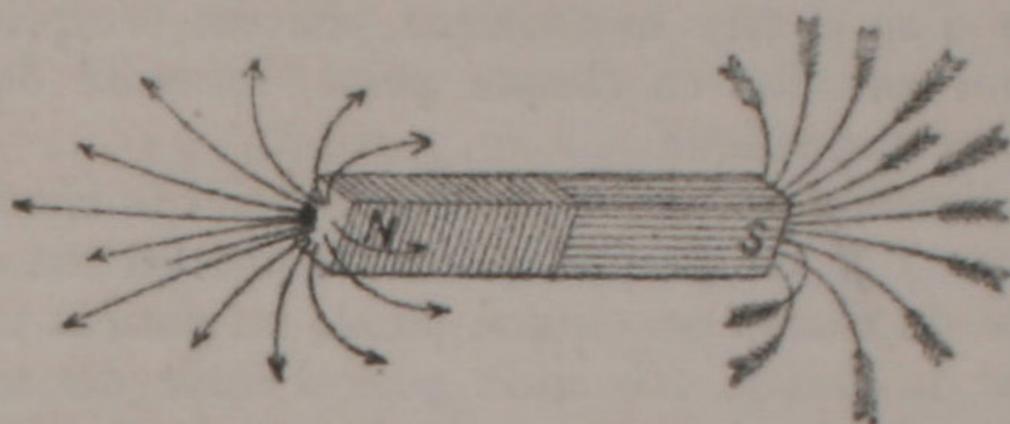
$$f = \frac{m m'}{d^2}.$$

L'*unité de pôle* ou *unité de quantité magnétique* est celle qui, à l'unité de distance d'un pôle semblable, exerce une action égale à une unité de force.

On nomme *champ magnétique* l'espace qui se trouve sous l'influence d'un aimant.

Il est caractérisé par la présence de *lignes de force*; il est défini lorsqu'on connaît le nombre des lignes de force, leur direction et leur sens en chaque point du champ. Ces lignes de force, dans le cas le plus simple celui d'un barreau aimanté, s'épanouissent dans plusieurs directions, retournent à l'extrémité opposée à celle d'où elles sont parties et reviennent se former à travers la masse intérieure du barreau.

En définissant une ligne de force donnée comme la trajectoire décrite par un pôle nord (marqué) se mouvant librement sous l'action de l'aimant, la *direction* de la ligne de force sera du pôle nord au pôle sud dans le champ magnétique et du pôle sud au pôle nord dans l'aimant. Le croquis



Champ magnétique.

ci-dessus montre grossièrement la direction et la forme des lignes de force du champ produit par un barreau aimanté. Ces lignes de force ont d'ailleurs une existence réelle, mise en évidence dans les spectres ou fantômes magnétiques, et jouissent de propriétés dont voici l'énoncé :

Propriétés des lignes de force. — 1° Les lignes de force tendent à se raccourcir; 2° deux lignes de force parallèles et de même sens se repoussent (*Faraday*); 3° une ligne de force traversant une substance magnétique peut être considérée comme *magnétiquement* plus courte qu'une ligne de force de longueur égale traversant l'air.

L'étude des fantômes magnétiques confirme dans chaque cas les vues de *Faraday* et explique les attractions et les répulsions mutuelles des aimants.

L'intensité d'un champ magnétique en un point donné est égale à la force que l'unité de pôle exerce en ce point.

La direction de la force est celle dans laquelle un pôle est sollicité par le champ magnétique : c'est celle que prendrait une aiguille aimantée courte, équilibrée, librement suspendue, placée dans le champ.

Un *champ magnétique uniforme* est celui dont l'intensité est la même en tous les points et dont les lignes de force sont des droites parallèles et équidistantes.

L'action magnétique entre deux aimants dont les longueurs sont négligeables par rapport à la distance qui les sépare est inversement proportionnelle au cube de leur distance (*Gauss*).

Les actions magnétiques exercées entre un aimant suspendu et une masse agissant sur lui sont proportionnelles au carré du nombre des oscillations que (sous leur action mutuelle seule) l'aimant fait en un temps donné, et inversement proportionnelles au carré du temps que l'aimant met à accomplir une oscillation complète (*Coulomb*).

Moment absolu, ou moment magnétique d'un aimant. — Soit m l'intensité d'un des pôles d'un aimant, l la distance de ses pôles, son moment est le produit ml .

Intensité d'aimantation. — C'est le rapport du moment magnétique d'un aimant à son volume.

Les propriétés d'un champ magnétique peuvent s'exprimer numériquement en faisant connaître en chaque point l'intensité du champ et la direction de la force magnétique.

En traçant la direction de la force en chaque point du champ, on obtient des *lignes de force*, et en proportionnant le *nombre* de ces lignes de force à l'*intensité* du champ en chaque point, on obtient une *représentation graphique* du champ, très utile pour l'étude des actions magnétiques et des effets d'induction. Ce mode de représentation d'un champ magnétique est dû à *Faraday*.

Lorsqu'un barreau aimanté dont le moment est ml est placé dans un champ magnétique uniforme d'intensité H , perpendiculairement aux lignes de force, il s'exerce un couple G proportionnel à l'intensité du champ H , à celle des pôles m et à leur distance l :

$$G = mlH.$$

Ce couple tend à faire tourner l'aiguille et à la rendre parallèle à la direction des lignes de force du champ.

Induction magnétique. — Un corps magnétique placé dans un champ magnétique s'aimante dans la direction des lignes de force du champ. Son magnétisme est dit *magnétisme induit*, et l'action elle-même prend le nom d'*induction magnétique*. L'aimantation gardée par le corps magnétique après avoir été retiré du champ est le *magnétisme rémanent*. La cause inconnue du magnétisme rémanent prend le nom de *force coercitive*.

Coefficient d'aimantation induite ou fonction magnétisante. — Soient H l'intensité d'un champ magnétique, γ l'intensité d'aimantation, la fonction magnétisante k est donnée par la relation :

$$k = \frac{\gamma}{H}.$$

Il y a proportionnalité pour de *petites valeurs* de H . Au delà, k est une fonction de H qui diminue lorsque H augmente, et tend vers une valeur finie qu'on nomme la *limite d'aimantation*.

MAGNÉTISME TERRESTRE

Relativement à ses actions magnétiques, la terre peut être considérée comme un vaste aimant dont le pôle *marqué* est au *sud*.

Méridien magnétique. — Plan vertical passant par une aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité.

Déclinaison. — Angle du méridien magnétique avec le méridien terrestre¹.

Inclinaison. — Angle de l'aiguille aimantée avec l'horizontale dans le méridien magnétique.

Intensité. — Valeur de la force magnétique terrestre qui se décompose en intensité horizontale et intensité verticale.

Lignes isocliniques. — Lieu des points d'égale inclinaison.

Équateur magnétique. — Lieu des points de nulle inclinaison.

Pôles magnétiques. — Points où l'inclinaison est égale à 90° .

Lignes isogoniques. — Lieu des points d'égale déclinaison.

Ligne agonique. — Lieu des points de nulle déclinaison.

Lignes isodynamiques. — Lieu des points d'égale intensité.

Variations. — Changements horaires, diurnes, annuels, séculaires, etc., qui se produisent dans les valeurs des éléments du magnétisme terrestre.

Magnétomètres et magnétographes. — Appareils qui permettent de mesurer et d'enregistrer les valeurs et les variations du magnétisme terrestre.

Neutraliser l'action directrice de la terre sur une aiguille aimantée. — 1° On dispose un barreau aimanté au-dessous de l'aiguille, dans le plan du méridien magnétique, de manière à agir en sens inverse de la terre; en faisant varier sa distance à l'aiguille on arrive à neutraliser l'action de la terre totalement ou en partie. Les oscillations de l'aiguille se ralentissent à mesure que la force directrice diminue. 2° Emploi des *aiguilles astatiques*. Deux aiguilles aimantées à peu près également et disposées sur une même monture avec les pôles contraires superposés (voy. l'emploi dans la troisième partie).

ÉLECTRICITÉ STATIQUE²

L'électricité *statique* se manifeste sur les corps électrisés sous forme de

¹ Les marins l'appellent quelquefois *variation*, mais le mot est impropre.

² On a donné longtemps le nom d'*électricité de frottement* à l'ensemble des phénomènes produits par les charges électriques; c'est là une expression impropre, car le *frottement* n'est qu'un des moyens — à la vérité le plus employé — pour produire des charges électriques.

charge. La quantité d'électrisation d'un corps donne la mesure de sa charge, et la nature de cette charge par rapport à l'état du milieu ambiant en détermine le *signe*.

La production d'une charge d'un signe donné sur un corps détermine toujours la production d'une charge égale et de signe contraire sur un autre corps.

Par convention, on nomme électrisation *vitreuse*, positive (+), fluide positif ou électricité positive, la charge prise par le verre frotté avec de la soie. On nomme électrisation *résineuse*, négative (—), fluide négatif ou électricité négative, la charge prise par de la résine, de la gomme, du caoutchouc ou de l'ambre jaune frotté avec de la flanelle. Les corps qui ne manifestent aucun signe d'électrisation sont dits à l'état *neutre*.

Lois des attractions et des répulsions électriques. —

Deux corps dont les charges sont de même signe se repoussent; deux corps dont les charges sont de signes contraires s'attirent.

L'attraction ou la répulsion de deux corps chargés est proportionnelle au produit des charges et inversement proportionnelle au carré de leur distance (*Coulomb*). En désignant par q et q' les charges et d leur distance, on a pour la force f :

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

Le signe + correspond à une attraction, le signe — à une répulsion.

Distribution des charges électrostatiques. — La charge d'un corps conducteur se porte à la surface. Elle se distribue uniformément sur une sphère et s'accumule sur les parties étroites, les pointes, les arêtes, etc.

La répartition d'une charge est définie par la *densité électrique* en chaque point, c'est-à-dire la quantité d'électricité par unité de surface en chaque point.

Le *potentiel* d'un corps chargé est la mesure de son électrisation.

La *capacité* électrostatique d'un corps a pour mesure la quantité d'électricité ou charge qu'il faut lui communiquer pour élever son potentiel d'une unité.

Il existe entre le *potentiel* V d'un corps, sa charge Q et sa capacité C la relation suivante :

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

Induction électrostatique. — Action exercée par un corps qui possède une charge sur un corps à l'état neutre placé à distance.

Dans tout corps à l'état neutre, l'induction précède l'attraction.

L'induction dépend de la nature du milieu qui sépare les deux corps ou diélectrique. Son influence donne la mesure de sa *capacité inductive*.

Capacité inductive spécifique ou **Capacité diélectrique**. — C'est le rapport entre la capacité de deux condensateurs d'égales dimensions, dont l'un est à lame d'air et l'autre formé du diélectrique dont on cherche la capacité inductive spécifique. On adopte comme unité de capacité diélectrique celle de l'air sec à 0° C. et à la pression 76 centimètres de mercure (voy. les chiffres dans la quatrième partie).

CONDENSATEURS

Deux conducteurs de forme quelconque, séparés par un isolant ou *diélectrique* et possédant des charges de signes contraires, constituent un condensateur.

La *Bouteille de Leyde* est un condensateur, un câble sous-marin aussi. Les condensateurs ordinaires qui servent pour les bobines d'induction et les étalons de capacité se composent en général de feuilles d'étain séparées par des feuilles isolantes (papier, mica, etc.). Ces feuilles agissent comme les armatures intérieure et extérieure d'une bouteille de Leyde.

Capacité d'un condensateur. — Cette capacité a pour mesure la quantité d'électricité que renferme le condensateur chargé à l'unité de potentiel.

Dans le système *électrostatique*, les unités ont été choisies de façon que la capacité d'un conducteur sphérique isolé soit numériquement égale à son rayon.

L'unité C. G. S. électrostatique de capacité est donc la capacité d'un conducteur sphérique isolé d'un centimètre de rayon.

Dans le système *électro-magnétique*, le seul employé dans les applications, l'unité est le *farad*, condensateur qui, chargé au potentiel de 1 volt, renferme un coulomb d'électricité. En pratique, on ne fait usage que du *microfarad* (voy. la deuxième partie).

Charge d'un condensateur. — La charge Q prise par un condensateur est égale au produit de sa capacité C par la f. é. m. de charge E :

$$Q = CE.$$

Exemple : Un condensateur de 0,5 microfarad chargé au potentiel de 150 volts renfermera : $0,5 \times 150 = 75$ microcoulombs d'électricité.

Charge prise par deux condensateurs. — Deux condensa-

teurs de capacité c et c' reliés l'un au pôle (+), l'autre au pôle (—) d'une pile isolée, les autres armatures étant à la terre, prennent des charges égales et de signes contraires (+ q et — q).

Les relations entre les charges, les capacités et les potentiels v et v' , sont les suivantes, E étant la f. é. m. de la pile :

$$q = cv \quad -q' = c'v' \quad v - v' = E.$$

$$v = \frac{Ec'}{c + c'} \quad v' = \frac{Ec}{c + c'} \quad q = \frac{E}{\frac{1}{c} + \frac{1}{c'}}.$$

Condensateurs reliés en surface. — Soit a, b, c, \dots la capacité individuelle de chaque condensateur. La capacité totale $C = a + b + c, \dots$

Si les condensateurs sont chargés séparément de quantités :

$$q = av \quad q' = bv' \quad q'' = cv'',$$

la charge totale Q , lorsqu'ils seront reliés en surface, sera :

$$Q = q + q' + q'' \dots;$$

Le potentiel commun V sera :

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{av + bv' + cv'' \dots}{a + b + c \dots}.$$

Si un seul des condensateurs possède une charge $q = av$, après la réunion le potentiel commun sera :

$$\frac{q}{c} = \frac{av}{a + b + c \dots}.$$

Condensateurs en cascade. — Armature interne du premier reliée à la source E , armature externe à l'armature interne du deuxième, armature externe du deuxième à l'armature interne du troisième, etc., l'armature externe du dernier reliée à la terre.

La *capacité* du système est donnée par la relation :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \dots$$

si les n condensateurs ont une même capacité a :

$$V = \frac{nQ}{a}, \quad Q = \frac{aV}{n}, \quad C = \frac{a}{n}.$$

En déchargeant le système, la quantité d'électricité qui traverse le circuit extérieur est :

$$\frac{aV}{n}.$$

Mais, en séparant les condensateurs, chacun d'eux a séparément une charge de même valeur.

Énergie d'un condensateur. — L'énergie due à la décharge d'un condensateur a pour valeur :

$$W = \frac{1}{2} Q V = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} V^2 C,$$

Q étant la charge, V le potentiel, C la capacité.

Lorsque V est exprimé en volts, C en farads, Q en coulombs, l'énergie d'un condensateur en *ergs*, en kilogrammètres ou en calories, a pour valeur :

$$W = \frac{1}{2} V^2 C \times 10^7 \text{ ergs};$$

$$W = \frac{1}{2} V^2 C \times \frac{1}{98,4 \times 10} \text{ kgm.};$$

$$W = \frac{1}{2} V^2 C \times \frac{1}{42 \times 10} \text{ calories (g.-d.)}.$$

Ces relations sont utilisées dans les méthodes de mesure fondées sur l'emploi des condensateurs, l'étude des câbles sous-marins et les magnifiques expériences de M. Gaston Planté avec sa machine rhéostatique.

Électricité de contact. — Le contact de deux corps de nature différente produit une différence de potentiel entre ces corps. Cette différence de potentiel varie avec la nature des corps en contact.

Loi de Volta. — La différence de potentiel entre deux métaux est égale à la somme algébrique des différences de potentiel dues au contact des métaux intermédiaires.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE. — LOIS DES COURANTS

Lorsque deux points dont le potentiel est différent sont reliés par un conducteur, il s'écoule un flux d'électricité dans le conducteur qui relie ces deux points; ce flux prend le nom de *courant*. Si les points reliés par le conducteur sont seulement en relation avec des corps chargés d'une cer-

taine quantité d'électricité, le flux ne dure qu'un instant et constitue une *décharge*.

Si, par un artifice quelconque, on maintient la différence de potentiel constante, on obtient un véritable *courant*. La cause qui produit le courant se nomme *force électromotrice*, et tout appareil dans lequel elle se développe constitue un *générateur électrique*. L'obstacle plus ou moins grand que le conducteur oppose au passage du courant est la *résistance* du conducteur, l'*intensité* du courant est égale à la quantité d'électricité qui traverse le conducteur pendant l'unité de temps. Elle est la même dans tous les points du circuit. L'intensité d'un courant, la force électromotrice et la résistance sont reliées entre elles par la loi de Ohm.

Loi de Ohm. — L'intensité d'un courant est proportionnelle à la force électromotrice et inversement proportionnelle à la résistance du circuit. En désignant par I l'intensité, E la force électromotrice, R la résistance, la loi de Ohm a pour expression :

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

Lois de Kirchhoff. — 1° Pour tout point de concours, c'est-à-dire tout point où aboutissent plus de deux conducteurs, la somme des intensités des courants qui le traversent est nulle, en considérant comme positifs (+) les courants qui se dirigent vers le point, et comme négatifs (—) ceux qui s'en éloignent.

2° Pour toute figure fermée d'un système de conducteurs, la somme des produits des intensités par les résistances est égale à la somme des forces électromotrices, en considérant comme positives celles qui produisent une augmentation de potentiel et comme négatives celles qui produisent une diminution.

Corollaires de Bosscha. — 1° Lorsque, dans un système de circuits fermés, l'intensité du courant est nulle dans l'une des branches, les intensités dans les autres branches sont indépendantes de la résistance du conducteur dans lequel il n'y a pas de courant. Cette résistance peut varier de zéro à l'infini sans altérer le régime établi.

2° Lorsque deux branches A et B d'un réseau de conducteurs sont telles qu'une force électromotrice placée dans la branche A n'envoie aucun courant dans la branche B, on peut faire varier A de zéro à l'infini sans troubler le régime dans la branche B.

Résistance spécifique d'une substance. — La résistance spécifique d'une substance est la valeur en unités absolues de la résistance

d'un cube de cette substance ayant pour côté l'unité de longueur, cette résistance étant mesurée entre deux faces opposées.

Conductibilité. — C'est l'inverse de la résistance. Elle est aujourd'hui fort peu employée dans la pratique, si ce n'est pour apprécier la valeur relative des conducteurs électriques. Dans ce cas, on prend comme point de comparaison la conductibilité du cuivre pur à 0°; on la représente par 100 ou par 1, suivant les auteurs.

Résistance d'un conducteur. — La résistance d'un conducteur R est proportionnelle à sa longueur l , inversement proportionnelle à sa section s et proportionnelle à la résistance spécifique a du corps dont il est composé :

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

Lorsque le conducteur est cylindrique, sa résistance est inversement proportionnelle au carré de son diamètre d :

$$R = \frac{a l}{d^2} \times \frac{4}{\pi}.$$

Résistance des circuits dérivés, divisés ou parallèles. — Lorsque les circuits dérivés sont au nombre de deux, a et b , la résistance réunie ou réduite R est égale à leur produit divisé par leur somme :

$$R = \frac{a b}{a + b},$$

Lorsque les circuits sont *en nombre quelconque*, en désignant par a, b, c leurs valeurs, leur résistance réduite R est égale à la réciproque de la somme de leurs réciproques :

$$R = \frac{1}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \dots}$$

Lorsque les n circuits dérivés sont *de même résistance* a , on a pour la valeur de leur résistance réduite :

$$R = \frac{a}{n}.$$

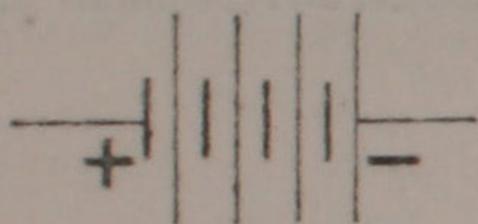
PILES VOLTAÏQUES

Une *pile* est un appareil qui produit un courant électrique par une action chimique, en général par l'oxydation du zinc et quelquefois du fer. L'ensemble de plusieurs *éléments* de pile forme une *batterie*.

Une pile comprend en général deux lames métalliques plongeant dans un même liquide ou dans deux liquides différents. Les points où s'attachent les conducteurs extérieurs se nomment *pôles* ou *électrodes*. La lame oxydée, du zinc en général, constitue le pôle *néгатif*; la lame réduite, le pôle *positif*.

Par convention, on suppose que le développement d'énergie électrique produit par l'action chimique se manifeste sous forme de *flux* ou de *courant* électrique dont on définit le *sens* en disant que, dans le circuit extérieur le courant produit va du pôle positif (+) au pôle négatif (—), et à l'intérieur de l'élément, du pôle négatif au pôle positif. Cette convention, commode pour l'explication des phénomènes, ne préjuge en rien la nature intime du courant, inconnue pour nous jusqu'à présent. Dans toutes les piles actuellement existantes, le zinc est le pôle négatif; le platine, charbon ou cuivre, le pôle positif.

Lorsque, dans une batterie, le pôle + du premier élément est relié au pôle — du second, le pôle + du second au pôle — du troisième, etc., on dit que les éléments sont montés en *tension* ou en *série*.



Signe conventionnel
des piles.

Lorsque, dans une batterie, tous les pôles + sont reliés entre eux, et les pôles — entre eux, les éléments sont montés en *dérivation*, en *quantité*, en *surface* ou en *arc multiple*.

Lorsque les éléments sont montés de manière à opposer leurs f. é. m., on dit qu'ils sont montés en *opposition*.

Signe conventionnel des piles. — Pour éviter de répéter le dessin d'une pile, on emploie dans les diagrammes le signe conventionnel représenté ci-dessus. Les lignes fines représentent les zincs (—) et les lignes épaisses, les cuivre, platine ou charbon (+); leur nombre indique celui des éléments.

Lois des actions chimiques dans les piles. — La quantité d'action chimique — zinc dissous — dans une pile est théoriquement proportionnelle à la quantité d'électricité qu'elle produit, et, par unité de temps, elle est proportionnelle à l'intensité du courant.

Dans une batterie d'éléments disposés en tension, la quantité d'action chimique est la même dans chaque élément.

Constantes des piles. — La force électromotrice d'une pile dépend de la nature des réactions chimiques des substances en présence, de leur concentration et de la température. La résistance intérieure dépend de sa forme et de ses dimensions; on peut la diminuer en rapprochant les plaques et en augmentant leurs dimensions.

La force électromotrice d'une pile E et sa résistance intérieure r se

nomment les *constantes* de la pile. Une pile est dite constante ou impolarisable lorsque ses constantes ne changent pas pendant son fonctionnement.

La *polarisation* d'une pile est l'affaiblissement de son énergie électrique. Elle est due à un dépôt d'hydrogène sur le pôle positif qui augmente la résistance intérieure et diminue la f. é. m. On combat la polarisation par l'agitation, l'insufflation, l'emploi d'électrodes rugueuses, l'introduction dans le liquide actif d'une substance très oxydante qui absorbe l'hydrogène à l'état naissant, ou par l'emploi d'un système dans lequel le dégagement gazeux d'hydrogène est remplacé par un dépôt de métal solide (pile de Daniell).

Énergie d'une pile. — On ne peut comparer deux piles qu'en les plaçant dans des conditions analogues de fonctionnement. Le plus simple est de faire connaître l'intensité du courant I_m que chaque élément peut fournir dans les conditions de puissance maxima, c'est-à-dire avec un circuit extérieur égal à sa résistance intérieure (cette condition suppose que la pile est impolarisable). En désignant par E et r les constantes de l'élément, on a pour I_m :

$$I_m = \frac{E}{2r}.$$

On donne aussi quelquefois la valeur de la puissance maxima disponible W_u , qui se calcule alors par la formule :

$$W_u = \frac{EI_m}{2g} = \frac{E^2}{4rg} \text{ kgm. par seconde.}$$

C'est le *débit maximum utile* de la pile en kilogrammètres d'énergie électrique par seconde (E en volts, I_m en ampères, r en ohms, $g = 9,81$). Le *débit maximum total* W_t a une valeur double :

$$W_t = \frac{E^2}{2rg}.$$

Lorsqu'une pile travaille dans les conditions de maximum, c'est-à-dire sur un circuit extérieur égal à sa résistance propre, le travail utile disponible dans le circuit extérieur est égal à la moitié de l'énergie totale fournie par l'action chimique. Le rendement est alors de 50 pour 100.

Montage des piles. — Nous supposerons tous les éléments identiques. Les constantes d'un élément sont : E pour la force électromotrice, r pour la résistance intérieure.

1° n éléments montés en *tension*, se comportent comme *un seul* élément dont la f. é. m. = nE et la rés. intérieure = nr .

2° n éléments montés en *quantité*, en batterie, en surface, en dériva-

tion ou en arc multiple, se comportent comme *un seul* élément de même f. é. m. E , dont la résistance intérieure $= \frac{r}{n}$.

3° n éléments montés *en série*, soit t en tension, q en quantité, se comportent comme *un seul* élément dont la f. é. m. $= tE$ et la rés. intérieure $= \frac{t}{q} r$.

Débit maximum. — Lorsqu'on a n éléments, pour obtenir le débit maximum sur un circuit extérieur de résistance R , il faut que la résistance intérieure de la pile soit égale à la résistance extérieure R , c'est-à-dire que

$$\frac{t}{q} r = R, \quad (1)$$

à la condition que le rapport $\frac{t}{q}$ soit un nombre entier.

L'équation (1) combinée avec l'équation $n = tq$ permet de calculer les valeurs de t et de q .

L'intensité I du courant est alors :

$$I = \frac{tE}{\frac{t}{q} r + R} = \frac{tE}{2R}$$

Ces formules s'appliquent également aux machines à courant continu *magnéto-électriques* ou *dynamo-électriques* avec excitation séparée.

Pile shuntée. Théorème de M. Pollard. — Soient E et r les constantes d'une pile. Lorsque cette pile, supposée impolarisable, est shuntée par une rés. s , elle se comporte comme une nouvelle pile dont la f. é. m. serait $\frac{Es}{r + s}$ et la rés. intérieure $\frac{rs}{r + s}$.

ÉLECTROLYSE

Lois de l'électrolyse. — L'*électrolyse* est la décomposition d'un liquide ou d'une solution produite par un courant. Les corps ainsi décomposés se nomment *électrolytes*. Les deux pôles plongeant dans le liquide à électrolyser s'appellent *électrodes*, celui qui correspond au pôle positif de la pile est l'*anode*, l'autre est la *cathode*.

Faraday appelle *ions* les corps produits par l'électrolyse ; ceux qui vont à l'anode sont les *anions*, ceux qui vont à la cathode sont les *cathions*.

Lois de Faraday. — Un corps simple ne peut pas être un élec-

trolyte. L'électrolyse ne se produit pas lorsque le corps est à l'état solide. La quantité d'action électro-chimique est la même en tous les points d'un circuit.

La quantité d'un ion libéré par un électrolyte dans l'unité de temps est proportionnelle à l'intensité du courant.

La quantité d'un ion libéré à une électrode par seconde est égale à l'intensité du courant multipliée par l'équivalent électro-chimique du ion.

Réciproquement, la quantité d'électricité qui a traversé un électrolyte dans un temps donné est égale au poids du ion libéré divisé par l'équivalent électro-chimique de ce ion.

L'équivalent électro-chimique d'un corps est la quantité de cette substance libérée par le passage de l'unité de quantité d'électricité. L'équivalent électro-chimique est proportionnel à l'équivalent chimique.

ACTIONS CALORIFIQUES DES COURANTS

Loi de Joule. — La quantité de chaleur H dégagée dans un conducteur est proportionnelle à la résistance du conducteur R , au carré de l'intensité I du courant et au temps t pendant lequel le courant passe. On a alors :

$$H = \frac{1}{A} RI^2t.$$

A étant l'équivalent mécanique de la chaleur.

Combinée avec la loi de Ohm, la loi de Joule prend encore les deux formes suivantes :

$$H = \frac{1}{A} EIt = \frac{1}{A} \frac{E^2}{R} t.$$

E étant la différence de potentiel entre les deux extrémités de la rés. R .

En désignant par Q la quantité d'électricité qui traverse le conducteur, pendant un temps t , en vertu de la loi de Faraday : $Q = It$, la loi de Joule s'écrit aussi :

$$H = \frac{1}{A} QE.$$

Relations numériques. — lorsque les intensités I sont exprimées en ampères¹, les forces électromotrices E en volts, les résistances R en ohms et les quantités d'électricité Q en coulombs, la quantité de chaleur dégagée en calories (g.-d.) a pour expression :

$$H = \frac{I^2Rt}{4,16} = \frac{QE}{4,16} \text{ calories (g.-d.)}$$

¹ Voy. la deuxième partie, relative aux unités de mesure.

Voir la *Thermo-électricité* dans la 4^e partie (page 200).

TRAVAIL PRODUIT PAR LES COURANTS

Loi de Joule. — Le travail W équivalent au passage d'un courant dans un conducteur a pour expression :

$$W = I^2 R t = E I t = \frac{E^2}{R} t.$$

En vertu de la loi de Faraday : $Q = I t$, la loi de Joule s'écrit aussi :

$$W = Q E.$$

Relations numériques. — Lorsque les intensités I sont exprimées en ampères, les forces électromotrices E en volts, les résistances R en ohms, et les quantités d'électricité Q en coulombs, le travail a pour expression :

$$W = 10 I^2 R t = 10 E I t = 10 \frac{E^2}{R} t \text{ meg-ergs.}$$

$$W = \frac{I^2 R}{9,81} t = \frac{E I}{9,81} t = \frac{E^2}{9,81 R} t \text{ kgm.}$$

La puissance ou travail *par seconde* s'obtient en faisant $t = 1$ dans les formules ci-dessus.

Le travail en fonction des quantités d'électricité s'obtient par les formules :

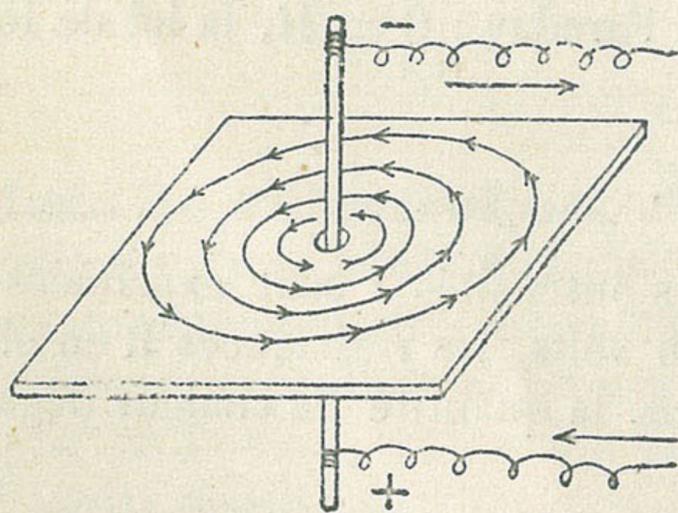
$$W = 10 Q E \text{ meg-ergs,}$$

$$W = Q E \text{ volt-coulombs ou joules,}$$

$$W = \frac{Q E}{9,81} \text{ kgm.}$$

ÉLECTRO-DYNAMIQUE

Champ électrique ou champ galvanique. — Espace en-



Champ galvanique.

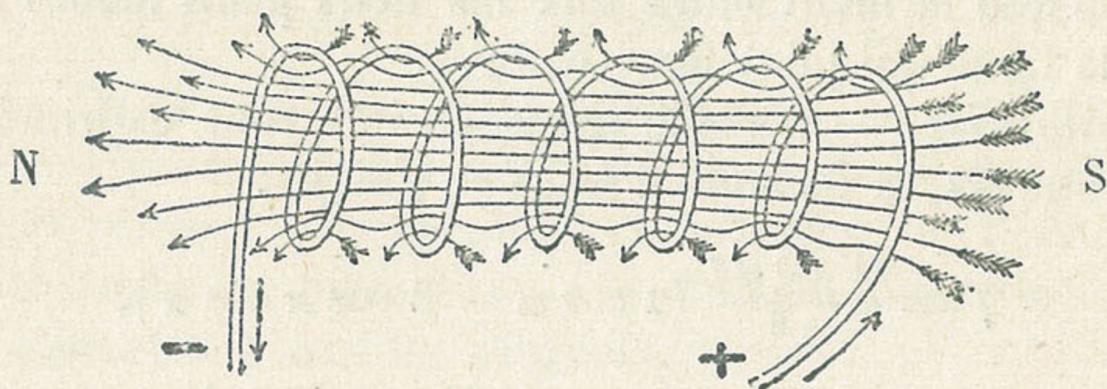
tourant un conducteur traversé par un courant. Le champ galvanique est caractérisé par de véritables *tourbillons* ; les lignes de force sont des cercles concentriques au courant ; leur nombre est proportionnel à son intensité. Dans un courant rectiligne, lorsqu'on regarde l'extrémité par laquelle entre le courant (+), la direction des lignes de force est celle des aiguilles d'une montre (voy.

la figure ci-dessus). Les lignes de force d'un champ galvanique jouissent

des mêmes propriétés que les lignes de force d'un champ magnétique. On déduit de leur considération les lois d'Ampère relatives aux actions mutuelles des courants.

Feuillet magnétique. — Un courant circulaire fermé est analogue à une sorte d'aimant plat ou feuillet magnétique, dont une des faces est le pôle nord et l'autre face le pôle sud. La règle suivante permet de déterminer la polarité de chaque face. Lorsque, suivant la convention établie, le courant circule dans la direction apparente des aiguilles d'une montre, la face que l'on regarde constitue le pôle *sud* du feuillet magnétique; elle est, au contraire, le pôle *nord* si le courant circule dans la direction apparente inverse des aiguilles d'une montre. Au centre du courant circulaire, les lignes de force sont perpendiculaires au plan du courant.

Solénoïde. — Une série de courants circulaires constitue un solé-



Solénoïde.

noïde; leurs actions réciproques modifient la direction des lignes de force et leur donnent la disposition indiquée par le croquis ci-dessus. Le solénoïde se trouve alors assimilable à un *aimant* dont le pôle nord (marqué) est celui pour lequel, lorsqu'on le regarde par l'extrémité, le courant circule en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Actions mutuelles de deux courants (Lois d'Ampère). — Deux courants parallèles de même sens s'attirent. — Deux courants de sens contraires se repoussent. — La force qui s'exerce entre deux courants rectilignes *parallèles* est égale au produit des intensités des courants multiplié par leur longueur, divisé par le carré de leur distance.

Deux portions d'un même courant se repoussent.

Deux courants *angulaires* s'attirent quand ils s'approchent ou s'éloignent tous deux de leur point de croisement; ils se repoussent si l'un d'eux s'approche et l'autre s'éloigne de ce point de croisement. Ils tendent donc toujours à se placer parallèlement.

Un courant sinueux produit le même effet qu'un courant rectiligne terminé aux mêmes extrémités.

Actions mutuelles de deux éléments de courant (*Formule d'Ampère*). — Deux éléments de courant ds, ds' , traversés par des courants d'intensité¹ i, i' , s'attirent ou se repoussent suivant la ligne qui joint leurs centres avec une force f :

$$f = \frac{ii' ds ds'}{r^2} \left(\cos \omega - \frac{3}{2} \cos \alpha \cos \alpha' \right),$$

r étant la distance des centres, ω l'angle que forment entre eux les deux éléments, α et α' les angles qu'ils forment l'un avec la droite qui les réunit, l'autre avec son prolongement. Lorsque f est positif, il y a attraction; lorsque f est négatif, il y a répulsion.

On peut aussi écrire la formule sous la forme :

$$f = \frac{ii' ds ds'}{r^2} \left(\sin \alpha \sin \alpha' \cos \theta - \frac{1}{2} \cos \alpha \cos \alpha' \right),$$

θ étant l'angle que forment entre eux les deux plans menés par les deux éléments et la ligne qui joint leurs centres.

Formule anglaise. — Lorsque les intensités sont exprimées en unités électro-magnétiques, la formule d'Ampère s'écrit :

$$f = \frac{II' ds ds'}{r^2} \left(2 \cos \omega - 3 \cos \alpha \cos \alpha' \right),$$

si ds, ds' et r sont exprimés en centimètres, I et I' en unités C. G. S. électro-magnétiques d'intensité, f est alors donné en *dynes*.

Deux courants rectilignes parallèles. — Si l'un d'eux est de longueur finie l , l'autre indéfini, et d leur distance, on a :

$$f = \frac{ii' l}{d}.$$

Et en unités électro-magnétiques :

$$f = \frac{2 II' l}{d}.$$

Deux circuits plans disposés à angle droit à une distance d . — L'un des circuits, étant fixe, exerce sur l'autre circuit mobile un couple dont le moment M est :

$$M = \frac{ss' ii'}{d^5},$$

s et s' étant les surfaces des circuits, i et i' les intensités qui les traversent exprimées en unités électro-dynamiques.

¹ Les notations i, i' se rapportent aux unités électro-dynamiques, les notations I, I' aux unités électro-magnétiques. Le rapport est : $i = I \sqrt{2}$.

En unités électro-magnétiques, le moment M est :

$$M = \frac{2 ss' II'}{d^5}.$$

Action de deux bobines renfermant n et n' tours de fil placées à une distance d . — Le moment du couple M exercé par la bobine fixe sur la bobine mobile a pour valeur :

$$M = \frac{nn' ss' ii'}{d^5},$$

et en unités C. G. S. électro-magnétiques :

$$M = \frac{2 nn' ss' II'}{d^5},$$

ss' surfaces moyennes des spires, d distance des centres des bobines, distance très grande par rapport aux dimensions des bobines.

Action de la terre sur les courants. — La terre exerce sur les courants une action directrice analogue à celle que produirait un courant continu passant à l'équateur, et circulant de l'est à l'ouest. Ce courant hypothétique explique à la fois l'action directrice de la terre sur l'aiguille aimantée et sur les courants.

Conducteurs astatiques. — Conducteurs enroulés pour détruire l'action directrice de la terre dans l'étude des actions mutuelles des courants.

Solénoïde. — Série de courants circulaires égaux de même sens dont les plans sont perpendiculaires à la ligne, droite ou courbe, passant par les centres de tous les cercles.

Propriétés des solénoïdes. — Un solénoïde s'oriente sous l'action de la terre; le bout dans lequel le courant circule dans le sens des aiguilles d'une montre lorsqu'on le regarde se dirige vers le sud, le bout opposé vers le nord. Le bout qui va au nord est le pôle nord (pôle marqué); l'autre, le pôle sud. Les pôles de même nom de deux solénoïdes se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent. Les mêmes actions se produisent entre un aimant et un solénoïde.

Assimilation des aimants aux solénoïdes. — Pour simplifier l'explication des phénomènes, on peut assimiler un corps aimanté à une série de files juxtaposées de courants circulaires, ou à un faisceau de solénoïdes. Les solénoïdes et les aimants se comportent alors de la même manière et, en remplaçant les aimants par des solénoïdes, on explique

toutes les actions des aimants entre eux, et des courants sur les aimants. On retrouve la direction de ces courants d'Ampère dans un aimant en se rappelant qu'en regardant le bout marqué, pôle nord ou austral, les courants circulent en sens inverse des aiguilles d'une montre. On désigne quelquefois ces courants sous le nom de *courants particuliers d'Ampère*.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME

Principe fondamental. — Lorsqu'un courant traverse un fil placé parallèlement à une aiguille aimantée libre de se mouvoir, il la dévie d'un certain angle qui augmente avec l'intensité du courant.

Règle d'Ampère relative à l'action des courants sur l'aiguille aimantée. — Si l'on suppose un observateur couché sur le fil que traverse le courant dans une position telle que le courant lui entre par les pieds et qu'il regarde l'aimant, il verra toujours le pôle nord (austral ou marqué) de l'aimant dévié vers sa gauche. En supposant au courant une droite et une gauche, on dit que le pôle nord de l'aiguille se porte toujours à la gauche du courant.

Multiplicateur. — Lorsque le fil fait plusieurs tours autour de l'aiguille, l'action du courant se trouve ainsi multipliée, le système constitue un multiplicateur; les *galvanomètres* (voy. 2^e partie) sont des applications du principe du multiplicateur.

La déviation produite par un courant sur une aiguille aimantée est indépendante de l'intensité magnétique de l'aiguille.

Lorsqu'un courant circulaire placé dans le méridien magnétique dévie une aiguille aimantée dont la longueur est infiniment petite par rapport au diamètre du cercle, l'intensité du courant est proportionnelle à la tangente de l'angle de déviation (*Weber*). C'est le principe du galv. des tangentes.

Lorsqu'on fait tourner le cadre jusqu'à ce que l'aiguille soit encore dans son plan, l'intensité du courant est proportionnelle au sinus de l'angle dont le cadre a tourné. Ici la loi est exacte, quelles que soient les dimensions de l'aiguille et la forme du cadre. C'est le principe du galv. des sinus.

Électro-aimant. — En introduisant dans un solénoïde un barreau de fer, les lignes de force développées par un courant le traversent et le transforment en un électro-aimant dont la puissance dépend de l'intensité du courant, du nombre de spires du solénoïde, etc. Ces propriétés magnétiques durent autant que le passage du courant, et cessent presque immédiatement avec lui.

Action d'un aimant sur un feuillet magnétique. — Il est facile de prévoir l'action réciproque d'un aimant et d'un courant circulaire en se référant aux propriétés des lignes de force. Tous les cas sont compris dans une élégante règle due à Clerk-Maxwell.

Règle de Maxwell. — Lorsqu'un aimant est en présence d'un circuit, chaque portion du circuit agit sur l'aimant dans une direction telle qu'il embrasse le plus grand nombre de lignes de force possible.

Il résulte de cette règle que si l'aimant est libre de se mouvoir, il y aura *mouvement*, attraction ou répulsion suivant les positions relatives des lignes de force, et quelquefois même rotation de l'aimant sur lui-même pour satisfaire à la règle que nous venons d'énoncer.

Action d'un élément de courant sur un pôle magnétique (*Formule d'Ampère*). — Soient ds la longueur de l'élément, m l'intensité du pôle, r la distance du pôle à l'élément, I l'intensité du courant, α l'angle de l'élément avec la droite qui joint son centre au pôle.

Direction. — La force exercée par l'élément de courant sur le pôle est normale au plan passant par le pôle et l'élément.

Sens. — Si l'on suppose un observateur couché sur l'élément, le courant lui entrant par les pieds et regardant le pôle, ce pôle sera poussé de droite à gauche, si c'est un pôle *nord*, et de gauche à droite si c'est un pôle *sud*.

Grandeur. — La force exercée f a pour valeur :

$$f = \frac{m I ds \sin \alpha}{r^2}.$$

Elle est proportionnelle à l'intensité du pôle, à l'intensité du courant, à sa longueur, et inversement proportionnelle au carré de la distance du pôle à l'élément de courant.

Champ galvanique. — Nous avons vu que l'espace soumis à l'influence d'un courant se nomme champ galvanique. Il est caractérisé par la présence de lignes de force analogues à celles d'un champ magnétique, mais dont l'existence est subordonnée au passage du courant.

Le champ galvanique produit en un point se définit par la direction, le sens et la grandeur de la force exercée par le courant sur un pôle *nord* d'une unité d'intensité placée en ce point.

Pour un circuit d'une forme donnée, le champ est déterminé par la résultante de toutes les actions du circuit décomposé en éléments infiniment petits. Lorsque le circuit a une forme géométrique, on peut déterminer très simplement la valeur du champ formé par le courant. Nous donnerons ici les formules pour les cas les plus simples et les plus importants.

Arc de cercle. — Soient l sa longueur, r son rayon, I l'intensité du courant. L'intensité du champ galvanique au centre a pour valeur :

$$f = \frac{I l}{r^2}.$$

Elle est perpendiculaire au plan déterminé par l'arc de cercle et le centre.

Cercle entier.

$$f = \frac{2 \pi I}{r}.$$

Cercle de n tours. — En appelant r le rayon moyen :

$$f = \frac{2 \pi n I}{r}.$$

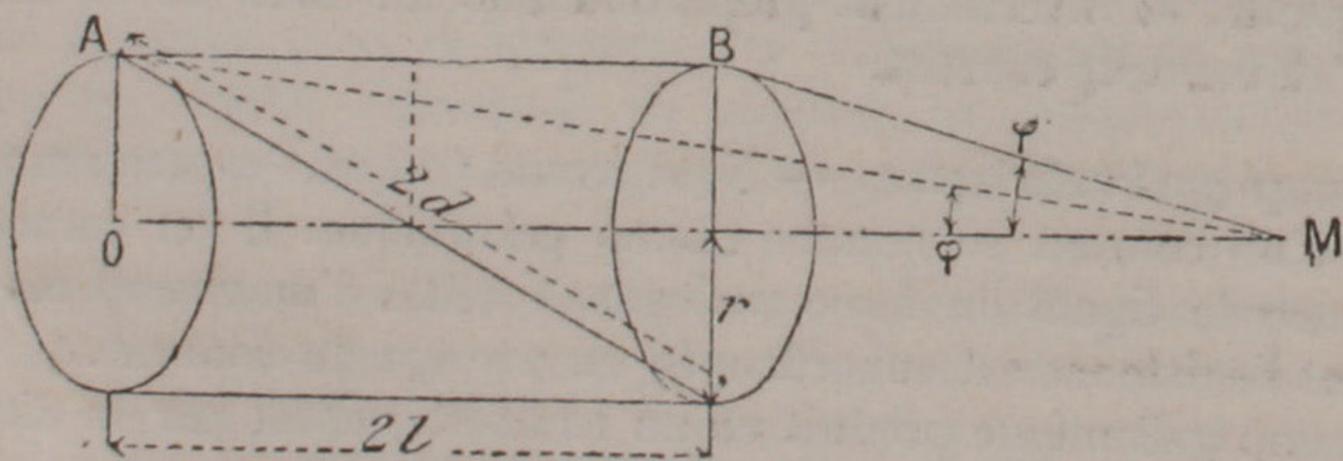
Intensité du champ produit par un cercle de rayon r sur la perpendiculaire à son plan passant par son centre et à une distance d :

$$f = \frac{2 \pi I r^2}{(r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

En posant $\pi r^2 = S$ (surface du cercle de rayon r) et $r^2 + d^2 = \rho^2$, on a :

$$f = \frac{2 I S}{\rho^3}.$$

Solénoïde. — *Intensité du champ sur l'axe.* — Soit n le nombre



Champ magnétique sur l'axe d'un solénoïde.

de tours, r le rayon, $2 l$ la longueur, a la distance du point M sur l'axe à l'extrémité la plus rapprochée :

$$f = \frac{\pi n I}{l} \left(\frac{a + 2 l}{\sqrt{r^2 + (a + 2 l)^2}} - \frac{a}{\sqrt{r^2 + a^2}} \right).$$

Et en posant : angle $AM O = \varphi$; angle $BM O = \varphi'$:

$$f = \frac{\pi n I}{l} (\cos \varphi - \cos \varphi').$$

Intensité du champ au centre. — Elle est maximum en ce point :

$$f_c = \frac{2 \pi n I}{\sqrt{r^2 + l^2}},$$

et en appelant $2d$ la diagonale du solénoïde :

$$f = \frac{2 \pi n I}{d}.$$

Intensité du champ produit par un courant rectiligne indéfini. — Soit r la distance du point considéré à l'élément :

$$f = \frac{2 i}{r}.$$

Intensité du champ produit par un circuit fermé plan.

1° En un point situé sur la normale passant par le centre de gravité de la surface du circuit fermé à une distance d :

$$f = \frac{2 S I}{d^3}.$$

2° En un point situé dans le plan du courant et à une distance d de son centre :

$$f = \frac{S I}{d^3}.$$

Aimantation par les courants. — Un fil traversé par un courant possède temporairement des propriétés magnétiques.

Lorsqu'on enroule un fil isolé un grand nombre de fois sur un morceau de fer doux, le passage d'un courant développe une aimantation temporaire puissante qui cesse après le passage du courant si le fer est très doux. On a alors un *électro-aimant* dont la puissance varie avec les dimensions, l'intensité du courant, le nombre de spires, etc. (voy. 4^e partie).

Lorsque le fer n'est pas parfaitement doux, il conserve un peu de *magnétisme rémanent*.

Règle pour trouver les pôles d'un électro-aimant. —

Lorsqu'un courant traverse le fil d'un électro-aimant, et qu'on regarde l'extrémité de chaque pôle, le pôle sud est celui pour lequel le courant circule dans le sens des aiguilles d'une montre, et le pôle nord (marqué)

celui où le courant circule en sens inverse. Cette position est conforme à la direction des lignes de force du champ galvanique constitué par le solénoïde qui entoure le noyau de l'électro-aimant.

INDUCTION

Tout déplacement relatif d'un conducteur et d'un champ magnétique ou galvanique donne naissance dans ce conducteur à une *force électromotrice* d'induction, et si ce conducteur est un *circuit fermé*, il s'y développe un *courant* d'induction. Le champ magnétique ou galvanique constitue l'*inducteur*, le circuit dans lequel la f. é. m. se développe constitue l'*induit*. Ces courants d'induction se produisent soit par *déplacement mécanique* relatif de l'inducteur et de l'induit (machines magnéto- et dynamo-électriques), soit par *variation* du champ galvanique produit par le courant qui traverse l'inducteur (bobine de Ruhmkorff). L'induction d'un courant sur lui-même prend le nom de *self-induction*; on lui donne le nom d'*extra-courant* lorsqu'elle résulte de la fermeture ou de la rupture du circuit.

Induction produite dans un circuit rectiligne se déplaçant parallèlement à lui-même dans un champ magnétique uniforme.

Force électromotrice d'induction. — Soient e la f. é. m. d'induction, H l'intensité du champ magnétique, l la longueur du circuit rectiligne, v sa vitesse, α l'angle du conducteur avec la direction des lignes de force, φ l'angle qui fait la direction du mouvement avec la direction de la force exercée par le champ magnétique sur le circuit; on a :

$$e = H l v \sin \alpha \cos \varphi.$$

Si le conducteur se meut dans la direction de la force, $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$, et

$$e = H l v \sin \alpha.$$

Travail d'induction. — Soit t le temps du déplacement, W le travail d'induction :

$$W = \frac{H^2 l^2 v^2 t \sin^2 \alpha \cos^2 \varphi}{R},$$

R étant la résistance totale du circuit induit.

Direction du courant induit. — Si l'on suppose un observateur couché dans le champ suivant les lignes de force qui lui entrent par les pieds, et regardant dans le sens du mouvement du conducteur, le courant produit par le déplacement ira de sa gauche à sa droite.

Induction dans un circuit fermé. — Lorsque le circuit se

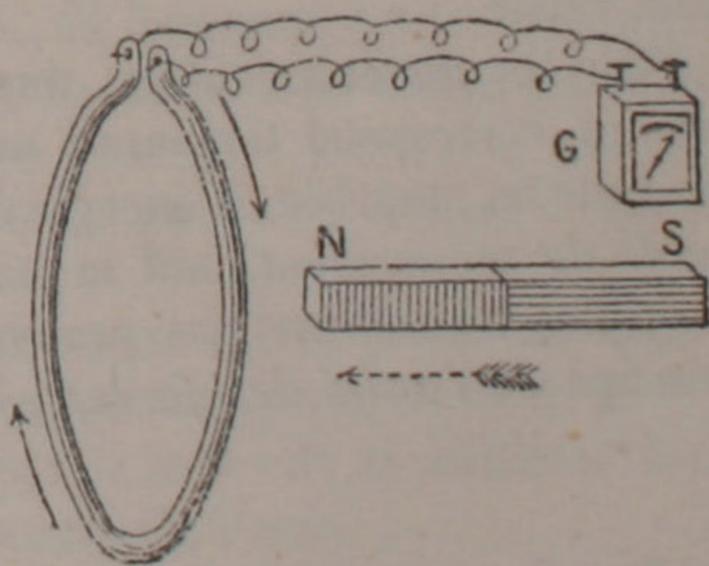
déplace tout entier, s'il n'y a pas variation dans le nombre de lignes de force embrassées par le circuit pendant son déplacement, il n'y a pas de courant d'induction, parce que la f. é. m. développée dans chaque élément à un instant donné sera compensée par une f. é. m. égale et de signe contraire développée dans l'élément symétrique correspondant.

Lorsqu'il y a *variation* du nombre de lignes de force embrassées par le circuit, le courant développé se déduit très simplement de la règle de Maxwell. Lorsque le déplacement est tel que le circuit tend à embrasser un *plus grand* nombre de lignes de force, le courant induit est *inverse* à celui qui, traversant le circuit, produirait le même champ. Lorsque le mouvement est tel que le circuit tend à embrasser un *plus petit* nombre de lignes de force, le courant induit est *direct*, c'est-à-dire de même sens que celui qui produirait le même champ galvanique.

Prenons, par exemple, un cas simple, celui d'un aimant placé perpendiculairement et à une certaine distance d'un courant circulaire. Pour qu'il y ait attraction de cet aimant, dans la position représentée par la figure, c'est-à-dire déplacement de l'aimant dans le sens de la flèche en pointillé, il faudrait qu'un courant circulât dans le sens indiqué par les flèches en traits pleins.

Si l'on déplace l'aimant dans le sens indiqué par la flèche en pointillé sous l'action d'une force mécanique extérieure, on reconnaît, à l'aide d'un galvanomètre extérieur G, que le courant induit par le mouvement de l'aimant est en sens *inverse* de celui qui produirait le même mouvement. Ce courant induit résulte de ce que, par suite du déplacement de l'aimant, le circuit embrasse un *plus grand* nombre de lignes de force. On reconnaît de même que, lorsque le circuit tend à embrasser un *plus petit* nombre de lignes de force, le courant induit par le déplacement de l'aimant est *direct*, c'est-à-dire de même sens que le courant qui, en traversant le circuit, produirait le même champ que l'aimant.

On voit, d'après cela, que les mots *direct* et *inverse* sont relatifs : un courant *direct* provient d'une diminution du nombre de lignes de force embrassées par le circuit, un courant *inverse* provient au contraire d'une augmentation du nombre de ces lignes de force. L'intensité du courant induit dépend de la *variation* du nombre de lignes de force traversées par le circuit à chaque instant, elle augmente avec la puissance de l'aimant et la vitesse du déplacement.



Induction.

Si le circuit est déjà traversé par un courant, l'effet d'induction s'ajoute ou se retranche du courant préexistant suivant que le courant développé à chaque instant est direct ou inverse.

On déduit directement de la règle de Maxwell qu'un aimant qui s'approche d'un circuit développe un courant *inverse*, et un aimant qui s'éloigne un courant *direct*. Un courant qui s'approche, qui commence ou qui augmente d'intensité développe un courant *inverse*; un courant qui s'éloigne, qui finit ou qui diminue d'intensité développe un courant *direct*.

Influence de l'extra-courant sur les courants induits. —

Un courant qui commence, gêné par l'extra-courant inverse, développe un courant induit *inverse* d'une certaine durée et de peu d'intensité; un courant qui finit développe un courant induit *direct* de courte durée, mais très intense. La quantité d'électricité produite par chacun d'eux est la même, les courants ne diffèrent que par leur durée.

Les bobines d'induction, les générateurs magnéto-électriques et les téléphones sont les plus importantes applications des phénomènes d'induction.

Loi de Lenz. — Quand on déplace un circuit devant un courant ou un aimant, ou réciproquement, le sens du courant induit est tel qu'il tend à gêner le mouvement.

La conservation de l'énergie dans l'induction. — La loi de Lenz relie, d'une manière frappante par sa netteté et sa simplicité, les actions réciproques des aimants et des courants au principe de la conservation de l'énergie, en disant que le courant induit dans chaque cas tend à *gêner* le mouvement mécanique correspondant. Les générateurs mécaniques d'électricité et les moteurs électriques sont les confirmations éclatantes de cette vérité.

Pour les uns et les autres, une somme de travail mécanique dépensé ou produit correspond toujours à une somme d'énergie électrique équivalente produite ou absorbée. L'énergie électrique est donc, comme la chaleur, un *mode de mouvement* dont la nature intime nous est inconnue, mais ses multiples transformations prouvent qu'elle ne saurait échapper au grand principe de l'*unité des forces physiques*.

DEUXIÈME PARTIE

UNITÉS DE MESURE

La plupart des quantités dont on fait usage dans les sciences physiques peuvent s'exprimer en fonctions de *trois* unités qui prennent le nom d'*unités fondamentales*. Toutes les autres s'en déduisent par définition et prennent le nom d'*unités dérivées*.

En théorie, les trois unités fondamentales peuvent être quelconques; en pratique, on a fait choix, dans le système établi par l'Association britannique et adopté par le Congrès international des électriciens en 1881, des trois unités suivantes :

Centimètre. — Unité de longueur;

Gramme-masse. — Unité de masse;

Seconde. — Unité de temps.

Le système d'unités physiques basé sur ces trois unités fondamentales porte le nom de *Système centimètre-gramme-seconde*, et, par abréviation, on le désigne le plus souvent sous le nom de *Système C. G. S.*

Unités fondamentales. — Les trois unités fondamentales se désignent par un symbole, L pour l'unité de longueur, M pour l'unité de masse, T pour l'unité de temps. En voici les définitions.

Unité de longueur. — L'unité C. G. S. de longueur est le *centimètre*. Sa valeur est égale à la centième partie du *mètre*. Le mètre est la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. L'unité pratique de longueur est représentée par des copies du mètre-étalon déposé à l'Observatoire de Paris.

Unité de masse. — L'unité C. G. S. de masse est le *gramme*. C'est la masse d'un *centimètre cube* d'eau distillée à la température de 4° C. L'unité *pratique* de masse est représentée par la masse de la millième partie du kilogramme-étalon déposé à l'Observatoire de Paris.

Unité de temps. — L'unité C. G. S. de temps est la *seconde*, définie comme étant la $\frac{1}{86\,400}$ partie du jour moyen. C'est la seule unité universellement employée aujourd'hui, la seule sur laquelle nous n'aurons pas à revenir pour donner des tables de réduction. En pratique, on emploie

quelquefois la *minute*, qui vaut 60 secondes, et l'*heure*, qui vaut 60 minutes ou 3600 secondes.

Multiples et sous-multiples. — Suivant la nature des quantités à mesurer, les unités adoptées sont tantôt trop grandes, tantôt trop petites. On se trouverait ainsi conduit à employer de trop grandes 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 et des sous-multiples qui désignent des multiples décimaux ou des fractions décimales de ces unités. Ces multiples ou sous-multiples s'indiquent sous la forme de *préfixes*, dont voici la nomenclature :

MULTIPLES . . .	<i>Mega</i> ou <i>meg</i> , désigne. . .	1 000 000	unités.
	<i>Myria</i>	10 000	—
	<i>Kilo</i>	1 000	—
	<i>Hecto</i>	100	—
	<i>Déca</i>	10	—
UNITÉ.			
SOUS-MULTIPLES.	<i>Déci</i> , désigne.	$\frac{1}{10}$	de l'unité.
	<i>Centi</i>	$\frac{1}{100}$	—
	<i>Milli</i>	$\frac{1}{1000}$	—
	<i>Micro</i> ou <i>micr</i>	$\frac{1}{1\ 000\ 000}$	—

Ainsi, par exemple, un megohm désigne un million d'ohms; un milli-ampère, la millièrme partie d'un ampère, etc.

Notations décimales ou de l'exposant. — Au lieu d'employer les multiples ou les sous-multiples, on exprime quelquefois un nombre en le considérant comme le produit de deux facteurs, dont l'un est un multiple de 10. On choisit souvent ces facteurs de telle sorte que l'exposant de la puissance de 10 soit la caractéristique du logarithme décimal de ce nombre. Pour les fractions, l'exposant est négatif.

Ainsi, par exemple, le nombre 459 000 000 s'écrira 459×10^6 ou $45,9 \times 10^7$ et la fraction 0,0000 459 s'écrira 459×10^{-7} ou $0,459 \times 10^{-4}$.

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 en caractères ordinaires.

Dimensions des unités. — Nous avons dit que toutes les unités

physiques peuvent se déduire des trois unités fondamentales, dont les symboles sont L, M et T. La relation qui lie une unité dérivée à une ou plusieurs des unités fondamentales se nomme *dimension* de l'unité (du mot anglais *dimension*). Ainsi, par exemple, l'unité de surface est égale au carré construit sur l'unité de longueur, l'unité de volume est égale au cube construit sur l'unité de longueur; les dimensions respectives de ces unités sont L^2 et L^3 . Nous donnerons les dimensions de chaque unité dérivée en fonction des unités fondamentales du système C. G. S.

Unités dérivées. — Les unités dérivées sont en très grand nombre; pour faciliter leur examen, nous les diviserons en cinq groupes : 1° unités géométriques; 2° unités mécaniques; 3° unités magnétiques; 4° unités électriques; 5° unités diverses autres que celles désignées dans les quatre premiers groupes, et dont on fait un usage constant dans les applications électriques.

1° UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Les unités géométriques sont au nombre de trois : une unité fondamentale, celle de longueur, et deux unités dérivées, l'unité de surface et l'unité de volume. On trouvera dans les tableaux ci-après (pages 31, 32 et 33) les rapports entre les unités géométriques du système C. G. S. et les unités encore en usage dans différents pays.

Unité C. G. S. de longueur. — Nous n'avons pas à répéter ici la définition du *centimètre*, qui est l'unité C. G. S. de longueur; nous donnerons seulement les définitions de l'unité de surface et de l'unité de volume.

Unité C. G. S. de surface. — L'unité C. G. S. de surface est le *centimètre carré*. C'est la surface d'un carré de 1 centimètre de côté. En pratique, on fait usage, suivant les cas, du millimètre carré, du centimètre carré, du mètre carré, de l'are, de l'hectare ou du kilomètre carré. Les dimensions de l'unité de surface sont : $[L^2]$.

Unité C. G. S. de volume. — L'unité C. G. S. de volume est le *centimètre cube*. C'est le volume d'un cube de 1 centimètre de côté. En pratique, on fait usage, suivant les cas, du millimètre cube, du centimètre cube, du décimètre cube ou *litre* et du mètre cube (voy. tableau p. 32). Les dimensions de l'unité de volume sont : $[L^3]$.

Unités de longueur. — Outre les unités de longueur qui figurent sur le tableau de la page 31, on emploie encore quelquefois en *Angleterre* :

fathom = 2 yards.

1 furlong	=	$\frac{1}{8}$ de mile = 220 yards.
1 mil	=	$\frac{1}{1000}$ de pouce = 0,00254 cm.

En France :

Le myriamètre	=	10 000 mètres.
La lieue terrestre	=	4 000 — (peu employée).
Le mille marin ou <i>knot</i>	=	1 852 —

Dans la *marine*, on fait en outre usage des mesures suivantes :

Brasse	=	5 pieds	=	1 ^m ,624
Nœud	=	$\frac{1}{120}$ de mille marin.	=	15 ^m ,436
Encablure nouvelle	=		=	200 ^m ,000

Chacun des nœuds du loch parcouru dans les 30 secondes du sablier ou dans la $\frac{1}{120}$ partie d'une heure correspond à une marche d'un mille marin par heure. Ainsi 9 nœuds filés en 30 secondes indiquent une marche de 9 milles ou de 3 lieues marines par heure.

En *microscopie*, on fait usage du *micron* (au pluriel *micra*), qui vaut $\frac{1}{1\ 000\ 000}$ de mètre.

En *Allemagne*, le système métrique est officiel depuis le 1^{er} janvier 1872.

Le millimètre, s'appelle	Strich.
Le centimètre	Neuzoll.
Le mètre	Stab.
Le décamètre	Kette.

En *Autriche*, le système métrique est obligatoire depuis 1876.

En *Russie*, l'unité est la *sagène* = 2^m,13 356 143. La sagène vaut 3 archines ; 7 pieds ; 48 verschocks ; 84 duimes (ou pouces) ; 840 linia (lignes).
Le *Viersta* (verste) = 500 sagènes = 1066^m, 78.

Unités de surface et de volume. —

En *Allemagne* :

Le mètre carré porte le nom de	Quadratstab,
Le mètre cube	Kubikstab.
L'hectolitre	Fass.
Le litre	Kanne.

En *Angleterre*, le *square-mile* = 2,59 kilomètres carrés.

UNITÉS DE LONGUEUR (FRANCE ET ANGLETERRE)

NOM DE L'UNITÉ.	CENTIMÈTRE	MÈTRE.	KILOMÈTRE.	INCH.	FOOT.	YARD.	STATUTE MILE.	NAUTICAL MILE.
CENTIMÈTRE.	1	0,01	»	0,3937	»	»	»	»
Mètre.	100	1	0,001	39,37	3,281	1,093633	»	»
Kilomètre.	100 000	1000	1	»	3280,899	1093,633	0,62138	0,54
<i> Inch ou pouce.</i>	2,5399	»	»	»	0,0833	0,0278	»	»
<i> Foot ou pied.</i>	30,4797	0,3048	»	12	1	0,3333	»	»
<i> Yard.</i>	91,4392	0,9144	»	36	3	1	»	0,49285
<i> Statute mile</i>	»	1609,31	1,609	»	5280	1760	1	0,867422
<i> Nautical mile, knot ou nœud.</i>	»	1852,30	1,852	»	6087	2029	1,15284	1

UNITÉS DE VOLUME ET DE CAPACITÉ (FRANCE ET ANGLETERRE)

NOM DE L'UNITÉ.	CENTIMÈTRE CUBE.	DÉCIMÈTRE CUBE OU LITRE.	MÈTRE CUBE.	CUBIC-INCH.	CUBIC-FOOT.	CUBIC-YARD.	PINT.	GALLON.
CENTIMÈTRE CUBE.	1	0,001	»	»	»	»	»	»
Décimètre cube ou <i>litre</i>	1 000	1	0,001	61,02705	0,035317	»	1,76077	»
Mètre cube	1 000 000	1000	1	»	35,317	1,3080	1760,77	220,0967
<i>Cubic-inch</i>	16,38618	0,016386	»	1	»	»	0,0291	»
<i>Cubic-foot</i>	»	28,316	»	1728	1	0,0370	»	»
<i>Cubic-yard</i>	»	764,535	0,76453	46656	27	1	»	»
<i>Pint</i>	»	0,56793	»	34,66	»	»	1	0,125
<i>Gallon</i>	»	4,54346	»	277,274	6,232106	»	8	1

UNITÉS DE SURFACE

NOM DE L'UNITÉ.	CENTIMÈTRE CARRÉ.	MÈTRE CARRÉ.	SQUARE-INCH.	SQUARE-FOOT.
CENTIMÈTRE CARRÉ	1	0,0001	0,15501	107 642,99
Mètre carré	10 000	1	»	10,764
Square-inch	6,4516	»	1	»
Square-foot	929,01	0,0929	144	1

En Angleterre, on emploie aussi :

1 yard carré = 8361,13 centimètres carrés.

2° UNITÉS MÉCANIQUES

Les unités mécaniques se rapportent à la vitesse, à l'accélération, à la force et au travail. En voici les définitions :

Unité de vitesse. — L'unité C. G. S. de vitesse est celle d'un corps se mouvant en ligne droite et d'un mouvement uniforme, et parcourant un centimètre en une seconde. Ses dimensions sont $\left[\frac{L}{T}\right]$ ou $[LT^{-1}]$. En pratique, la vitesse s'exprime, suivant les cas, en mètres par seconde, en mètres par minute ou en kilomètres par heure.

Unité d'accélération. — L'unité C. G. S. d'accélération est celle d'un corps dont la vitesse augmente de 1 centimètre par seconde. L'accélération d'un corps tombant librement dans le vide sous l'action de la pesanteur se désigne par g . Sa valeur varie avec la latitude du lieu et la hauteur du point au-dessus du niveau de la mer.

La relation entre la valeur de g et la longueur l du pendule simple battant la seconde est : $g = \pi^2 l$. Le tableau de la page 34 donne les valeurs de l et g (en centimètres) pour les points les plus importants du globe. La différence entre la plus grande et la plus petite valeur de g est de $\frac{1}{196}$ de la valeur moyenne. Dans tous les tableaux qui vont suivre, nous avons adopté $g = 981$ centimètres.

Les dimensions de l'accélération sont : $\left[\frac{L}{T^2}\right]$ ou $[LT^{-2}]$.

VALEURS DE L'ACCÉLÉRATION ET DE LA LONGUEUR DU PENDULE (*Everett*)

	LATITUDE.	VALEUR DE g .	VALEUR DE l .
Équateur	0°, 0'	978, 10	99, 103
Latitude 45°	45, 0	980, 61	99, 356
Munich	48, 9	980, 88	99, 384
Paris	48, 50	980, 94	99, 390
Greenwich.	51, 29	981, 17	99, 413
Göttingen	51, 32	981, 17	99, 414
Berlin.	52, 30	981, 25	99, 422
Dublin	53, 21	981, 32	99, 429
Manchester.	53, 29	981, 34	99, 430
Belfast	54, 36	981, 43	99, 440
Edimbourg	55, 37	981, 54	99, 451
Aberdeen	57, 9	981, 64	99, 466
Pôle.	90, 0	983, 11	99, 610

Unité de force. — L'unité C. G. S. de force porte le nom de *dyne*. C'est la force qui, agissant sur la masse de 1 gramme pendant une seconde, lui imprime une vitesse de 1 centimètre par seconde. Les dimensions de l'unité de force sont : $\left[\frac{ML}{T^2}\right]$ ou $[MLT^{-2}]$.

L'unité C. G. S. de force ou *dyne*, indispensable pour l'établissement des unités électriques, n'est pas encore employée en pratique, où les forces sont exprimées en fonction des *poids*. Il importe donc d'établir la relation qui lie l'unité C. G. S. de force ou *dyne* à l'unité pratique ou *poids du gramme*.

Lorsqu'un corps tombe dans le vide, la pesanteur lui imprime au bout d'une seconde une vitesse égale à g centimètres par seconde. En vertu de la proportionnalité des forces aux accélérations, la force qui agit sur l'unité de masse est donc de g dynes.

La force qui agit sur la masse du gramme, c'est-à-dire le poids du gramme, étant de g dynes, la dyne vaut par conséquent $\frac{1}{g}$ gramme. En adoptant comme valeur de g le nombre 981, qui correspond aux latitudes moyennes (50° environ), le poids du gramme = 981 dynes, et la dyne égale $\frac{1}{981}$ du gramme.

Le *poids du gramme* varie avec la latitude, tandis que la masse du gramme est une quantité *constante*. C'est cette considération qui a dicté le choix de la masse du gramme comme unité fondamentale.

Unité de poids. — L'unité pratique de poids est le poids du gramme, force nécessaire pour soutenir dans le vide 1 centimètre cube d'eau distillée à la température de 4° C. Le tableau ci-contre montre la relation entre les différentes unités de force et de poids employées en France et en Angleterre pour $g = 981$.

En France on emploie encore quelquefois :

Le <i>carat</i> (pour le diamant)	=	205,5 milligrammes.
La <i>livre</i>	=	500 grammes.
La <i>tonne</i> ou <i>tonneau</i>	=	1000 kilogrammes.

En *Allemagne*, l'unité de poids est le kilog. = 2 livres (2 *pfunds*); le décagramme s'appelle *neuloth*; 50 kilog., *centner*; le demi-kilog., *pfund*; 1000 kilog., *tonne*.

En *Russie*, l'unité est la livre du commerce (*founte*) = 409^{gr},511 663; elle contient 16 onces, 32 loths, 96 zolotnicks et 9216 dolis.

Poude = 40 livres.

Berkowetz = 10 poudes = 400 livres.

Tonneau de mer = 6 berkowetz = 982^{kgr},5.

Unité de travail ou d'énergie. — L'unité C. G. S. de travail porte le nom de *erg*. C'est le travail produit par une force d'une dyne agissant sur une distance de 1 centimètre. On pourrait la nommer le *centimètre-dyne*. Son emploi n'a pas encore prévalu en pratique, où l'on fait usage de *centimètres-grammes*, *grammètres* et *kilogrammètres*.

Le *kilogrammètre* est le travail produit par un poids de 1 kilogramme tombant de 1 mètre de hauteur.

Les dimensions de l'unité de travail sont : $\left[\frac{ML^2}{T^2} \right]$ ou $[ML^2T^{-2}]$.

Le tableau ci-contre (page 37) indique les relations entre les différentes unités de travail usitées dans la pratique. On fait aussi quelquefois usage en balistique de la *tonne-mètre*, qui vaut 1000 kilogrammètres.

Cheval-vapeur. — Unité industrielle de *puissance*, mesure du travail produit ou dépensé par les machines par unité de temps. Il vaut 75 kilogrammètres par seconde. Lorsqu'une machine produit 750 kilogrammètres par seconde, on dit qu'elle a une puissance de 10 chevaux-vapeur.

Horse-power. — Unité anglaise analogue au cheval-vapeur français. Le horse-power vaut 550 foot-pou nds par seconde, 33 000 par minute, 1 980 000 par heure.

UNITÉS DE POIDS ET UNITÉS DE FORCE ($g = 981 \text{ cm.}$)

NOM DE L'UNITÉ.	MILLI-GRAMME.	GRAMME.	KILO-GRAMME.	DYNE.	MÉGADYNE.	GRAIN.	ONCE (avoir du-pois)	POUND (avoir du-pois).
<i>Mesures françaises.</i>								
Milligramme	1	0,001	»	0,981	»	»	»	»
GRAMME	1 000	1	0,001	981	»	15,43235	»	»
Kilogramme	1 000 000	1000	1	981000	0,981	15432,35	»	2,2046212
<i>Mesures absolues C.G.S.</i>								
DYNE (unité C. G. S.)	1,01937	»	»	1	»	0,0310666	»	»
Mégadyne	1 019 370	1019,37	1,01937	1 000 000	1	»	»	»
<i>Mesures anglaises</i>								
Grain (troy)	64,799	0,06480	»	63,57	»	1	»	0,000142857
Once (avoir du-pois)	»	28,3495	»	27 800	»	437,31	1	9,0625
Pound (avoir du-pois) ou (lbs)	»	453,59	0,45359	445 000	»	7000	16	1
Cwt. (hundredweights) (quintal)	»	50802	50,80238	»	49,8	»	1792	112
Ton	»	»	1016,05	»	997	»	35840	2240

UNITÉS DE TRAVAIL ($g = 981 \text{ cm.}$)

NOM DE L'UNITÉ.	GRAMME-CENTIMÈTRE.	GRAMMÈTRE.	KILO-GRAMMÈTRE.	ERG.	MEG-ERG.	FOOT-GRAIN.	FOOT-POUND	FOOT-TON.
Gramme-centimètre . . .	1	0,01	»	981	»	»	»	»
Grammètre	100	1	0,001	98 100	0,0981	»	0,0 723	»
Kilogrammètre	100 000	1000	1	»	98,1	»	7,2331	0,00325
ERG.	0,00109	»	»	1	0,000001	»	»	»
Meg-erg.	1093,67	10,9367	0,0109	1 000 000	1	»	»	»
Foot-grain	1,975	»	»	1 937	»	1	»	»
Foot-pound.	»	138	0,138	»	13,56	7000	1	»
Foot-ton	»	»	309	»	30400	»	2240	1

Voici les valeurs respectives du cheval-vapeur français et du horse-power anglais.

1 cheval-vapeur	=	75 kilogrammètres par seconde.
—	=	7360 meg-ergs par seconde.
—	=	0,9863 horse-power.
1 horse-power	=	75,9 kilogrammètres par seconde.
—	=	7460 meg-ergs par seconde.
—	=	550 <i>foot-pounds</i> par seconde.
—	=	1,0139 cheval-vapeur.

Watt ou Volt-Ampère. — Unité proposée à l'Association britannique en 1882 par sir W. Siemens. Elle sert à mesurer la puissance de production ou de débit d'un appareil électrique, en prenant le volt comme unité de f. é. m., et l'ampère comme unité d'intensité

1 watt	=	$\frac{1}{9,81}$ kilogrammètre par seconde.
1 horse-power	=	746 watts.
1 cheval-vapeur	=	736 watts.

Joule ou Volt-Coulomb. — Unité d'énergie électrique égale au travail produit par une quantité d'électricité égale à un coulomb avec un potentiel de un volt.

Cheval-heure. — Unité employée pour exprimer l'énergie fournie par une source électrique quelconque; sa valeur est :

$$75 \times 3600 = 270\,000 \text{ kgm.}$$

ANCIENNES MESURES FRANÇAISES

LONGUEURS

1 toise	=	6 pieds	=	1,94904 mètre.
1 pied	=	12 pouces	=	0,32484 —
1 pouce	=	12 lignes	=	0,02707 —
1 ligne	=	12 points	=	0,00256 —

SUPERFICIES

1 toise carrée	=	3,7987 mètres carrés.
1 pied carré	=	0,1055 —
1 pouce carré	=	7,3278 centimètres carrés.

VOLUMES

1 toise cube	=	7,4039 mètres cubes.
1 pied cube	=	0,03428 —
1 pouce cube	=	19,8365 centimètres cubes.

POIDS

1 livre . . .	=	16 onces. . .	=	0,48951 kilogramme.
1 marc . . .	=	8 onces. . .	=	0,244753 —
1 once . . .	=	8 gros . . .	=	30,590 grammes.
1 gros . . .	=	72 grains. . .	=	3,820 —
1 grain.	=		=	0,053 —

3° UNITÉS MAGNÉTIQUES

Ces unités ne sont pas encore très employées dans la pratique; elles ont surtout pour but de servir de liaison entre les unités géométriques et mécaniques et les unités électro-magnétiques, que nous définirons un peu plus loin.

Unité de pôle magnétique. — Le pôle magnétique dont l'intensité est égale à une unité C. G. S. est celui qui repousse un pôle semblable placé à un centimètre de distance avec une force égale à une dyne. Elle ne porte pas de nom spécial. Ses dimensions sont : $[M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-1}]$.

Unité d'intensité d'un champ magnétique. — L'intensité d'un champ magnétique se mesure par la force qu'il exerce sur un pôle magnétique d'une unité d'intensité. L'intensité d'un champ magnétique est égale à une unité C. G. S. lorsque, dans ce champ, la force qui agit sur une unité de pôle magnétique est égale à une dyne. Ses dimensions sont : $[M^{\frac{1}{2}}L^{-\frac{1}{2}}T^{-1}]$.

UNITÉS ÉLECTRIQUES

Il a existé jusqu'ici deux systèmes d'unités électriques dérivés des unités fondamentales C. G. S.; le premier, nommé système *électrostatique*, basé sur les forces exercées entre deux quantités d'électricité; le second, nommé *électro-magnétique*, basé sur les forces exercées entre deux pôles magnétiques. Le premier n'a qu'un intérêt purement scientifique, tandis que le second a servi de base aux unités électriques établies par l'Association britannique et adoptées par le Congrès international des Électriciens tenu à Paris en septembre 1881. C'est celui adopté dans ce formulaire.

4° UNITÉS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

Unités C. G. S. — Unités pratiques. — Les unités électro-magnétiques du système C. G. S. sont au nombre de *cinq*. Elles se déduisent des unités fondamentales géométriques, mécaniques et magnétiques par des définitions que nous allons faire connaître; mais comme leur emploi conduirait à faire usage de nombres trop grands ou trop petits, on a adopté, *dans la pratique*, des unités, qui sont des multiples ou des sous-multiples décimaux des unités C. G. S., et, pour éviter toute confu-

sion, on a donné à ces unités pratiques des noms spéciaux qui les distinguent des unités C. G. S.

Le tableau ci-dessous montre les relations entre les unités C. G. S. et les unités pratiques correspondantes, le symbole qui les représente et les dimensions de chaque unité en fonction des unités fondamentales.

TABLEAU DES UNITÉS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES

NATURE DES QUANTITÉS A MESURER.	SYMBOLE.	NOM DE L'UNITÉ PRATIQUE.	NOMBRE D'UNITÉS C.G.S RENFERMÉES DANS L'UNITÉ PRATIQUE.	DIMENSIONS DE L'UNITÉ.
Résistance	R	<i>Ohm.</i>	10^9	LT^{-1}
Force électromotrice . .	E	<i>Volt.</i>	10^8	$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{5}{2}}T^{-2}$
Intensité.	I	<i>Ampère.</i>	10^{-1}	$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}T^{-1}$
Quantité	Q	<i>Coulomb.</i>	10^{-1}	$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}$
Capacité	C	<i>Farad.</i>	10^{-9}	$L^{-1}T^2$

Avant de donner les valeurs relatives des différentes unités électriques employées par les électriciens, nous allons définir les unités C. G. S. dont nous ferons usage, ainsi que les unités pratiques qui en ont été déduites.

Unité d'intensité. — Un courant a une intensité égale à une unité C. G. S. lorsque, traversant un circuit de un centimètre de longueur roulé en forme d'arc de un centimètre de rayon, il exerce une force de une dyne sur un pôle magnétique d'une unité d'intensité placé à son centre.

L'unité pratique d'intensité porte le nom d'*Ampère* et est égale à 10^{-1} unités C. G. S. (c'est l'ancien *weber par seconde* anglais).

Unité de quantité. — L'unité C. G. S. de quantité est la quantité d'électricité qui traverse un circuit pendant une seconde lorsque l'intensité du courant est égale à une unité C. G. S.

L'unité pratique de quantité porte le nom de *Coulomb* et est égale à 10^{-1} unités C. G. S. (C'est l'ancien *weber* anglais.)

Unité de force électromotrice. — Lorsqu'une certaine quantité Q d'électricité traverse un conducteur sous l'influence d'une force électromotrice E , le travail produit est égal au produit QE .

Cela posé, l'unité C. G. S. de force électromotrice est celle qui est nécessaire pour que l'unité de quantité développe une unité C. G. S. de travail ou un erg. L'unité pratique de force électromotrice porte le nom de *Volt* : elle vaut 10^8 unités C. G. S.

Unité de résistance. — Un conducteur a une résistance égale à une unité C. G. S. lorsqu'une force électromotrice¹ d'une unité C. G. S. entre ses deux extrémités fait circuler dans ce conducteur un courant d'une unité C. G. S. d'intensité.

L'unité pratique de résistance porte le nom de *Ohm* : elle vaut 10^9 unités C. G. S.

La loi de Ohm : $I = \frac{E}{R}$ établit entre les trois unités pratiques d'intensité de force électromotrice et de résistance une relation qui peut s'écrire :

$$1 \text{ ampère} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ohm}}$$

Unité de capacité. — Un condensateur a une capacité égale à une unité C. G. S. lorsque, chargé au potentiel d'une unité C. G. S., il renferme une quantité d'électricité égale à une unité C. G. S. L'unité pratique de capacité se nomme *Farad* : elle vaut 10^{-9} unités C. G. S. Comme le farad est encore une quantité trop grande pour les besoins de la pratique, on ne fait usage en réalité que du *microfarad*, dont la valeur est égale à 10^{-15} unités C. G. S., ou à 10^{-6} farad. Un condensateur de un microfarad, chargé au potentiel de un volt, renferme une quantité d'électricité égale à un microcoulomb.

Avant les travaux de l'Association britannique et la sanction qui leur a été donnée par le Congrès international des Électriciens, sanction qui aura pour résultat de rendre bientôt universel l'emploi des unités pratiques que nous venons de définir, plusieurs physiciens, s'appuyant sur des considérations arbitraires moins coordonnées que celles de l'Association britannique, ont employé certaines unités dont l'usage tend à disparaître, mais qu'on retrouve encore souvent dans plusieurs traités et mémoires originaux. Nous résumerons ici, sous forme de tableaux synoptiques, les plus importantes de ces unités, en donnant pour chacune d'elles leurs valeurs en fonction des unités du Congrès de 1881.

COMPARAISON DES UNITÉS ÉLECTRIQUES EMPLOYÉES PAR DIFFÉRENTS PHYSICIENS

Unités de résistance. — Nous avons dit que l'unité pratique adoptée par le Congrès était égale à 10^9 unités C. G. S. et portait le nom

¹ Ou, plus exactement, une différence de potentiel.

de *Ohm*. C'est là sa valeur théorique. En pratique, l'ohm est représenté par des étalons construits par l'Association britannique en 1864, et dont la valeur est voisine de 10^9 unités C. G. S.

De nombreuses vérifications de l'étalon établi par l'Association britannique ont montré que la différence entre la valeur réelle de l'étalon et sa valeur théorique est d'environ $1 \frac{0}{10}$.

Pour obtenir la valeur de l'ohm avec plus d'exactitude, le Congrès a décidé que l'unité pratique de résistance sera représentée par une colonne de mercure de un millimètre carré de section à la température de 0° C. et qu'une commission internationale serait chargée de déterminer, pour la pratique, la longueur de cette colonne de mercure.

Le 3 mai 1884, la Conférence internationale pour la détermination des unités électriques a décidé que :

L'*ohm légal* est représenté par une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 106 centimètres de longueur à la température de la glace fondante.

L'*ampère* est égal à 10^{-1} unités électro-magnétiques C. G. S. d'intensité.

Le *volt* est la force électromotrice qui soutient un courant d'un ampère dans une résistance égale à l'ohm légal.

Il résulte de ces décisions que :

$$1 \text{ ohm légal} = 1,0112 \text{ ohm B. A.}$$

$$1 \text{ ohm B. A.} = 0,9889 \text{ ohm légal.}$$

Les résistances exprimées en ohm B. A. peuvent se réduire en ohms légaux en les multipliant par 0,9889; les constructeurs qui possèdent un étalon B. A. peuvent établir un ohm légal en faisant une bobine égale à 1,0112 fois l'ohm B. A.

Les seules unités encore employées quelquefois aujourd'hui sont l'*Unité Siemens* et le *kilomètre* de fil télégraphique.

L'*unité Siemens* est représentée par la résistance d'une colonne de mercure de un mètre de longueur et de un millimètre carré de section à 0° C. Nous venons de voir sa valeur d'après les dernières déterminations faites.

Le *kilomètre*, unité abandonnée aujourd'hui, représente la résistance d'un fil de fer de 4 millimètres de diamètre et de un kilomètre de longueur, à une température inconnue. Le kilomètre valait environ 16 ohms.

Unités de force électromotrice. — Il n'existe pas d'étalon de force électromotrice donnant exactement un volt. Les expérimentateurs expriment souvent les forces électromotrices en prenant pour étalon la pile dont ils font usage. Parmi ces étalons, les plus employés sont ;

L'élément *Daniell* qui, établi dans certaines conditions, a une force électromotrice de 1,079 volt.

L'élément *Bunsen*, ne peut servir que pour des approximations.

L'élément *Latimer-Clark*, très constant lorsqu'il est en circuit ouvert et dont la force électromotrice est de 1,457 volt.

L'unité thermo-électrique de Gaugain, représentée par le symbole $\frac{\text{Bi} - \text{Cu}}{0^{\circ} - 100^{\circ}}$; c'est la force électromotrice d'un élément thermo-électrique bismuth-cuivre dont les soudures sont maintenues aux températures 0° et 100° . Elle n'est plus employée aujourd'hui; sa valeur est d'ailleurs très petite, $\frac{1}{197}$ de Daniell ou $\frac{1}{482,6}$ de volt.

Unités d'intensité. — La plupart des unités pratiques d'intensité sont fondées sur des actions électrolytiques. Voici celles qui ont été le plus employées jusqu'à ce jour :

Unité de Jacobi. — Un courant continu et constant produisant dans un voltamètre 1 centimètre cube de gaz mélangés par minute à la température de 0° C. et à la pression de 760 millimètres, a une intensité de un Jacobi.

Unité $\frac{\text{Daniell}}{\text{Unité Siemens}}$, désignée en Allemagne par le symbole $\frac{\text{Daniell}}{\text{U. S.}}$.

C'est l'intensité d'un courant produit par un élément Daniell sur une résistance totale d'une unité Siemens. Ce courant dépose 1^{er},38 de cuivre par heure.

Courant atomique. — Unité employée en Allemagne. Intensité d'un courant qui, traversant un voltamètre pendant 24 heures ou 86 400 secondes, dégagerait 1 gramme d'hydrogène. En télégraphie on a fait usage du *milli-atome*, de grandeur comparable au milli-ampère, mais le milli-ampère tend aujourd'hui à se substituer partout au milli-atome.

TABLEAU DES UNITÉS D'INTENSITÉ

NOM DE L'UNITÉ.	AMPÈRE.	JACOBI.	$\frac{\text{DANIELL}}{\text{U.S.}}$	COURANT ATOMIQUE.
Ampère	1	10,32	0,862	0,90009
Jacobi	0,0961	1	»	»
$\left(\frac{\text{Daniell}}{\text{U.S.}}\right)$	1,16	»	1	»
Courant atomique . .	1,111	11,5	»	1

Unités diverses. — On trouve souvent, dans les mémoires, l'intensité des courants exprimée par un poids ou un volume de gaz déterminé dégagé pendant un temps donné. Il est facile de réduire ces intensités en ampères en se rappelant qu'un courant d'un ampère dégage par seconde 0,172 centimètre cube de gaz mélangés à 0° et à la pression 760. Le poids d'eau décomposée est de 92¹ microgrammes; le poids d'hydrogène produit est de 10,4 microgrammes; et le poids d'oxygène de 81,6 microgrammes.

Unité de quantité. — La seule unité de quantité dont on fasse aujourd'hui usage est le *coulomb*. C'est la quantité d'électricité qui traverse un circuit pendant une seconde lorsque l'intensité du courant est de un ampère.

On exprime cependant encore quelquefois une quantité d'électricité en fonction du poids de métal déposé par un courant dans une cuve électrolytique ou par le volume de gaz dégagés dans un voltamètre. Le tableau des équivalents électro-chimiques (voy. 4^e partie) permet de réduire en *coulombs* les quantités d'électricité exprimées en poids de métal déposé.

Lorsque les quantités d'électricité sont exprimées en volume de gaz, la réduction en coulombs se fait en se rappelant que un coulomb d'électricité traversant un voltamètre produit 0,172 centimètre cube de gaz mélangés; à la température de 0° et à la pression de 760, le poids d'eau décomposé par un coulomb est de 92 microgrammes et le poids d'hydrogène produit de 10,4 microgrammes.

Ampère-heure. — Quantité d'électricité qui traverse un circuit pendant une heure lorsque l'intensité du courant est de 1 ampère.

$$1 \text{ ampère-heure} = 3600 \text{ coulombs.}$$

Unité de capacité. — La seule unité employée pour les condensateurs et les câbles sous-marins est le *microfarad*, défini comme nous l'avons vu page 41.

UNITÉS ÉLECTROSTATIQUES

Bien que les unités électrostatiques ne soient employées que très rarement dans les applications, nous croyons utile d'en donner les définitions.

Unité électrostatique de quantité. — L'unité de quantité est celle qui, placée à une distance de 1 centimètre d'une quantité sem-

¹ Certains auteurs donnent le chiffre de 93,78 microgrammes.

blable et égale, la repousse avec une force égale à *une dyne*. Dimensions : $[M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{5}{2}}T^{-1}]$.

Unité électrostatique de différence de potentiel. — La différence de potentiel entre deux points est de une unité lorsqu'il faut dépenser une unité de travail ou un *erg* pour faire passer une quantité d'électricité égale à une unité d'un point à l'autre. Dimensions : $[M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}T^{-1}]$.

Unité de capacité électrostatique. — La capacité d'un conducteur est d'une unité lorsqu'une unité de quantité d'électricité élève son potentiel d'une unité. Dimensions : $[L]$. Une sphère de 1 centimètre de rayon a une capacité égale à une unité C. G. S. électrostatique. Les capacités des sphères sont proportionnelles à leurs rayons.

Rapport des unités électrostatiques et électro-magnétiques. — Le rapport entre l'unité électrostatique de quantité et l'unité électro-magnétique de quantité a pour dimensions $[\frac{L}{T}]$. Cette expression est équivalente à une vitesse et se désigne par la lettre *v*. La valeur numérique de *v* varie entre $2,825 \times 10^{10}$ et $3,1074 \times 10^{10}$ centimètres. La valeur aujourd'hui adoptée est celle donnée par MM. Ayrton et Perry :

$$v = 2,98 \times 10^{10} \text{ cm.}$$

Ce chiffre est le même que celui trouvé pour la vitesse de la lumière.

5° UNITÉS DIVERSES

Sous ce titre général, nous indiquerons les 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, sont cependant acceptées par les savants d'une manière presque universelle, et sont même, dans une certaine mesure, directement dérivées du système C. G. S.

Unités de pression. — L'unité de pression, dans le système C. G. S., serait égale à l'unité de force s'exerçant sur l'unité de surface, c'est-à-dire égale à *une dyne par centimètre carré*. Elle n'a qu'une valeur théorique sans emploi pratique¹.

En FRANCE, on compte en *atmosphères* et en *kilogrammes par centimètre carré*. L'*atmosphère* ou *pression atmosphérique* est égale à la

¹ Quelques physiciens anglais l'emploient cependant dans les recherches scientifiques (voy. Everett, *Units and physical constants*).

pression exercée par une colonne de mercure de 760 millimètres de hauteur à 0°, ou à une colonne d'eau de 10^m,33.

Le *kilogramme par centimètre carré* est une pression égale, comme son nom l'indique, à 1 kilog. par cent. carré. Elle équivaut à une colonne d'eau de 10 mètres de hauteur. Ces deux unités sont assez voisines, et on peut souvent les confondre sans erreur grossière.

EN ANGLETERRE on fait usage du *pound per square-foot* (pression d'une livre anglaise par pied carré anglais) et du *pound per square-yard* (pression d'une livre sur un yard carré). Le tableau de la page 48 indique les relations de ces différentes unités entre elles.

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° celui 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 est le degré 32 et l'eau bouillante donne le degré 212.

Le tableau ci-dessous indique le rapport des degrés de chacune des trois graduations.

RAPPORT DES DEGRÉS THERMOMÉTRIQUES

ÉCHELLE THERMOMÉTRIQUE.	CENTIGRADE.	RÉAUMUR.	FAHRENHEIT.
Centigrade ou Celsius	1	0,80	1,80
Réaumur	1,25	1	2,25
Fahrenheit	0,55556	0,4444	1

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.

Unités de chaleur. — L'unité pratique de chaleur employée est

FRANCE prend le nom de *calorie*; c'est la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer de 1° C. un kilogramme d'eau.

L'unité de chaleur théorique 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. un gramme d'eau.

Malheureusement, ils lui donnent aussi le nom de *calorie*, parce qu'elle dérive plus directement du système C. G. S. par le choix du gramme comme unité de masse.

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*.

EN ANGLETERRE, on fait usage du *Pound-degré-centigrade*, et du *Pound-degré-Fahrenheit* ou *thermal unit*.

Le *Pound-degré-centigrade* est une unité bâtarde basée à la fois sur la livre anglaise et sur le degré centigrade. Son nom la définit suffisamment.

Le *Pound-degré-Fahrenheit* ou *thermal unit* est la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer de 1° Fahrenheit une livre anglaise d'eau.

Le tableau de la page 49 indique les rapports de ces unités entre elles.

Équivalent mécanique de la chaleur. — Le chiffre ordinairement adopté pour l'équivalent mécanique de la chaleur est le suivant :

$$1 \text{ calorie (kg.-d.)} = 424 \text{ kgm.}$$

Lorsqu'on considère l'énergie sous ses différentes formes, travail, chaleur ou électricité, on l'exprime, suivant les cas, en unités de travail ou en unités de chaleur.

Le tableau de la page 49 donne la valeur des rapports entre les différentes unités d'énergie ordinairement employées, calorie, meg-erg et kilogrammètre.

UNITÉS PHOTOMÉTRIQUES

FRANCE. — L'unité est le *bec Carcel*, lampe brûlant 42 grammes d'huile de colza épurée à l'heure avec une flamme de 40 millimètres, dans les conditions établies par MM. J.-B. Dumas et Regnault pour la vérification du pouvoir éclairant du gaz à Paris.

ANGLETERRE. — L'unité est la *candle* ou *Parliamentary Standard*, bougie de spermaceti (blanc de baleine) de $\frac{7}{8}$ de pouce de diamètre brûlant

UNITÉS DE PRESSION ($g = 981 \text{ cm.}$)

NOM DE L'UNITÉ.	ATMOSPHÈRE.	KILOGRAMME PAR MÈTRE CARRÉ.	KILOGRAMME PAR CENTIMÈTRE CARRÉ.	DYNE PAR CENTIMÈTRE CARRÉ.	POUND PER SQUARE-FOOT.	POUND PER SQUARE-INCH.
Atmosphère (76° de mercure à 0°).	1	10 330	1,033	1 014 000	2 118	14,67
Kilogramme par mètre carré . . .	»	1	0,0001	98,1	0,205	»
Kilogramme par centimètre carré.	0,968	10 000	1	981 000	2 050	14,2
DYNE PAR CENTIMÈTRE CARRÉ . . .	»	»	»	1	0,00211	»
<i>Pound per square-foot</i>	0,00047	4,88697	»	479	1	0,0067
<i>Pound per square-inch</i>	0,0681	703,876	0,0704	69 000	144	1

Pression de 30 pouces anglais de mercure à 0° C. = 1 016 300 dynes par centimètre carré.

Pression de 1 pouce anglais de mercure à 0° C. = 33 880 —

NOM DE L'UNITÉ.	CALORIE (g.-d. C.).	CALORIE (kg.-d. C.)	MEG-ERG.	KILO- GRAMMÈTRE.	POUND- DEGRÉ C.	POUND-DEGRÉ FAHRENHEIT.
CALORIE (g.-d. C.)	1	0,001	41,6	0,424	0,0022	0,004
Calorie (kg.-d. C.)	1000	1	41 600	424	2,2056	3,968
MEG-ERG.	0,00243	»	1	0,0102	»	»
Kilogrammètre.	2,358	0,00236	98,1	1	0,00515	0,00926
Pound-degré C.	»	0,4545	19 100	194	1	0,5556
Pound-degré Fahrenheit (<i>Thermal unit.</i>)	»	0,252	10 600	108	1,8	1
<p>1 pound-degré Centigrade = 1390 <i>foot-pounds.</i></p> <p>1 pound-degré Fahrenheit. = 772 —</p> <p>1 volt-coulomb ou <i>joule</i> = 10 meg-ergs. = 0,102 kilogrammètre.</p>						

420 grains par heure. (Les variations de cet étalon atteignent quelquefois 30 pour 100.)

1 bec Carcel. = 9,5 candles.

ALLEMAGNE. — L'étalon est une bougie de paraffine de 20 millimètres de diamètre brûlant avec une flamme de 5 centimètres de hauteur.

1 bec Carcel. = 7,6 bougies allemandes.

UNITÉ DE LA CONFÉRENCE INTERNATIONALE (Décision du 3 mai 1884). — L'unité de chaque lumière simple est la quantité de lumière de même espèce émise normalement par un centimètre carré de platine à la température de solidification.

L'unité pratique de lumière blanche est la lumière totale émise par 1 centimètre carré de platine à la température de solidification.

TABLEAU COMPARATIF DES DIFFÉRENTES UNITÉS DE LUMIÈRE

	ÉTALON DE M. VIOLLE.	BEC CARCEL.	BOUGIE DE STÉARINE.	CANDLE ANGLAISE.	KERZEN CANDLE ALLEMANDE.
Étalon de M. Violle.	1	2,080	13,520	15,392	15,808
Bec Carcel.	0,481	1	6,500	7,400	7,600
Bougie de stearine.	0,074	0,154	1	1,139	1,169
Candle anglaise. . .	0,065	0,135	0,879	1	1,027
Kerzen candle alle- mande.	0,063	0,132	0,855	0,974	1

TROISIÈME PARTIE

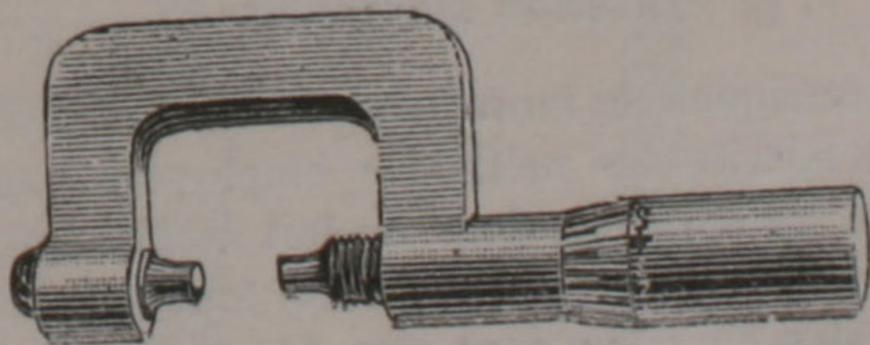
APPAREILS ET MÉTHODES DE MESURE

Les applications de l'électricité sont si variées qu'un formulaire de l'électricien devrait comprendre tous les appareils et toutes les méthodes de mesure des quantités géométriques, mécaniques et physiques. Dans ces conditions, ce formulaire deviendrait un traité général qui dépasserait de beaucoup le cadre que nous nous sommes tracé. Aussi nous contenterons-nous d'indiquer rapidement les méthodes et les appareils qui n'intéressent l'électricien que d'une manière *indirecte*, réservant la plus grande place aux méthodes et aux applications dont il fait un usage *direct*. Nous suivrons ici le même ordre que dans l'exposé des unités de mesure.

MESURES GÉOMÉTRIQUES

Les mesures géométriques qui intéressent l'électricien sont de même nature que celles dont tous les ingénieurs ont besoin en général. Dans la quatrième partie de cet ouvrage nous donnons quelques formules usuelles relatives à la mesure des surfaces et des volumes, ainsi que quelques nombres dont on fait un usage constant. Nous n'aurons à décrire ici, en ce qui regarde les mesures géométriques spéciales aux électriciens, qu'un petit appareil destiné à la mesure du diamètre des conducteurs électriques.

Palmer. — Cet appareil est une petite vis micrométrique d'un usage



Palmer.

très commode, qui permet d'apprécier facilement le diamètre d'un fil en

centièmes de millimètre avec une très grande exactitude. Les modèles les plus perfectionnés portent une tête mobile qui tourne folle dès que la pression exercée par la vis atteint une certaine valeur. On est sûr ainsi de ne pas écraser le fil ou la plaque dont on mesure le diamètre ou l'épaisseur.

On fait aussi quelquefois usage de jauges rondes, portant une série de crans numérotés, mais comme ces jauges n'indiquent que le *numéro* du fil et non pas son diamètre, leur emploi tend à disparaître.

MESURES MÉCANIQUES

Ces mesures se rapportent à la vitesse, à la force et au travail.

Mesure des vitesses. — L'électricien n'a le plus souvent qu'à mesurer des vitesses de *rotation*. On fait alors usage de *compteurs de tours* (Sainte, Dechiens, etc.) qui font connaître le nombre moyen de tours effectués par une machine dans un temps donné, ou d'indicateurs de vitesse (tachymètre de Buss, showspeed de M. Murdoch Napier, indicateur de vitesse de M. Marcel Deprez, etc.), qui font connaître directement la vitesse à un instant donné. La vitesse linéaire v d'un point situé à une distance r de l'axe, en mètres par seconde, est donnée par la formule :

$$v = \frac{2\pi rn}{60}$$

n nombre de tours par minute.

Mesure des forces. — Se fait soit en comparant la force à mesurer à des poids, soit à l'aide de dynamomètre de traction, soit en mesurant une pression exercée sur une surface.

Mesure du travail. — Le travail étant une des formes de l'énergie, nous indiquerons quelques-unes des méthodes employées pour le mesurer à propos de la mesure de l'énergie.

MESURES ÉLECTRIQUES

Les quantités électriques se mesurent par voie *directe* ou par voie *indirecte*. Avant de décrire les méthodes employées dans ces mesures, il convient de décrire les appareils dont on fait usage. Une fois les appareils décrits, le choix des méthodes se trouvera tout indiqué, puisque le plus souvent ces méthodes ne dépendent que des appareils dont on dispose et de la précision qu'on veut obtenir.

C'est ainsi que nous passerons successivement en revue les bobines et boîtes de résistance, les étalons de force électromotrice, les galvanomètres,

les électromètres, les mesureurs d'énergie et les appareils accessoires en usage dans les mesures électriques.

BOBINES ET BOITES DE RÉSISTANCE

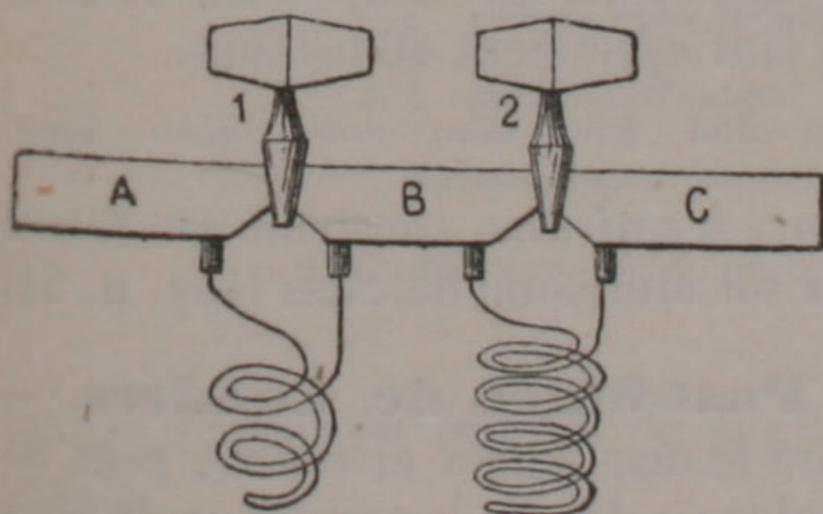
Les conditions que doit présenter une bonne boîte de résistance sont les suivantes : exactitude dans l'ajustement, peu de sensibilité aux variations de température, fixité dans la résistance sous l'action du passage du courant ou d'autres actions physiques.

Les bobines qui composent les boîtes sont, en règle générale, en fil d'*argent allemand*, recouvert d'une double couche de soie : le fil est roulé en double, pour éviter les effets d'induction, 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.

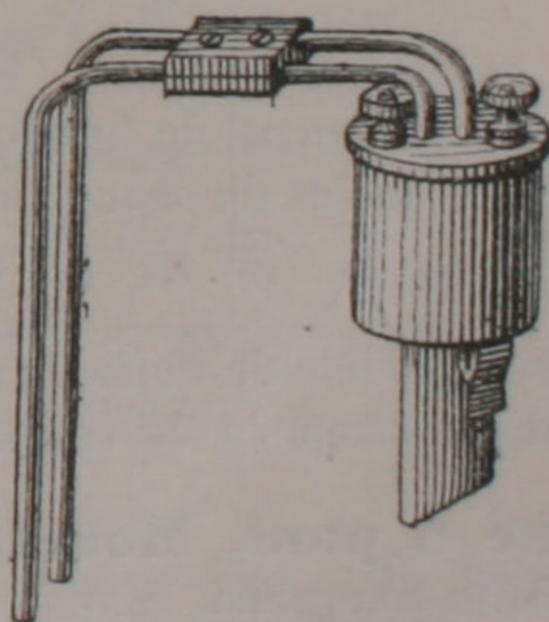
La *grosueur* du fil qui les compose n'a aucune importance spéciale, elle dépend seulement de la nature des courants qui doivent traverser les bobines, qui ne doivent chauffer dans aucun cas. L'ajustement de la bobine est d'autant plus facile que le fil est plus gros.

La résistance 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 fait varier la résistance. La composition moyenne de l'*argent allemand* (maillachort, pacfong ou argentan) est la suivante (V. Regnault) :

Cuivre.	50
Zinc.	30
Nickel.	20



Disposition des barres et des clefs.



Étalon B. A.

Le diagramme ci-dessus montre comment les bobines sont reliées aux

barres correspondantes et comment l'introduction d'une clef supprime la rés. offerte par la bobine correspondante en la mettant en *court-circuit*.

Bobine étalon de l'Association britannique. — Elle représente l'*ohm*. Elle est établie, soit en argent allemand, soit en alliage de 66,6 d'argent et 33,4 de platine. Le fil soigneusement isolé, avec deux ou plusieurs couches de soie, et dont les extrémités sont fixées à deux tiges de cuivre rouge massives, est enroulé en double pour prévenir toute action extérieure, enfermé dans une enveloppe de laiton et noyé dans la paraffine. En plongeant l'enveloppe dans l'eau on peut porter le fil à la temp. voulue. Elle est construite avec soin et est employée surtout avec le pont de Wheatstone à curseur, ou pour la vérification des boîtes de rés.

Subdivisions de l'ohm. — On prend un fil d'argent allemand (n° 16. B. W. G.) de 1,65 millimètre de diamètre, et d'un ohm de résistance. On le divise soigneusement en dix parties égales et l'on soude à chaque division un fil de cuivre qui sert à prendre les dixièmes d'ohm. Pour les centièmes d'ohm, on pourra prendre un fil de laiton de un dixième d'ohm du n° 18, et procéder de la même manière, et un fil de laiton du n° 10 pour les millièmes d'ohm. Sous réserve de la question de poids, de volume et de prix, on aura intérêt à prendre le fil le plus gros possible, ce qui assurera une plus grande exactitude.

Combinaison des bobines. — On choisit en général les valeurs des résistances des bobines pour que l'on puisse réaliser toutes les résistances de 1 à 10 000 avec un nombre de bobines minimum. On prend en général les chiffres suivants :

1 2 2 5 10 10 20 50 100 100 200 500 1000 1000 2000 5000

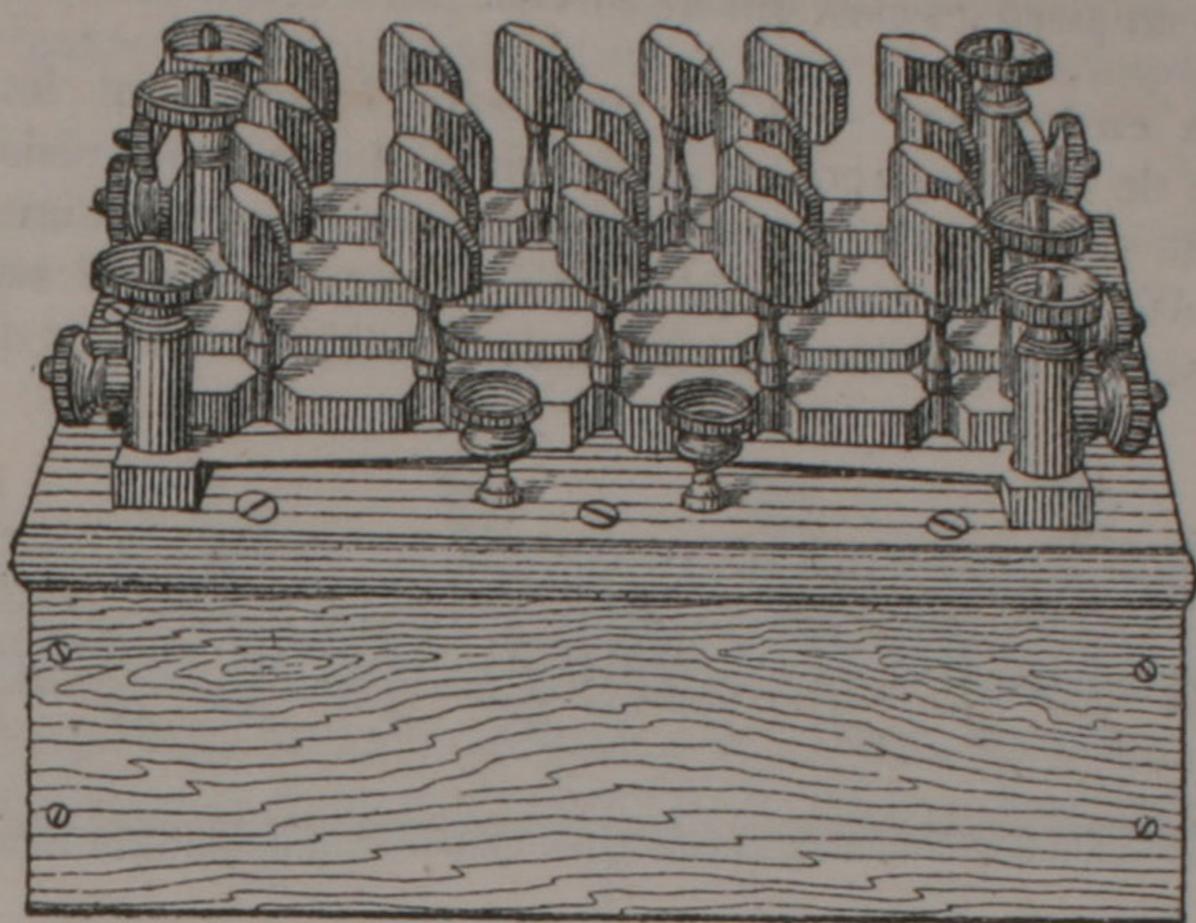
Soit en tout 16 bobines. Voici une seconde combinaison qui permet d'opérer rapidement, de lire les résistances d'un seul coup d'œil et de les ajuster avec moins de changements. Il faut également 16 bobines.

1 2 3 4 10 20 30 40 100 200 300 400 1000 2000 3000 4000

Dans le modèle de *boîte de résistance à cadrans*, construit par Elliott, on s'est préoccupé au contraire d'avoir un minimum de clefs (voy. p. 54).

Boîte à pont. Modèle du Post-Office de Londres. — Cette boîte comprend, comme le montre le diagramme ci-contre, page 55, une série de résistances permettant d'obtenir de 1 à 10 000 ohms de résistance, un pont de Wheatstone avec les bras 10, 100, 1000, et deux clefs de contact, l'une pour la pile, l'autre pour le galv. et deux clefs d'infini; l'une de ces clefs permet de transformer la boîte à pont en boîte ordi-

naire, l'autre permet d'insérer une résistance infinie dans la branche du



Boîte à pont. — Modèle du Post-Office de Londres.

pont. Le modèle le plus complet est muni d'une clef d'inversion pour

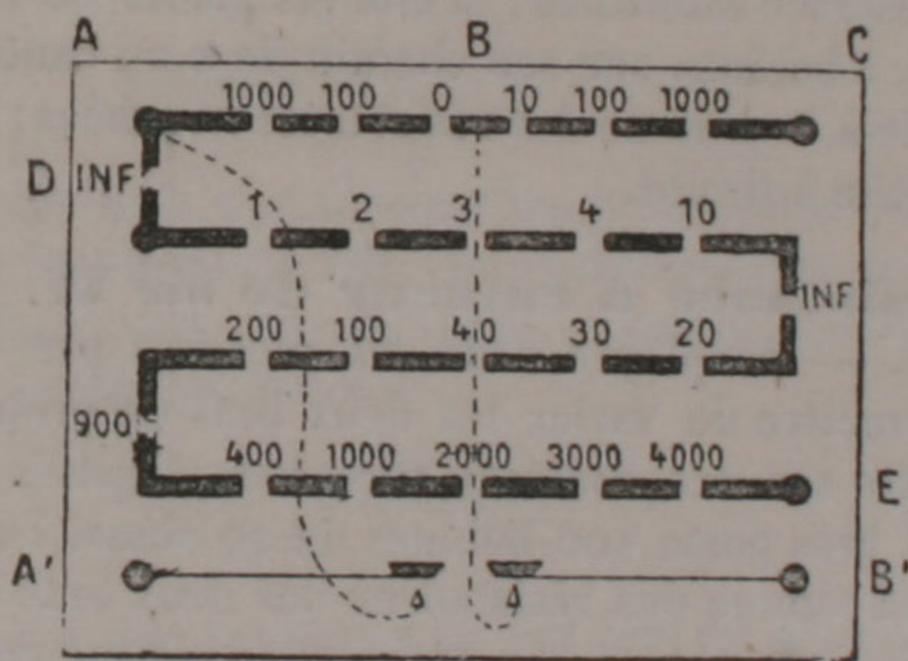


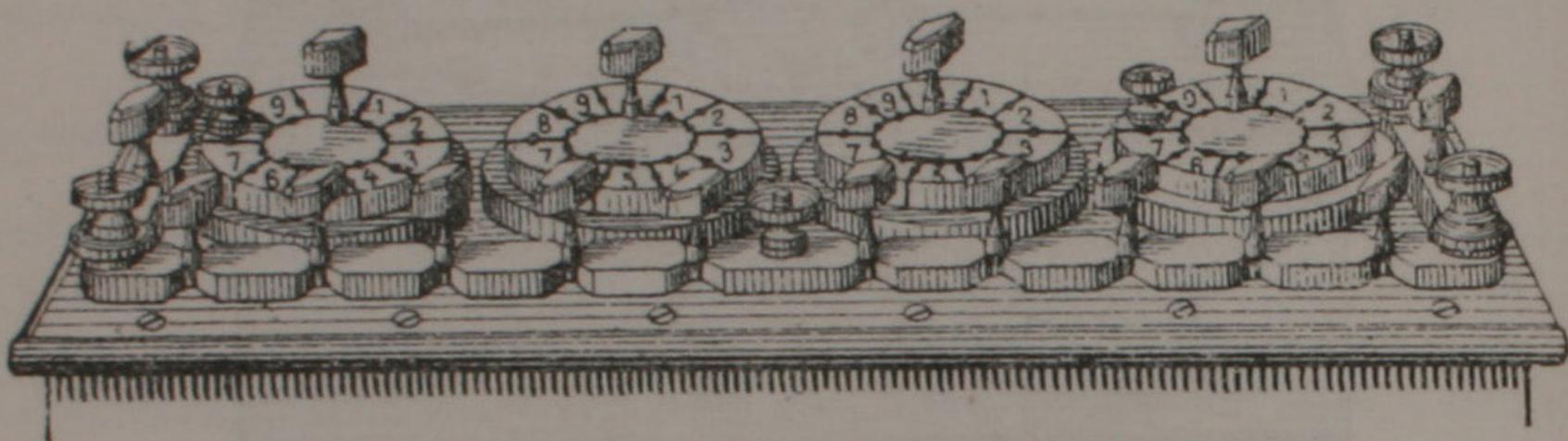
Diagramme de la boîte à pont du Post-Office.

changer le sens du courant de la pile sans toucher aux communications établies.

Boîte à pont pour la mesure des câbles. — Cette boîte ne comporte pas de clefs de contact, comme le modèle du Post-Office; ces contacts se font à l'aide d'appareils accessoires spéciaux (clefs d'inversion

et taper). Chacun des blocs servant de liaison aux bobines porte un trou dans lequel on place les clefs qui ne servent pas à établir de liaisons.

Boîte à cadrans. — C'est une boîte à pont dont les bras ont des bobines de 10, 100, 1000 et 10 000 ohms. La boîte de résistance proprement dite se compose de cinq cadrans formés chacun d'un disque de laiton entouré d'un anneau coupé en dix segments. Chaque segment est relié au voisin par une bobine de résistance. Toutes les bobines d'un même



Boîte à cadrans.

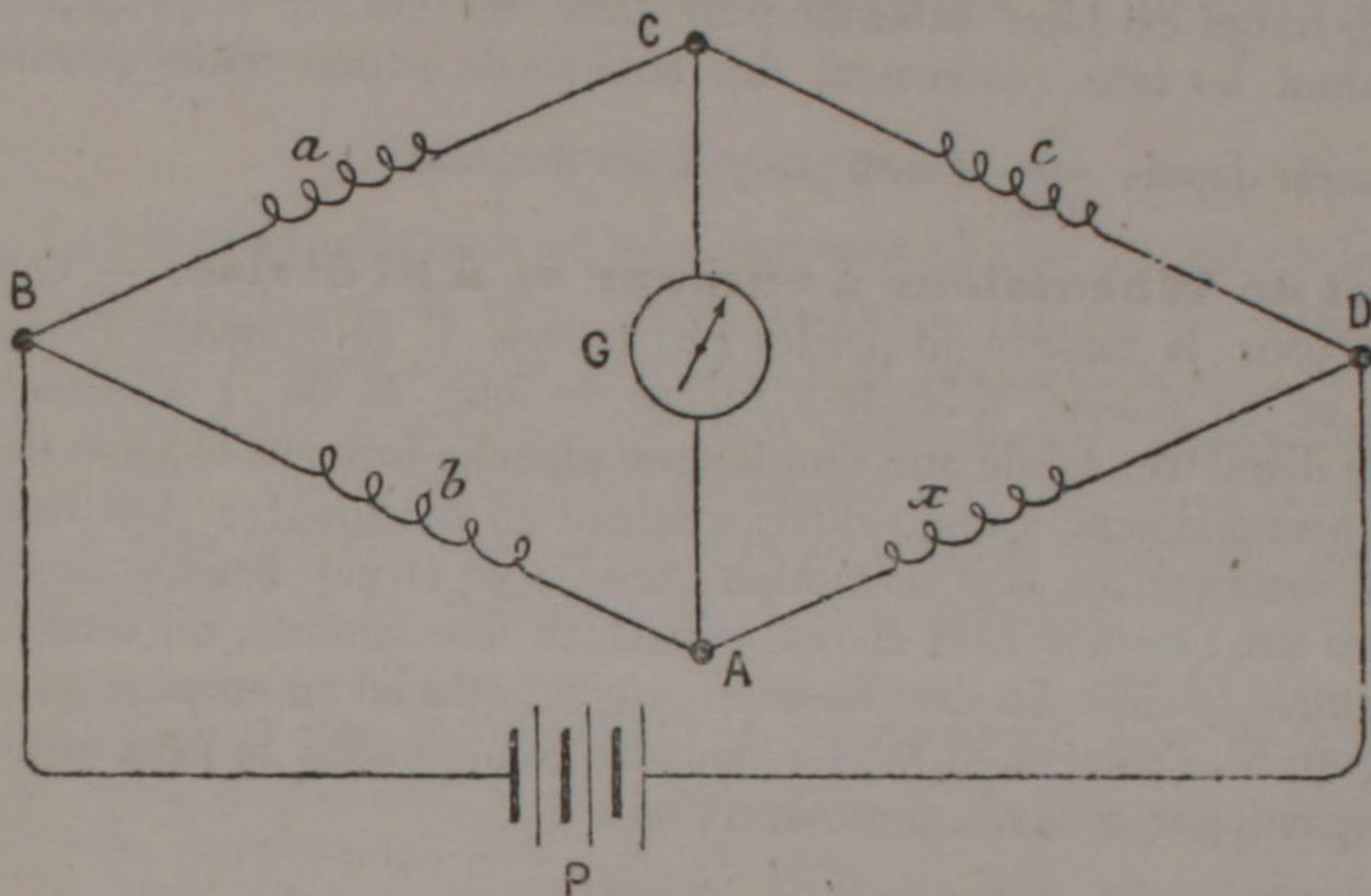
cadran ont respectivement la même valeur, 1, 1, 10, 100, 1000 ohms. Le courant va du segment 0 au centre du cadran suivant. On place une cheville entre le centre du disque et un des segments. Si la cheville est à 0, il n'y a pas de résistance intercalée; si elle est placée en 1, 2, 3, le courant doit traverser 1, 2, 3 bobines sur son chemin de 0 au centre. La résistance intercalée est égale à la somme des résistances bouchées; la lecture se fait facilement de gauche à droite.

Boîte de résistance à curseur de sir W. Thomson et de M. Varley. — Employée dans les mesures par le pont. Elle est disposée pour permettre de varier les deux bras de proportion en faisant glisser une manette sur des contacts successifs disposés sur une circonférence. L'un des bras porte 100 bobines de 20 ohms, l'autre 101 bobines de 1000 ohms. La somme des résistances des deux bras est constante, on ne fait varier que leur rapport. Le troisième bras est une résistance fixe connue; le quatrième comprend la résistance à mesurer.

Précautions à prendre dans l'emploi des boîtes de résistance. — 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; éviter de les graisser et de les toucher avec les doigts.

Pont de Wheatstone. — On désigne sous ce nom une disposition imaginée par Christie, représentée en principe dans la figure ci-dessous.



Principe du pont de Wheatstone.

Quatre résistances, a , b , c , x , forment les quatre côtés d'un losange A, B, C, D. Une pile occupe la diagonale BD, un galvanomètre G, la diagonale AC. Lorsque le galvanomètre est au zéro, il existe entre les quatre résistances a , b , c , x la relation suivante

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{x}.$$

Cette relation est une conséquence des lois de Kirchhoff. Wheatstone a appliqué la disposition de Christie à la mesure des résistances, aussi est-elle généralement connue aujourd'hui sous le nom de *pont* ou *balance de Wheatstone*.

Lorsque a et b sont connus, en ajustant c pour amener le galvanomètre au zéro, on tire pour la valeur de x :

$$x = c \frac{b}{a};$$

a et b sont les *bras* du pont.

Lorsque les bras sont égaux, on a simplement : $x = c$.

En faisant varier le rapport des bras a et b , on peut mesurer des résistances beaucoup plus grandes ou beaucoup plus petites que celles dont on dispose dans la boîte c . Ainsi le modèle de boîte à pont du Post-Office de Londres (p. 55), renfermant deux bras de 10, 100 et 1000 ohms et une boîte de résistance qu'on peut faire varier de 1 à 10 000 ohms, permet de mesurer des résistances qui varient depuis $\frac{1}{100}$ d'ohm jusqu'à 1 000 000 d'ohms, ce qui est bien suffisant pour tous les cas de la pratique. Les boîtes dont les bras renferment des bobines de 10 000 ohms permettent de mesurer depuis $\frac{1}{10000}$ d'ohm jusqu'à 10 megohms.

Pont de Wheatstone à curseur ou à fil divisé. — Combiné surtout pour la mesure de petites résistances. Il se compose d'un fil en platine ou en platine iridié de 1 mètre de long et de 1 millimètre et demi de diamètre, tendu sur une longue planche formant le socle de l'appareil, parallèlement à une échelle graduée en millimètres. Les bouts du fil sont soudés à un bloc métallique relié à de larges bandes de cuivre. On place sur l'un des bras R une résistance fixe connue, un ohm étalon par exemple (p. 53). Un des fils de la pile est attaché au curseur qui glisse le long du fil, l'autre fil et le galvanomètre comme dans le pont ordinaire. En désignant par x la rés. à mesurer, on a :

$$x = R \frac{a}{b}$$

On n'a besoin que de connaître le rapport $\frac{a}{b}$ et non pas la valeur absolue des résistances a et b . Si le fil est homogène et d'un diamètre uniforme, ce rapport est égal à celui des longueurs de chaque côté du curseur.

Le curseur porte ordinairement une tige verticale à glissement soulevée par un ressort, le fil de la pile est attaché à cette tige, le contact s'établit seulement au moment voulu en pressant sur le ressort.

Cet appareil, commode dans certains cas, n'est pas très exact, car il repose sur l'hypothèse que le fil exposé à l'air conserve une résistance uniforme, ce qui n'est pas vrai à cause de l'oxydation et des éraillures faites par le curseur.

Grosseur des fils des bobines de résistance. — Le fil doit être d'autant plus gros que la bobine représente une résistance plus faible. Voici les grosseurs moyennes indiquées par M. Sprague :

<i>Bobines de 1 ohm.</i>	N° 18 à 21 de la jauge de Birmingham.	1,30 à 1,00 mm.
— 10 —	N° 20 à 29 —	1,00 à 0,40 —
— 100 —	N° 25 à 34 —	0,50 à 0,25 —
— 1000 —	N° 32 à 40 —	0,40 à 0,10 —

On les construit en général en argent allemand, dont la résistance varie beaucoup avec la proportion de nickel. Comme première approximation, relative à l'achat du fil, on peut admettre que

1	mètre de fil maillechort de	1,0	mm. de diamètre présente.	0,27	ohms de rés.
1	—	0,5	—	1,08	—
1	—	0,1	—	27,00	—

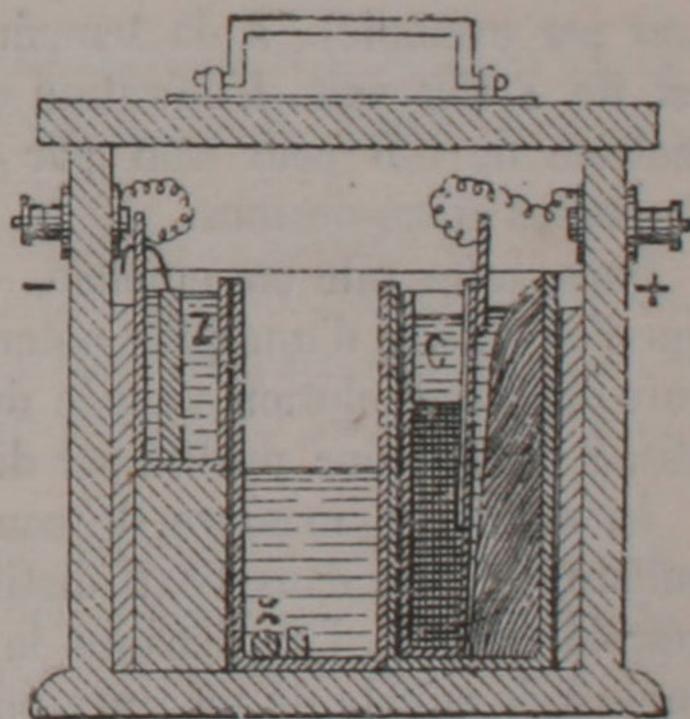
à la température de 0° C. Suivant les échantillons, les chiffres varient du simple au double.

ÉTALONS DE FORCE ÉLECTROMOTRICE

Les forces électromotrices se mesurent soit à l'aide d'appareils *gradués* qui donnent directement leur valeur en *volts*, soit en les comparant à d'autres prises comme *étalon* : on se sert en pratique d'éléments de pile établis de manière à donner une force électromotrice *constante* et de valeur connue. Nous décrirons ici les étalons les plus employés en faisant connaître pour chacun d'eux les conditions exigées pour que l'on puisse considérer leur f. é. m. comme pratiquement constante.

Pile étalon du Post-Office de Londres. — Elle appartient

au type de Daniell. Elle se compose d'une boîte renfermant trois vases distincts : celui de gauche renferme 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. Dans de bonnes conditions, avec une pile nouvellement montée, la force électromotrice est de 1,079



Pile étalon du Post-Office de Londres.

volt. En service courant on lui attribue, au Post-Office, une f. é. m. égale à 1,07 volt.

Pile au chlorure d'argent de M. Warren de la Rue. — Chaque élément se compose d'un vase en verre fermé par un bouchon de paraffine. L'élément positif est du zinc chimiquement pur non amalgamé. L'élément négatif est un cylindre de chlorure d'argent renfermé dans un cylindre de parchemin végétal; le chlorure d'argent Ag Cl est fondu sur le fil d'argent aplati qui sert d'électrode. La solution se compose de 23 grammes de chlorhydrate d'ammoniaque par litre d'eau. On soude le bouchon de paraffine à l'aide d'un fer chaud le long de la paroi du verre et autour de la tige. La force électromotrice de cette pile est de 1,068 volt. La pile fonctionne d'autant mieux qu'on l'emploie plus souvent; quand elle reste longtemps au repos, il se forme une couche très adhérente d'oxychlorure de zinc qui augmente beaucoup la résistance de chaque élément.

Avec le bromure d'argent, la force électromotrice est de.. 0,908 volt.
— l'iodure d'argent 0,758 —

Pile étalon de M. Latimer Clark. — Ne peut s'employer que dans les mesures où la pile ne produit pas de courant (méthode de Law par exemple). A la température de $15^{\circ},5 \text{ C.}$, la force électromotrice est de 1,457 volt. L'élévation de température diminue la force électromotrice de 0,6 pour 100 par degré C. dans un intervalle de 10 degrés au-dessus et au-dessous.

Dans cette pile on emploie, comme élément négatif, du mercure pur que l'on couvre d'une pâte obtenue en faisant bouillir du sulfate de mercure dans une solution saturée de sulfate de zinc; l'élément positif est constitué par du zinc purifié par distillation et reposant sur la pâte.

La meilleure manière de construire cet élément est de dissoudre du sulfate de zinc dans l'eau distillée bouillante jusqu'à saturation. Après refroidissement, l'on décante la solution de dessus les cristaux et on la mêle à du sulfate de mercure pur, de façon à obtenir une pâte épaisse que l'on fait ensuite bouillir pour chasser l'air. Cette pâte est versée sur du mercure que l'on a chauffé préalablement dans un vase de verre convenable; un morceau de zinc pur est alors suspendu dans la pâte; il est bon de fermer hermétiquement le vase avec de la cire de paraffine fondue. Le contact avec le mercure est établi par un fil de platine qui descend dans un tube de verre soudé à l'intérieur du vase et qui plonge au-dessous de la surface du mercure, ou, mieux encore, par un petit tube de verre soufflé sur le côté du vase et s'ouvrant près du fond. Le sulfate mercurieux ($\text{Hg}^2 \text{SO}^4$) peut être obtenu dans le commerce; on peut d'ailleurs le

préparer en dissolvant un excès de mercure dans de l'acide sulfurique chaud, à une température inférieure au point d'ébullition; le sel, qui est une poudre blanche presque insoluble, doit être lavé à l'eau distillée; on doit avoir soin de l'obtenir bien exempt de sulfate mercurique (bisulfate), dont on reconnaît la présence à ce que le mélange tourne au jaune par une addition d'eau. Il est essentiel de laver soigneusement le sel, la présence d'acide libre ou de bisulfate produisant un changement considérable dans la force électromotrice de l'élément.

Élément zinc-cadmium. — Dans un vase on dispose un amalgame de zinc recouvert d'une solution de sulfate de zinc pur. Dans un second vase, un amalgame de cadmium recouvert d'une solution de sulfate de cadmium. On réunit les deux vases par un siphon capillaire. Des fils de platine en rapport avec les amalgames forment les pôles de l'élément. La f. é. m. est de 0,28 volt (*Debrun*). Le calcul indique 0,35 volt. Cet étalon convient pour toutes les méthodes de mesure par le condensateur.

Élément simple. — Une plaque de zinc et une plaque de cuivre plongeant dans une solution saturée de sulfate de zinc ont une f. é. m. exactement égale à un volt (*Ayrton et Perry*). A n'employer qu'avec le condensateur, pour éviter la polarisation.

Étalon Reynier (1883). — Zinc *amalgamé*, cuivre, solution filtrée de chlorure de sodium : 250 p. de sel dans 1000 p. d'eau. f. é. m. = 0,82 volt, constante entre + 5 et + 40° C.

L'électrode cuivre, plissée et ajourée, développe une surface de 30 d. q., c'est-à-dire 300 fois plus grande que l'électrode négative. Celle-ci est un fil de zinc *amalgamé* de 3 millimètres de diamètre, plongeant au centre du récipient; on peut soulever et fixer le zinc hors du liquide, pour mettre la pile au repos.

La rés. de l'étalon est 1 à 2 ohms, valeur négligeable devant les rés. de 1000 à 20 000 ohms qu'on peut donner aux circuits galvanométriques; sa f. é. m. perd moins de 0,008 volt par un travail de 2 heures à l'intensité de 1 milliampère. Il se prête donc aux mesures par les procédés galvanométriques, comme par les méthodes à circuit ouvert.

ÉTALONS DE CAPACITÉ

Les étalons de *capacité* employés en pratique sont des *condensateurs* dont la capacité varie entre un tiers et 10 microfarads. Dans les recherches scientifiques, on fait quelquefois usage de *condensateurs absolus* à air, dont on calcule la capacité d'après la forme géométrique, mais ils n'ont pas encore été employés jusqu'ici dans la pratique courante.

Condensateurs. — Un condensateur n'est autre chose qu'une bouteille de Leyde à grande surface sous un petit volume.

Les condensateurs de *Varley* se composent de feuilles très minces d'argent battu recouvertes de paraffine ou de feuilles d'étain.

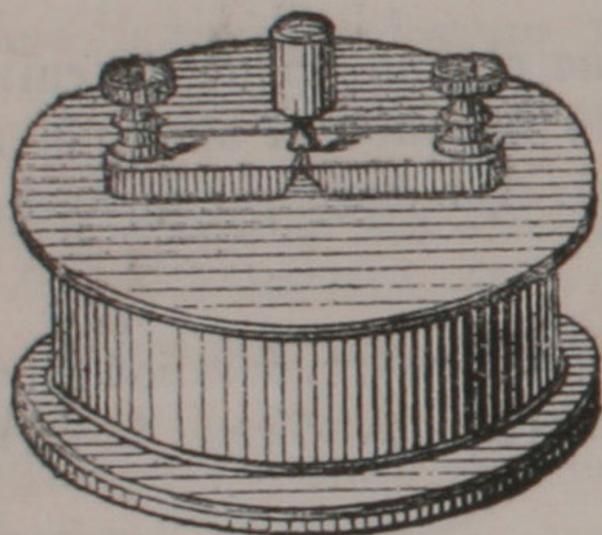
Les condensateurs de *Clark* sont formés de feuilles d'étain et de feuilles de mica recouvertes de paraffine ou de gomme laque.

Les condensateurs de *W. Smith* ont pour diélectrique des feuilles d'une gutta-percha spéciale renfermant une grande proportion de gomme-laque.

La capacité d'un condensateur C se mesure en *microfarads*; elle est proportionnelle à la capacité inductive spécifique K du diélectrique, à l'aire des surfaces opposées S et inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche isolante d :

$$C = \frac{KS}{2\pi d}$$

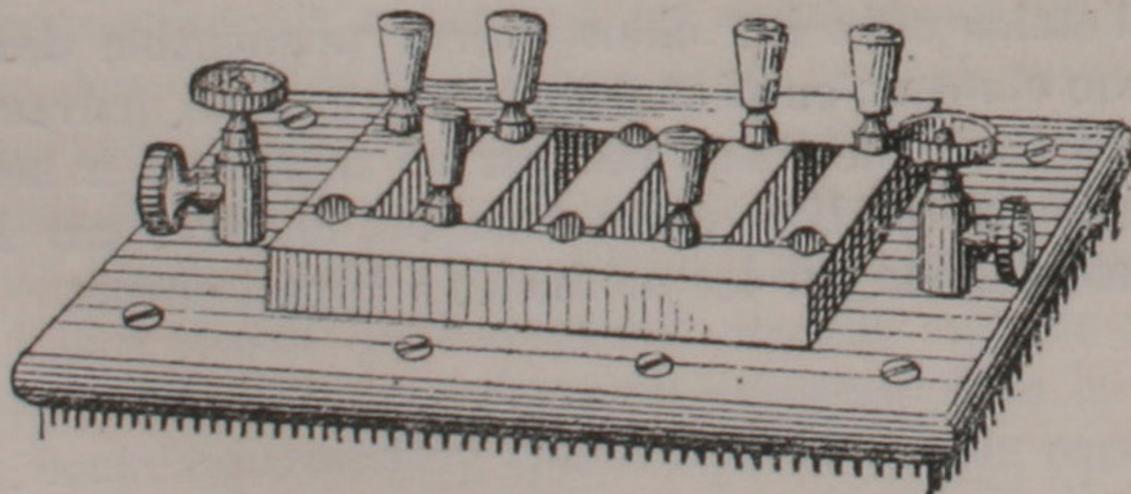
Un condensateur de 1 microfarad contient environ 300 feuilles d'étain circulaires, séparées par des feuilles de mica, et tient dans une boîte de 8 centimètres de hauteur et 16 centimètres de diamètre.



Condensateur de $\frac{1}{2}$ microfarad.

Lorsqu'on ne fait pas usage du condensateur il faut toujours relier les armatures par une clef qui maintient le condensateur déchargé.

Certaines boîtes de condensateurs étalons sont composées de fractions de microfarad qu'on peut grouper à volonté à l'aide de chevilles pour faire varier la capacité et faciliter les mesures. La figure ci-dessous montre la



Condensateur de 1 microfarad divisé en 5 parties.

partie supérieure d'un condensateur de 1 microfarad divisé en cinq parties :

0,05 0,05 0,2 0,2 0,5

Construction d'un condensateur d'un microfarad (Culley). — Il faut 37 feuilles de bon papier d'étain de 184 millimètres sur 152 séparées les unes des autres par deux feuilles très minces de papier destiné à la fabrication des billets de banque, comprimées à chaud. Les deux séries se composent respectivement de 18 et 19 feuilles d'étain, celle de 19 feuilles forme l'extérieur du condensateur et est reliée à la terre. La feuille additionnelle a pour but de neutraliser les effets d'induction des objets voisins. Le papier doit être bien desséché et imbibé de paraffine, soit en le plongeant dans un bain, soit en l'étendant au pinceau.

Pour construire le condensateur, on prend une plaque de fonte un peu plus large que les feuilles de papier et montée sur quatre pieds pour pouvoir la chauffer par-dessous au moyen d'un bec de gaz : sa surface doit être plane et polie, et son bord garni d'une rainure destinée à recevoir la paraffine en excès. On découpe le papier en feuilles assez larges pour déborder les feuilles d'étain de 25 millimètres environ en tous sens, et on rogne les deux angles supérieurs de chaque feuille; on rogne de même l'un des angles des feuilles métalliques, on les dresse avec soin et on les réunit en deux séries, l'une de 18, l'autre de 19 lames en soudant les angles non rognés opposés aux angles rognés du même côté des lames, pour en faire deux livrets distincts.

On place une feuille de papier sur la plaque de fonte chauffée, on la recouvre de paraffine fondue avec un pinceau très soyeux en poil de chameau; on dispose au-dessus la première feuille d'étain du livret de 19 lames, on recouvre la feuille d'un vernis, on pose au-dessus deux feuilles de papier imprégnées de paraffine en les mettant en place; on pose sur ce papier la première feuille de la série de 18 lames, de manière que les coins soudés correspondent au coin rogné du papier et se trouvent en face des coins soudés de l'autre série.

On applique alors une couche de vernis et deux feuilles de papier comme précédemment, on place une seconde lame de la série des 19, et ainsi de suite, en ayant soin de bien dresser chaque feuille en la mettant en place. Lorsque l'appareil est construit, on le place entre deux plaques métalliques chaudes et on le soumet à une pression d'environ 400 kilogrammes pour faire écouler la paraffine en excès et former un tout compact. On évite ainsi l'altération que produirait dans la capacité du condensateur un changement dans la distance des plaques métalliques. On emploie deux épaisseurs de papier pour assurer l'isolement, qui pourrait se trouver détruit s'il existait quelque petit trou ou déchirure dans le papier. Il faut avoir soin de disposer entre les deux séries métalliques un galvanomètre et une pile de 10 à 20 éléments pour vérifier si l'isolement reste complet pendant la construction.

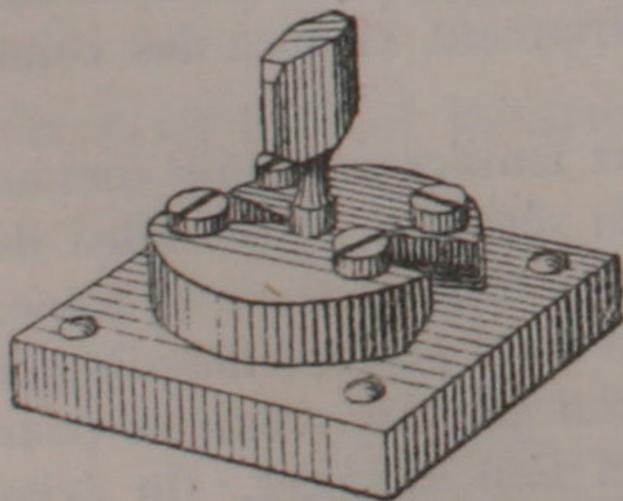
Lorsque le condensateur est complètement refroidi, on vérifie sa capa-

cité par une méthode convenable. Si cette capacité est trop faible, on l'augmente par une nouvelle pression, et si ce moyen est insuffisant, il faut ajouter de nouvelles feuilles d'étain. Si la capacité est trop grande, on retire au contraire quelques feuilles. Quand l'opération est terminée, on place le condensateur entre deux montants de bois, réunis par des vis en bois qui maintiennent une pression invariable, puis on renferme le tout dans une boîte portant deux bornes à écrou reliées aux deux armatures du condensateur.

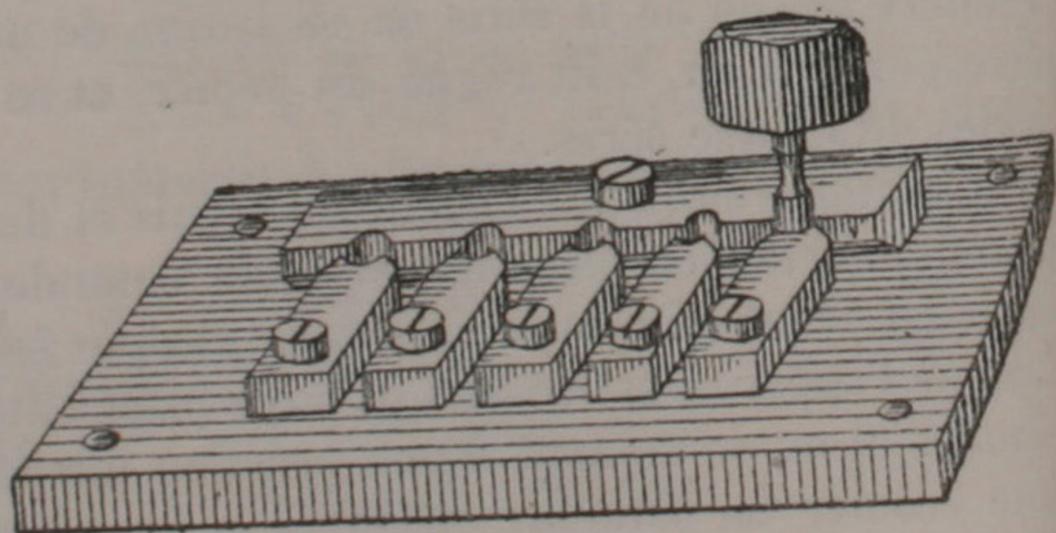
On emploie le même procédé pour les condensateurs en *mica*, mais l'élasticité de cette substance fait que leur capacité varie avec la pression qu'on leur fait subir; à volume égal, un condensateur à lames de mica a une capacité plus grande que celle d'un condensateur à feuilles de papier, parce que la capacité inductive ou pouvoir inductif du mica est plus grand que celui du papier.

APPAREILS ACCESSOIRES POUR LES MESURES ÉLECTRIQUES

Interrupteurs et Commutateurs. — Servent à établir et à rompre les communications électriques entre les différents appareils de mesure. On les construit à manette ou à cheville, à une ou à plusieurs directions, suivant les besoins. Le modèle connu sous le nom de *commutateur de pile* est très commode, lorsqu'on a besoin de faire varier rapidement le nombre d'éléments. Il suffit pour cela d'un simple déplacement de la clef.



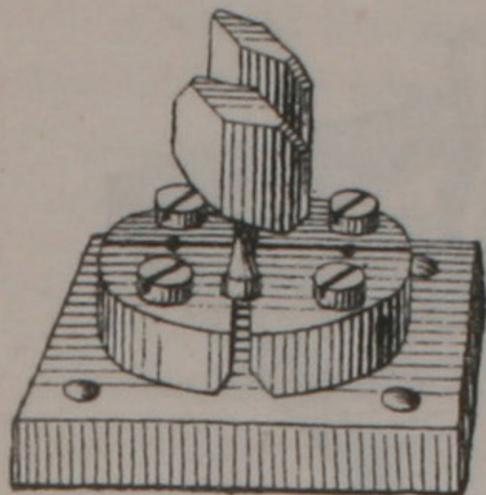
Commutateur interrupteur simple à clef.



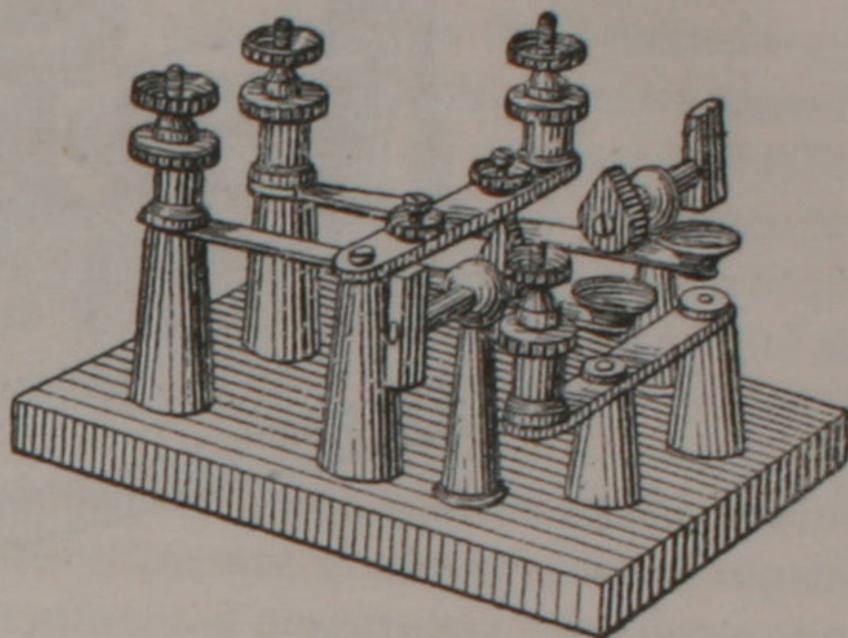
Commutateur de pile.

Commutateurs inverseurs. — La forme la plus simple se compose de quatre quadrants épais en laiton vissés sur une plaque d'ébonite sans se toucher, et portant des échancrures demi-circulaires, dans lesquelles on peut introduire des chevilles en laiton qui établissent des communications électriques entre les plaques.

Clef d'inversion. — Sert à relier le galvanomètre aux appareils de mesure. Les contacts sont disposés de telle manière qu'en abaissant un des ressorts, le courant marche dans un sens, et en abaissant l'autre il



Commutateur inverseur à clef.

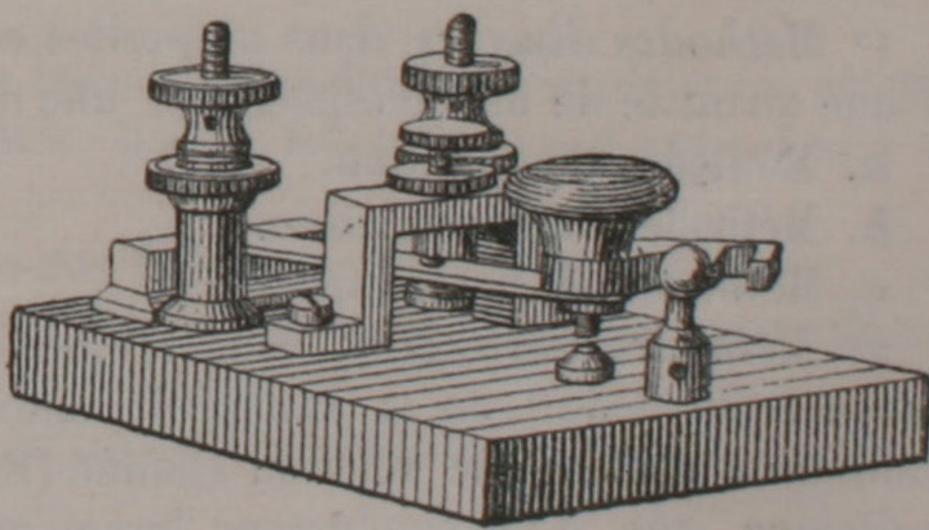


Clef d'inversion.

marche en sens contraire; deux autres clefs permettent de caler les ressorts et de maintenir un contact permanent sur l'une ou l'autre des communications lorsque cela est nécessaire.

Dans un modèle récent de clef d'inversion combiné par M. *Ducretet* (1883), les deux bandes horizontales placées l'une au-dessus, l'autre au-dessous des deux leviers sont coupées en deux et forment ainsi deux clefs distinctes qu'on peut réunir ou séparer à volonté, suivant les exigences du montage à effectuer.

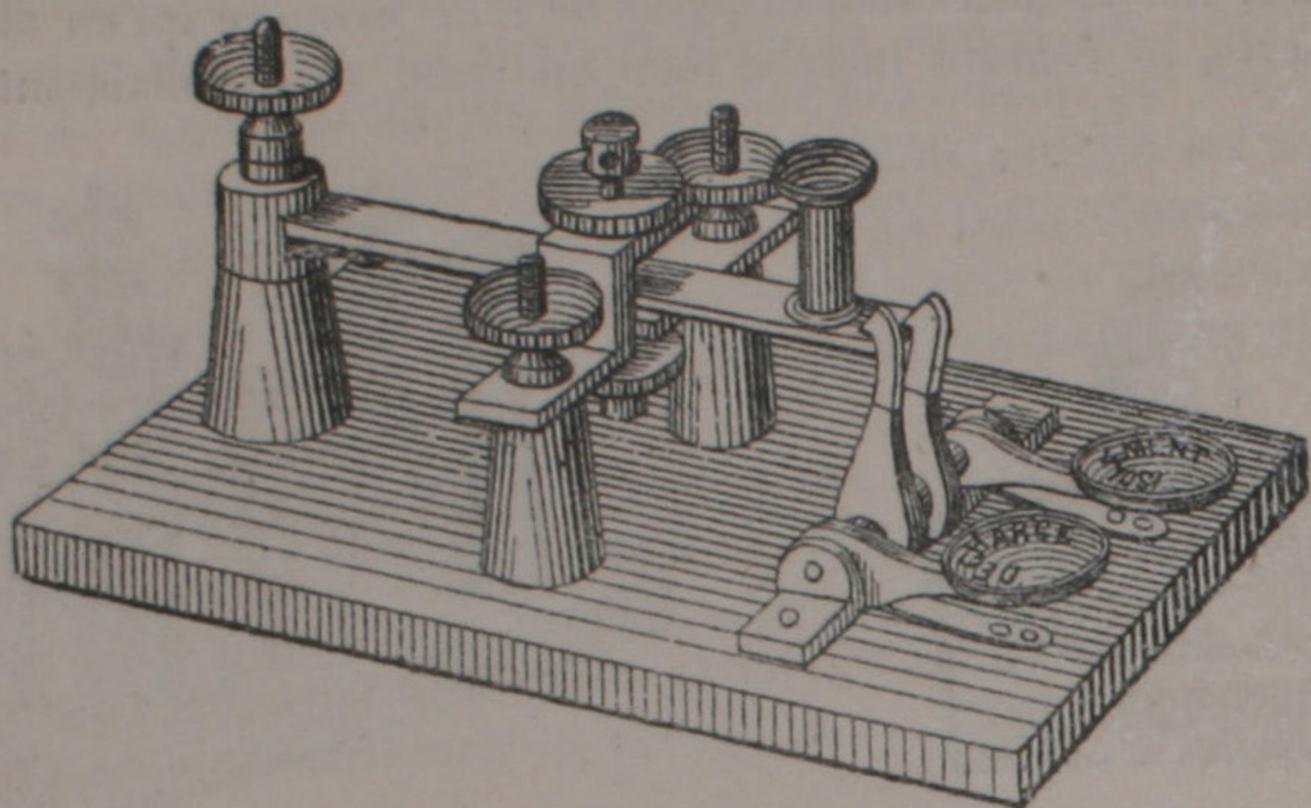
Clef de court circuit ou taper. — S'établit entre les bornes du galvanomètre pour empêcher le passage accidentel de courants trop puissants à travers ses bobines. Dans sa position normale, le ressort presse contre un contact de platine et, en l'abaissant, contre un contact en ébonite. Un arrêt mobile permet de maintenir la clef abaissée d'une manière permanente lorsque cela est nécessaire.



Clef de court circuit ou *taper*.

Clef de décharge. — Pour les méthodes de mesure par le condensateur, la plus employée est celle de *Sabine*. Elle porte trois touches :

la première sert à mettre le condensateur en relation avec le circuit, la



Clef de décharge de Sabine.

seconde sert à isoler le condensateur, la troisième établit la communication entre le condensateur et le galvanomètre.

Clef à double contact. — Sert pour les mesures par la méthode du pont avec les boîtes ordinaires. Les communications sont établies de telle manière que le premier contact ferme le circuit de la pile et le second celui du galvanomètre à un court intervalle.

MÉTHODES GÉNÉRALES DE MESURE

Les méthodes de mesure peuvent se diviser en deux grandes classes :

1° *Méthodes directes*, dans lesquelles on compare la quantité à mesurer à une quantité de même espèce par une des trois méthodes suivantes :

- a. Méthodes d'opposition.
- b. Méthodes de substitution.
- c. Méthodes de comparaison.

2° *Méthodes indirectes*, dans lesquelles la grandeur de la quantité à mesurer se déduit de la valeur de deux ou plusieurs autres quantités connues à l'aide d'une relation connue (Ex. : chaleur dégagée dans l'arc voltaïque, rés. d'un conducteur lorsqu'on connaît l'intensité du courant qui le traverse et la différence de potentiel entre ses deux extrémités, etc.).

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. Dans les mesures électriques, on peut prendre comme type la méthode du pont de Wheatstone. Il suffit de constater l'égalité de potentiel entre deux points donnés; on peut employer à cet usage les galvanoscopes, galv., électromètres, électro-dynamomètres, etc. L'exactitude de la mesure dépend de la sensibilité de l'appareil qui révèle l'égalité de potentiel entre les deux points considérés.

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. (Ex. : galv. des sinus, des tang., etc.).

MESURE DES COURANTS

Les courants se mesurent par leurs actions électro-magnétiques, électro-dynamiques ou électro-chimiques. De là trois classes d'instruments de mesure :

- 1° Les *galvanomètres*, fondés sur les actions électro-magnétiques.
- 2° Les *électro-dynamomètres*, fondés sur les actions des courants sur les courants, ou actions électro-dynamiques.
- 3° Les *voltamètres*, fondés sur les actions chimiques.

I, — GALVANOMÈTRES

Tout appareil dans lequel une aiguille aimantée est déviée par un courant constitue un *galvanomètre*. Le galv. est un *galvanoscope* lorsqu'il indique le passage du courant sans en donner la mesure. Dans les méthodes de réduction à zéro, les galv. jouent le rôle de galvanoscopes.

Les galvanomètres sont fondés sur la découverte d'Ørsted, en 1819, et celle du multiplicateur de Schweigger; l'application des aiguilles astatiques aux galv. est due à Nobili, et celle du miroir à réflexion à sir W. Thomson.

Les galv. variant à l'infini dans leurs formes et leurs dispositions, nous ne décrirons ici que les plus employés, mais nous exposerons d'abord les principes généraux qui leur sont appliqués et qui, lorsqu'ils ont une importance prédominante, donnent le nom à l'appareil.

Galvanomètres des sinus. — La loi de déviation est liée au sinus de l'angle de déviation.

Galvanomètres des tangentes. — Loi de déviation liée à la tangente de l'angle de déviation.

Galvanomètre astatique. — L'action directrice de la terre est affaiblie, pour donner de la sensibilité, soit par un aimant séparé, soit par une paire d'aiguilles formant un système astatique.

Galvanomètre apériodique (en anglais *Dead beat*). — L'aiguille prend presque sans vibration sa position d'équilibre.

Galvanomètre balistique. — La mesure s'effectue par l'impulsion de l'aiguille produite sous l'action d'un courant instantané.

Galvanomètre différentiel. — Mesure la différence d'action de deux courants sur l'aiguille aimantée.

Galvanomètre à miroir ou à réflexion. — L'index est constitué par un rayon lumineux.

Galvanomètre de torsion. — L'action du courant est compensée et mesurée par la torsion d'un fil.

Galvanomètres à gros fil ou de quantité, à fil fin ou de tension. — Désignations vagues relatives à la nature du fil qui garnit les bobines. Cette désignation tend à disparaître pour faire place à l'indication pure et simple de la résistance du galvanomètre en ohms.

Galvanomètre d'intensité. — Galv. disposé dans un circuit pour mesurer directement l'intensité du courant qui le traverse.

Galvanomètre de force électromotrice. — Galv. à fil relativement long et fin branché entre deux points d'un circuit dont on veut connaître la différence de potentiel (mesure indirecte).

Galvanomètre absolu. — Permet de mesurer directement l'intensité d'un courant en fonction des dimensions du galv. et de la composante horizontale du magnétisme terrestre.

Galvanomètre étalonné. — La graduation de l'échelle est tracée non pas en degrés, mais en fonction de l'intensité du courant, ou tout au moins la graduation en degrés est accompagnée d'une table de réduction.

On voit par cette énumération que le nom d'un galv. ne définit que sa propriété principale, et qu'un galv. donné peut présenter à la fois plusieurs propriétés différentes au même degré. Le choix à faire dans l'application

dépend de la nature des mesures à effectuer, de l'exactitude demandée, du personnel qui doit en faire usage, etc.

Les galv. s'appellent quelquefois des *boussoles*, des *multiplicateurs* ou des *rhéomètres*, mais ces noms tendent à disparaître.

Galvanomètre des sinus. — Il se compose d'un cadre galvanométrique vertical au centre duquel se place une aiguille aimantée pouvant tourner dans un plan horizontal. On dispose le cadre dans le plan du méridien magnétique, c'est-à-dire parallèlement à l'aiguille. On envoie ensuite le courant dans le fil, l'aiguille est déviée; on fait tourner le cadre dans le sens de la déviation jusqu'à ce que l'aiguille redevienne parallèle au cadre. *L'intensité du courant est proportionnelle au sinus de l'angle dont on a fait tourner le cadre galvanométrique*, quelles que soient les dimensions relatives de l'aiguille et du cadre, ainsi que la forme de ce cadre. Les galv. des sinus sont assez sensibles, parce que le cadre peut être très rapproché de l'aiguille, mais les mesures demandent plus de temps qu'avec les autres appareils: chaque mouvement du cadre produisant une déviation de l'aiguille, le parallélisme est plus long à établir. La sensibilité augmente avec la déviation.

Galvanomètre des tangentes. — Lorsqu'une aiguille aimantée de très petites dimensions est placée au centre d'un cadre galvanométrique circulaire de très grandes dimensions, et que l'axe de l'aiguille est dans le plan du cadre, on démontre que la *tangente* de l'angle de déviation est *sensiblement* proportionnelle à l'intensité du courant qui traverse le cadre galvanométrique.

Le maximum de sensibilité a lieu pour une déviation nulle, la sensibilité est nulle pour une déviation de 90°. Il convient donc de mesurer de très petits angles, et de compenser la petitesse de la déviation par l'exactitude de la mesure, d'où l'emploi du galvanomètre à réflexion (p. 71).

Multiplicateur conique de Gaugain. — Cadre galvanométrique formant la base d'un cône droit au sommet duquel est l'aiguille: la hauteur du cône égale la moitié du rayon de la base. On double l'action, comme l'a indiqué *Helmholtz*, avec deux cadres placés symétriquement de chaque côté de l'aiguille. C'est le galv. des tang. qui se rapproche le plus des conditions de la théorie. Pour le galv. à un seul cadre, on a:

$$I = \frac{a}{4,504 n} H \operatorname{tang} \delta.$$

I, intensité du courant; δ , angle de déviation; a , rayon de la base; n , nombre de tours de fil; H, composante horizontale du magnétisme terrestre.

Pour assurer un champ magnétique absolument uniforme au centre de

l'aiguille, il convient d'employer *trois* bobines verticales parallèles, celle du centre étant plus grande que les deux autres, de manière qu'elles se trouvent toutes les trois sur une sphère dont la petite aiguille occupe le centre.

Galvanomètre des tangentes du Post-Office de Londres. — Destiné aux mesures de la télégraphie, il se compose d'un cadre circulaire en laiton de 15 centimètres de diamètre sur lequel sont roulées les bobines. L'aiguille a 18 millimètres de longueur environ, ce qui donne une exactitude pratiquement suffisante. L'aimant porte à angle droit un index de 12 centimètres de longueur qui se meut au-dessus d'une double échelle graduée, l'une en degrés, d'un côté du cadre, l'autre en tangentes. Pour éviter une erreur de lecture due à la parallaxe, on a disposé sur le plan de la graduation une glace qui reflète l'index ; à chaque lecture, l'image de l'index doit être recouverte par l'index lui-même. Le cadre porte 3 bobines ; l'une est composée de trois tours seulement de gros fil, l'autre a une résistance de 25 ohms, et la troisième une résistance égale ; on peut à volonté employer une des bobines séparément, les deux bobines en tension, ou les deux bobines en quantité, suivant la nature des courants à mesurer.

Galvanomètre des tangentes de Schwendler. — En usage dans le service des télégraphes de l'Inde. C'est un galv. des tangentes à deux bobines, l'une de 1 ohm, l'autre de 100 ohms. La bobine d'un ohm est accompagnée de deux résistances de 20 et 200 ohms qui peuvent s'ajouter en circuit, celle de 100 ohms a aussi deux bobines semblables de 1000 et 2000 ohms de résistance. Le galv. comprend encore un inverseur pour faire des lectures des deux côtés de l'échelle, deux clefs pour introduire en circuit l'une ou l'autre des bobines, et deux bornes pour fixer les fils. Pour la mesure des courants très puissants, l'anneau en cuivre qui sert de support aux bobines est coupé en deux moitiés et ses extrémités reliées à deux bornes ; il forme ainsi un troisième cadre. La longueur de l'aiguille ne dépasse pas le cinquième du diamètre de la bobine ; cette aiguille porte un index en aluminium fixé à angle droit et muni d'ailes de même métal pour amortir les oscillations. Le tout est renfermé dans un boîte cubique de 15 centimètres de côté ; la fermeture de la boîte soulève automatiquement l'aiguille et la dégage du pivot.

Avec un élément Daniell sur la bobine de 100 ohms, et 2000 ohms de rés. dans le circuit, la déviation est de 5°. Une des moitiés de l'échelle est divisée en degrés, l'autre en tangentes.

Galvanomètre universel de Siemens. — On a disposé sur le même appareil des bobines de résistance, un pont de Wheatstone à cur-

seur et un cadre galvanométrique mobile qui en fait un galv. des sinus. Toutes les mesures télégraphiques de rés. de f. é. m. et d'intensité de courant peuvent alors s'effectuer avec le même appareil.

Galvanomètre à réflexion de sir W. Thomson. — C'est l'appareil le plus sensible que l'on connaisse pour la mesure des courants faibles et celle de grandes résistances. Il varie beaucoup dans ses formes, mais, en principe, il se compose d'une légère aiguille magnétique, suspendue au centre d'une grande bobine de fil, et d'un système réflecteur qui permet d'amplifier les mouvements de l'aiguille. Un long index sans poids est formé par un rayon lumineux réfléchi sur une échelle graduée par un petit miroir que supporte l'aiguille magnétique.

Les déviations étant toujours très faibles et la bobine relativement grande, les déviations sont toujours sensiblement proportionnelles aux intensités des courants. 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 4 à 5 millimètres de longueur collés contre un petit miroir plan-convexe. Le diamètre du miroir est environ 6 millimètres et le poids total, aiguille et miroir, n'atteint pas 7 centigrammes. 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 son 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 un trépied à vis calantes pour mettre l'instrument de niveau.

Un aimant *directeur* légèrement courbé, supporté par une tige verticale fixée au sommet de la cage, constitue un méridien artificiel dont on règle la puissance et la direction en le faisant glisser ou tourner sur sa tige, de façon à agir avec plus ou moins de force sur l'aimant suspendu et, par suite, à faire varier sa sensibilité.

Sensibilisation du galvanomètre. — Quand les pôles de l'aimant directeur sont disposés comme ceux de l'aimant terrestre (pôle marqué au sud), sa force directrice s'ajoute à celle de la terre et la sensibilité de l'appareil *diminue*.

En faisant tourner cet aimant de 180° , on oppose sa force directrice à celle de la terre et la sensibilité augmente : pour avoir le maximum de sensibilité, on abaisse l'aimant 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.

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 vibrations. 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.

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 séries en dérivation de deux bobines en tension, ce qui permet de proportionner la résistance du galvanomètre à la nature des mesures qu'on veut effectuer. Les *shunts* qui accompagnent les *galvanomètres* correspondent toujours au groupage des bobines *en tension*.

Le fil de cocon est attaché à un bouton qu'on peut élever ou abaisser à volonté. En l'abaissant, les aiguilles reposent sur les bobines, l'on peut alors déplacer l'instrument sans risquer de briser le fil de cocon. La lecture des déviations du galvanomètre se fait à l'aide d'une lampe, d'une échelle et d'un miroir mobile, dont la disposition est la même pour tous les appareils à réflexion; nous la décrirons une fois pour toutes.

Lampe, échelle et miroir. — Disposition imaginée par sir W. Thomson pour observer et mesurer de petits déplacements angulaires, appliquée à tous les appareils à réflexion (galvanomètres, électromètres, magnétomètres, etc.) et dans laquelle un rayon de lumière agit comme un long index sans poids et, par suite, sans inertie.

Le miroir mobile est fixé sur l'appareil dont on veut mesurer la déviation. Une lampe et une échelle sont placées en face à une distance variable, ordinairement 60 à 80 centimètres. La lumière de la lampe passe par une petite ouverture pratiquée dans le bas de l'échelle, tombe sur le miroir mobile, s'y réfléchit et revient faire une petite image lumineuse sur le haut de l'échelle. Le moindre mouvement du miroir déplace l'image le long de l'échelle; le chemin parcouru est égal à celui que décrirait un index de longueur double de la distance du miroir à l'échelle¹.

¹ Dans les mesures de précision, cette distance atteint quelquefois 6 mètres; les déplacements lus sur l'échelle sont alors égaux à ceux d'un index de 12 mètres de longueur. Les déviations étant infiniment petites, les intensités sont rigoureusement proportionnelles aux divisions de l'échelle.

L'ouverture est tantôt une fente, l'image mobile est alors une ligne lumineuse verticale; tantôt un trou rond traversé par un fil de platine très fin tendu verticalement, l'image est un cercle éclairé traversé par une fine ligne noire verticale.

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

Les miroirs concaves étant très dispendieux, on emploie souvent un disque de verre mince argenté; les verres porte-objets des microscopes conviennent très bien à cet usage.

L'échelle est ordinairement divisée en millimètres et imprimée en noir sur papier blanc glacé. Quelquefois elle est en verre dépoli ou en cellulose, et on lit les déviations par transparence en se plaçant *derrière* l'échelle. Quand on emploie une lampe à pétrole à mèche plate, la mèche doit être présentée par la tranche, perpendiculairement à l'échelle. On peut aussi faire usage d'une lampe à incandescence à filament de charbon qui donne une image très nette avec une ouverture à fente.

Trou, rainure et plan. — Disposition imaginée par sir *W. Thomson*, qui permet de déplacer et de replacer toujours dans la même position un appareil reposant sur une table par trois vis calantes (galvanomètre, électromètre, etc.). On donne aux trois pieds les numéros 1, 2 et 3; on 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 passerait par le trou, le pied n° 3 sur le *plan* de la table. Toute erreur est ainsi évitée lorsqu'on déplace et remplace l'instrument.

Galvanomètre marin de sir W. Thomson. — Destiné aux essais des câbles à bord des navires. Le miroir et l'aimant sont fixés à un fil tendu par ses deux bouts et passant par le centre de gravité du système, pour éviter les oscillations du roulis et du tangage; l'appareil est en outre entouré d'une épaisse cage de fer qui préserve l'instrument des perturbations que pourraient produire les forces magnétiques extérieures: un puissant aimant directeur en forme de fer à cheval embrasse les bobines et dirige les aiguilles: on ajuste exactement la position du miroir au zéro à l'aide d'un petit aimant de réglage commandé par un pignon et une crémaillère placés à l'arrière du galvanomètre.

Galvanomètres apériodiques. — Un galvanomètre est apériodique lorsqu'il prend rapidement sa position d'équilibre sous l'action d'un courant et revient rapidement au zéro lorsque le courant cesse. Cette propriété résulte de plusieurs conditions de construction, dont voici les plus employées: 1° Entourer l'aimant d'une masse de cuivre rouge qui arrête