

**LES SOURCES
D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE

OUVRAGES PARUS

- A. Badoureau.** — LES SCIENCES EXPÉRIMENTALES
(nouvelle édition entièrement refondue).
- O. Chemin et F. Verdier.** — LA HOUILLE ET SES
DÉRIVÉS.
- P. Lefèvre et G. Cerpelaud.** — LES CHEMINS DE FER.
- E. Lisbonne.** — LA NAVIGATION MARITIME.
- H. Deutsch** (de la Meurthe). — LE PÉTROLE.
- Badoureau et Grangier.** — LES MINES, LES MINIÈRES
ET LES CARRIÈRES.
- Guy Le Bris.** — LES CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES.
-

EN PRÉPARATION

- F. Bère.** — LES TABACS.
- A. Combes.** — LA CHIMIE DES COULEURS.
- J. Sageret.** — LES APPLICATIONS DE L'ÉNERGIE ÉLEC-
TRIQUE.
-

Tous droits réservés.

Cet ouvrage a été déposé au Ministère de l'Intérieur
en octobre 1895.

BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

De MM. J. PICHOT et POL LEFÈVRE, anciens élèves de l'École Polytechnique.

LES SOURCES
D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

PAR

É. ESTAUNIÉ

Ancien élève de l'École Polytechnique,
Ingénieur des Télégraphes.

PARIS

ANCIENNE MAISON QUANTIN
LIBRAIRIES-IMPRIMERIES RÉUNIES

7, rue Saint-Benoît

MAY ET MOTTEROZ, DIRECTEURS

PRÉFACE

L'électricité a pénétré depuis dix ans dans la vie courante. Dernière venue parmi les connaissances physiques, elle a absorbé, au détriment de celles-ci, la plus grande part de la faculté de curiosité qui est au fond de chacun de nous.

Il en est de la science comme d'une ville. A certaines heures, les promeneurs se portent de préférence vers des centres déterminés, laissant les autres rues désertes. La plupart de ceux que distrait une simple flânerie à travers les idées contemporaines éprouvent ainsi aujourd'hui le désir de se rendre un compte au moins sommaire des merveilles réalisées par l'électricité. Il est bien vrai que cette force si récemment mise en œuvre semble encore plus mystérieuse que toutes les autres, qu'elle échappe aux sens, et que son action a des airs de magie ; mais cette énigme même en accroît l'attrait et surexcite le désir de la mieux pénétrer.

On doit en faire l'aveu : l'étude de l'électricité est de nature à décourager les simples curiosités.

Séduisante et pleine d'imprévus pour celui qui s'y livre d'une manière habituelle, elle apparaît aux débutants hérissée de calculs et de notations que des décisions récentes viennent seulement d'unifier. Les théories y sont parfois brumeuses et

sujettes à controverse. La langue enfin y est nouvelle et dès lors peu fixée.

Le but très modeste de cet ouvrage a été d'épargner de telles aridités aux personnes de bonne volonté qui voudront bien en tenter la lecture.

Une seule partie de l'étude de l'électricité, la production de l'énergie électrique, y a été abordée, la description des procédés d'utilisation de l'énergie électrique devant faire l'objet d'un volume spécial de cette collection. Encore n'ai-je pu traiter le sujet d'une manière complète. Les nécessités du mode d'exposition qui m'était imposé m'obligeaient à faire un choix parmi des phénomènes dont le nombre est considérable, mais qui tous ne présentent pas le même intérêt au point de vue des applications.

On voudra bien également me pardonner si, désireux de fournir à l'esprit des représentations à la fois précises et familières, j'ai dû parfois m'écarter des théories admises ou passer sous silence des faits dont l'explication eût entraîné un développement hors de proportion avec le cadre du livre.

Je dois, en terminant, signaler l'aide singulière que m'a apportée dans mon travail la lecture d'œuvres justement couronnées par le succès, et parmi lesquelles il convient de citer les travaux de MM. Cornu, Eric Gérard, Janet, de Nerville, etc. Je ne puis d'ailleurs mieux en témoigner ma reconnaissance qu'en y renvoyant les lecteurs qui, mis en goût par une première connaissance des phénomènes électriques, seraient désireux d'en approfondir l'étude.

É. ESTAUNIÉ.

LES SOURCES D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

INTRODUCTION

LES UNITÉS ÉLECTRIQUES

1. — Depuis moins de vingt années, l'industrie assiste à l'une des plus merveilleuses révolutions scientifiques que l'histoire ait jamais enregistrées. L'électricité a quitté le domaine de la théorie pure et est devenue une force docile, infiniment variée dans ses applications. Sans rien perdre de son mystère, elle s'est pliée aux besoins les plus divers, est entrée dans la vie humaine et s'est montrée à la fois si utile et si maniable qu'on se plaît à attendre d'elle la solution de problèmes jusqu'ici qualifiés de chimériques.

Si les applications industrielles contribuent relativement pour une faible part au développement des conceptions théoriques, elles ont l'avantage d'éclairer et de matérialiser, en quelque sorte, la notion des grandeurs dont elles utilisent la mise en jeu.

L'emploi journalier des forces électriques devait ainsi fatalement créer le besoin d'une langue nouvelle et provoquer la détermination d'une série d'unités de mesure spéciales. C'est ce qui a eu lieu.

Un tel résultat est d'autant plus précieux que, sauf dans des cas particuliers, aucune impression des sens ne permet à

l'homme de se rendre compte de l'état électrique des corps. L'esprit ne trouve pas, en électricité, les repères expérimentaux qui, pour la chaleur, la lumière ou le son, facilitent son examen, et il a fallu une suite d'admirables efforts rationnels pour arriver à la connaissance des lois qui régissent une force physique si éloignée de nos perceptions habituelles.

Aujourd'hui, grâce à la vulgarisation industrielle, la notion du courant, par exemple, correspond à une idée parfaitement nette. Il importe peu, du reste, comme on le verra plus loin, que cette notion soit ou non l'exacte réalité. L'essentiel est qu'elle facilite l'interprétation des phénomènes et se prête à des évaluations numériques commodes.

Avant toute description des appareils producteurs d'électricité, il est nécessaire d'expliquer brièvement quelles sont les grandeurs ainsi mises en lumière, quels mots les désignent, quels procédés permettent soit de les comparer entre elles, soit de les évaluer numériquement. Si sommaire que soit cette étude, elle permettra de préciser des définitions dont le sens a pu paraître obscur aux lecteurs étrangers aux études électriques, et de donner la clef de nombreux termes nouveaux entrés désormais dans la pratique.

I. — UNITÉS MÉCANIQUES

2. — Définitions. — On appelle *force* toute cause capable de modifier un état de repos ou de mouvement.

Une force agissante produit un *travail*.

Toutes les manifestations physiques, se réduisant en fait à des modifications d'état de repos ou de mouvement, mettent en évidence l'existence et le travail d'une ou plusieurs forces agissantes. On conçoit donc que leur mesure puisse s'exprimer en dernière analyse à l'aide des unités qui servent à évaluer ces deux éléments primitifs : la force et le travail.

Les relations mécaniques élémentaires montrent que la force

et le travail sont uniquement fonctions de trois grandeurs : la masse, le temps et la longueur.

On choisit arbitrairement les unités permettant de mesurer ces trois grandeurs. Ces unités sont dites *fondamentales*. Toutes les autres grandeurs physiques peuvent être exprimées à l'aide d'unités dérivant d'elles, à condition de connaître la relation algébrique les unissant aux grandeurs fondamentales.

On sait, par exemple, que la vitesse d'un mobile parcourant un chemin donné l en un temps t , est donnée par l'équation :

$$v = \frac{l}{t}.$$

Si l'on pose $l = 1$ et $t = 1$, on aura $v = 1$: C'est l'*unité de vitesse*; cette unité représente donc la *vitesse d'un mobile animé d'un mouvement uniforme qui parcourt l'unité de longueur dans l'unité de temps*.

Les unités ainsi choisies sont dites *dérivées*; elles sont d'avance déterminées d'une façon concrète par le choix des unités fondamentales.

3. — Unités mécaniques fondamentales. — En électricité, les unités fondamentales universellement adoptées sont le *centimètre*, la *masse du gramme* et la *seconde*. On désigne le système d'unités qui dérive de ce choix sous le nom de *système C. G. S.*

Le *centimètre* est la centième partie du mètre étalon mesuré par Delambre et Borda.

La *masse du gramme* est la masse d'un centimètre cube d'eau distillée à 4° centigrades.

La *seconde* est la 86 400° partie du jour solaire moyen.

4. — Unités mécaniques dérivées. — Les principales unités mécaniques dérivées dont il est fait usage sont, dans ce système :

1° L'*unité de force* appelée *dynes*, ou force qui appliquée à la

masse du gramme donnerait une accélération de un centimètre en une seconde.

2° L'*unité de travail* appelée *erg*, ou travail accompli par une dyne déplaçant son point d'application, dans sa propre direction, suivant un centimètre.

En outre, quand il s'agit de machines, la simple notion du travail effectué renseignerait sur leur compte d'une manière insuffisante. Des machines fort diverses sont susceptibles de fournir un travail égal, à condition d'y employer des temps différents. Il convient, pour les caractériser exactement, d'indiquer le travail que chacune d'elles a produit dans un même temps. Si ce travail est égal pour toutes, on dit alors qu'elles ont même puissance.

La *puissance* d'une machine est le travail que peut fournir cette machine dans l'unité de temps. C'est une quantité bien distincte du travail proprement dit, puisqu'elle s'obtient en prenant le rapport de ce travail à un temps.

L'*unité de puissance* est celle qui développe l'unité de travail — un erg — dans l'unité de temps — une seconde. —

5. — Unités mécaniques pratiques. — L'ordre des grandeurs mesurées dans la pratique courante amène parfois à substituer aux unités dérivées, qui viennent d'être définies, d'autres unités qui en sont des multiples connus. C'est le cas habituel en électricité.

Ces nouvelles unités portent le nom d'*unités pratiques*.

L'unité pratique de force est ainsi le *poids du gramme*, c'est-à-dire la force capable, sous la latitude de Paris, d'imprimer à l'unité de masse une accélération de 981 centimètres. Elle équivaut à 981 dynes.

L'unité pratique de puissance est le *cheval-vapeur*, qui vaut 736×10^7 ergs par seconde.

II. — GRANDEURS ÉLECTRIQUES

6. — Notions générales sur les grandeurs électriques.

— Avant de définir les unités dérivées et les unités pratiques usitées pour la mesure des grandeurs électriques, il convient maintenant d'éclaircir d'une manière élémentaire la notion même de ces grandeurs.

On a vu précédemment que les manifestations physiques avaient pour résultat de déceler l'existence et le travail d'une ou plusieurs forces agissantes. L'analyse ne va pas au delà. L'essence intime de ces forces demeure inconnue. Le rôle du physicien se borne à émettre des hypothèses à son sujet.

Ces hypothèses, toujours perfectibles, ont pour but de faciliter le groupement des faits, mais ne prétendent nullement expliquer la mystérieuse réalité.

Une telle ignorance des causes qu'aucune science ne pourra dissiper justifie l'assimilation très usitée de phénomènes distincts, mais qui obéissent à des lois apparentes communes. Supposons, par exemple, que l'expression des forces électriques soit identique à celle d'autres forces naturelles bien étudiées. Les théorèmes applicables à ces dernières pourront être étendus aux forces électriques, quitte à n'admettre cette généralisation qu'après une vérification expérimentale qui seule fera foi. Ce procédé d'investigation a le double avantage de tracer la voie aux recherches et de fournir à l'esprit un mode de représentation des faits qui peut lui être d'une aide singulière.

C'est l'immortelle gloire de Coulomb d'avoir démontré que les forces électriques et les forces centrales newtoniennes pouvaient être exprimées d'une manière identique.

On sait que les forces newtoniennes sont telles qu'elles passent par des points définis appelés centres de force et que leurs inten-

sités sont inversement proportionnelles au carré des distances entre les centres agissants.

Rien d'ailleurs ne nous renseigne sur l'origine de ces forces.

Newton, pour plus de simplicité, a supposé, dans le cas de la gravitation, qu'elles étaient produites par la masse même des corps. On peut aussi bien imaginer qu'elles sont dues à un agent de nature inconnue et répandu sur la surface des corps dont elles paraissent émaner.

Dans les deux cas, les intensités de ces forces sont évidemment proportionnelles au produit des masses ou des quantités d'agent agissantes, m et m' , et leur expression algébrique est la suivante :

$$f = k \frac{mm'}{r^2},$$

ou k est un facteur de proportionnalité et r la distance qui sépare les masses agissantes.

En constatant expérimentalement que l'action des forces électriques était semblable à celle des forces newtoniennes, Coulomb a eu l'idée de les assimiler : il a étendu aux forces électriques l'hypothèse précédente, et supposé qu'elles étaient dues à une certaine quantité d'un agent spécial répandu sur la surface des corps électrisés.

Il en est résulté la notion d'une première grandeur, la *masse électrique* ou *quantité d'électricité*. Cette masse est de nature totalement inconnue : c'est une entité fictive, commode pour la représentation des faits, ou mieux un facteur proportionnel aux effets produits par les forces électriques; mais on ne peut, en aucune façon, présumer de sa réalité.

L'expression de la force électrique, analogue à celle de la force newtonienne :

$$f = k \frac{mm'}{r^2},$$

suffit d'ailleurs pour définir cette masse. Elle est une quantité telle

que la force électrique agissant entre deux de ces masses infiniment petites soit dirigée suivant la ligne qui joint ces masses, proportionnelle à leur produit, et en raison inverse du carré de leur distance.

Nous venons de dire que la masse électrique était analogue à la masse proprement dite dans le cas de la gravitation, que les forces électriques s'exprimaient algébriquement de la même façon que les forces de la gravitation.

Voici donc deux ordres de faits très voisins, les phénomènes électriques et les phénomènes dus à la gravitation. Les premiers sont inconnus, difficiles à surprendre, et échappent le plus souvent à nos sens. Les autres, au contraire, sont d'une nature qui en a permis depuis longtemps l'observation et l'analyse.

Appliquons à l'étude des premiers le procédé d'investigation que nous avons indiqué et cherchons à leur étendre quelques-unes des lois de la gravitation. Il suffira pour cela de découvrir deux expériences, l'une électrique, l'autre due aux forces newtoniennes, qui présentent des analogies apparentes, et d'en rapprocher les éléments.

Ces deux expériences sont faciles à trouver.

Considérons d'abord deux vases communicants, réunis par un tube qu'une clef permet d'ouvrir ou de fermer. Supposons, en outre, que la clef soit fermée, que l'un des vases soit rempli d'eau et l'autre vide.

Au moment où l'on tournera la clef du tube, nous constaterons que l'eau passe d'un vase dans l'autre avec une certaine vitesse variable qui dépend de la différence des niveaux de l'eau dans chacun des vases, des dimensions et de la nature du tube de communication. L'équilibre sera rétabli quand les niveaux seront devenus les mêmes dans chacun des vases.

En examinant attentivement le phénomène, nous y distinguons l'intervention de grandeurs diverses.

Nous avons en effet constaté :

- 1° Un mouvement des masses du liquide ;
- 2° Une différence de niveau, ou mieux une différence de pression déterminant le mouvement ;
- 3° Des débits du liquide variables à tout instant, en désignant par débit les quantités d'eau qui passent à travers une section déterminée du tube, dans un temps très court. Les valeurs de ce débit dépendaient des différences successives des niveaux dans les vases, de la longueur, de la section et de la nature de la surface intérieure du tube.

Lorsque l'équilibre a été rétabli, le liquide s'est partagé entre les deux vases dans une proportion déterminée. Une analyse immédiate permet de reconnaître, s'ils sont cylindriques, que cette proportion est précisément celle des sections, ou, ce qui revient au même, que les volumes du liquide contenus dans chacun des vases sont proportionnels à la capacité de ces vases. C'est un rapport constant.

Enfin, il est évident que le transport du liquide, d'un récipient dans l'autre, aurait pu être utilisé pour la production d'une certaine quantité de travail. Il aurait suffi, par exemple, d'interposer sur le trajet du liquide une petite turbine, une roue à ailettes, ou tout autre appareil du même genre.

Considérons maintenant une sphère électrisée et mettons-la en communication avec une autre sphère à l'état neutre par l'intermédiaire d'un long fil.

Au moment du contact, une légère étincelle manifeste le passage d'une certaine quantité d'électricité d'une sphère sur l'autre. Une aiguille aimantée, placée près du fil, subit également une brusque oscillation, caractéristique d'un déplacement d'électricité dans son voisinage.

A partir de cet instant, on constate que les deux sphères sont électrisées et demeurent, chacune, chargées de quantités différentes d'électricité. Une expérience à l'aide du plan d'épreuve de Coulomb permet de déterminer le rapport de ces nouvelles charges

et de constater qu'il est représenté par le rapport des rayons des sphères, c'est-à-dire par un nombre constant.

L'analogie entre cette expérience et la précédente est complète. Comme dans le cas des vases communicants, nous sommes donc portés à admettre qu'un certain nombre des masses électrisées retenues à la surface de la première sphère se sont transportées le long du fil avec des vitesses variables qui dépendaient en particulier des conditions physiques de celui-ci, et que ce transport a eu lieu sous l'action d'une différence de niveau électrique. Quand cette différence s'est annulée, ou, si l'on préfère, quand les niveaux électriques sont devenus identiques dans les deux sphères, l'équilibre s'est rétabli, et les masses électriques ont dû se répartir comme le liquide dans les deux vases, proportionnellement à leurs *capacités électriques*.

Le mouvement de l'aiguille aimantée a manifesté en outre que le déplacement des masses électriques était susceptible de produire un certain travail.

Quatre notions nouvelles dérivent de cette analogie :

1° La notion d'une *pression*, résultant d'une différence de niveau électrique, origine des courants électriques;

2° La notion de la *capacité* électrique d'un conducteur;

3° La notion d'un *courant* électrique ou transport de masses électriques le long d'un conducteur;

4° La notion d'un *travail* produit par les forces électriques.

Analysons-les séparément, en nous laissant encore guider par les lois de l'hydrostatique, qui nous ont déjà si bien servi.

7. — Niveau électrique, Force électromotrice. — Le niveau électrique est appelé *potentiel*.

De même que, pour définir le niveau d'une masse de liquide située en un point quelconque du globe, il est nécessaire de le comparer à un autre niveau choisi arbitrairement pour zéro (géné-

ralement le niveau de la mer), le niveau électrique ne s'évalue que par rapport au niveau électrique d'un conducteur déterminé.

On a choisi, en pratique, le conducteur le plus à la portée de tous les expérimentateurs, c'est-à-dire la terre, et l'on dit que le potentiel de la terre est *nul*. Il convient de bien déterminer le sens de cette expression. On dit semblablement que le niveau de la mer est égal à zéro, que la température de la glace fondante est égale à zéro : cela ne signifie pas que le potentiel de la terre, le niveau de la mer, ou la température de la glace fondante n'existent pas, mais simplement qu'ils sont pris pour origine des échelles de mesure.

Si, dans l'expérience électrique qui a été décrite plus haut, on déplace arbitrairement sur l'une ou l'autre des deux sphères les extrémités du fil de communication, après le premier contact, on ne constate plus aucun mouvement d'électricité. Ce fait prouve que, dans un conducteur en équilibre électrique, le niveau ou, ce qui revient au même, le potentiel est constant.

C'est ce qui justifie le choix du potentiel de la terre comme potentiel zéro. On assimile le globe terrestre à un conducteur parfait, en équilibre. On assimile de même la surface de la mer à une surface rigoureusement sphérique.

Grâce à ce choix, tout expérimentateur possède à sa portée un conducteur étalon, au potentiel duquel il lui est possible de comparer, avec une approximation grossière, les potentiels qu'il désire mesurer.

De même qu'à une différence de niveaux entre deux masses de liquides correspond une pression, de même, à une différence de niveaux électriques, doit correspondre une pression électrique. C'est cette pression qui détermine le mouvement des masses électriques. On la désigne sous le nom de *tension* ou *force électromotrice*.

8. — **Capacité électrique.** — Dans un vase cylindrique déterminé, on sait que la hauteur du niveau varie proportionnel-

lement à la quantité de liquide versé, et en raison inverse de la section.

Puisque nous avons assimilé la capacité électrique d'un conducteur à la section d'un vase cylindrique, et la charge à la quantité de liquide remplissant ce vase, le théorème qui précède nous amène à l'énoncé électrique suivant :

Le potentiel électrique V d'un conducteur croît proportionnellement à la quantité d'électricité Q qui charge ce conducteur et en raison inverse de sa capacité C,

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

On déduit de cette égalité :

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

Cette relation algébrique nous permet de définir d'une manière précise la capacité électrique d'un conducteur. C'est le rapport de la charge électrique de ce conducteur au potentiel qui, dans ce même conducteur, correspond à cette charge.

Pour qu'une pareille définition soit justifiée, il suffit de vérifier que ce rapport est bien réellement une quantité définie, constante pour un conducteur donné ; c'est ce que l'expérience prouve.

9. — **Courant électrique.** — Le dispositif expérimental qui a été décrit précédemment a mis en évidence l'existence d'un transport de masses électriques le long d'un conducteur, analogue au débit du liquide dans le tube reliant deux vases communicants.

Ce transport dépendait de la différence des niveaux à ses extrémités, différence qui variait à tout instant, et des dimensions du tube que nous avions supposées quelconques. C'étaient là des conditions délicates, peu propices à une analyse approfondie.

Supposons, au contraire, qu'au lieu de mettre en communication par un conducteur indéterminé deux sphères inégales dont l'une seulement est électrisée, nous ayons réuni par un fil de cuivre

de section uniforme les deux pôles d'une pile. Nous constaterons alors qu'une aiguille aimantée, approchée du fil, est encore déviée comme auparavant ; mais au lieu de revenir ensuite à sa position d'équilibre, elle conserve sa déviation, et l'angle qui mesure cette déviation garde la même valeur tant que dure l'expérience.

Le transport de masses électriques, ou le courant, si l'on préfère, a lieu cette fois d'une manière continue. Puisque nous reconnaissons sa présence à l'effet produit sur l'aiguille, il est naturel en effet de conclure de la constance de cet effet à la constance de la cause. Le courant étant déterminé par une différence de niveau électrique, il faut, en outre, que, par le jeu de la pile, une différence de niveau, toujours la même, ait été maintenue aux deux extrémités du fil. La force électromotrice de la pile doit être constante.

Une expérience hydrostatique semblable est facilement réalisable. Il suffit d'imaginer encore deux vases communicants réunis par un tube cylindrique par exemple, entre lesquels on entreprendrait par un procédé quelconque une différence de niveau toujours la même.

Les lois approximatives de l'écoulement permanent des liquides nous fournissent dans ce cas l'énoncé suivant :

Le débit dans l'unité de temps par un tube de communication est proportionnel à la différence de niveau à ses extrémités et en raison inverse de la résistance du tube.

Désignons par le mot *intensité du courant* le débit électrique analogue au débit du liquide. Par définition, cette intensité représentera la quantité d'électricité qui traverse dans l'unité de temps une section du fil conducteur. Une telle assimilation du débit électrique et du débit du liquide est justifiée. On constate, en effet, que si l'on fait passer un courant d'électricité produit par une machine statique dans un galvanomètre, l'aiguille de celui-ci est déviée proportionnellement à la vitesse de rotation de la machine qui produit le courant, c'est-à-dire précisément au débit électrique de celle-ci.

Nous pouvons maintenant étendre le théorème hydrostatique indiqué plus haut au cas du courant. Son énoncé devient alors :

L'intensité d'un courant électrique parcourant un fil donné est proportionnelle à la différence de potentiel existant entre les deux extrémités du fil et en raison inverse de la résistance de celui-ci.

Cette loi, vérifiée expérimentalement par Ohm, s'énonce algébriquement :

$$[1] \quad i = \frac{e}{r},$$

i étant la valeur de l'intensité du courant ou du débit électrique, e la différence de potentiel aux extrémités du fil, r une certaine quantité dépendant de la nature et des dimensions du fil et qu'on appelle sa *résistance électrique*.

Cette résistance est évidemment d'autant plus grande que le conducteur est lui-même plus long et que sa section est plus faible; elle peut donc s'écrire sous la forme :

$$r = r_1 \frac{l}{s},$$

l et s étant la longueur et la section, et r_1 un certain coefficient dépendant de la nature de la matière employée pour le conducteur. Ce coefficient porte le nom de *résistance spécifique* du conducteur.

La formule [1] devient en y remplaçant r par cette valeur :

$$[2] \quad i = \frac{e}{r_1 \frac{l}{s}}.$$

En écrivant la formule [1] représentant la loi de Ohm sous la forme suivante :

$$[3] \quad e = r i,$$

on voit qu'aux extrémités d'un fil ou d'une portion de fil de longueur donnée, et traversée par un courant d'intensité déterminée, il existe une différence de potentiel e égale au produit de la résistance r considérée par l'intensité i du courant.

C'est un énoncé différent du même théorème ; mais cet énoncé a l'avantage précieux de montrer qu'il existe un potentiel tout le long des conducteurs, et que ceux-ci produisent toujours, comme en hydrodynamique, une *perte de charge* proportionnelle à leur longueur.

Il est quelquefois intéressant de considérer non plus seulement la quantité totale d'électricité qui traverse un conducteur en une seconde (c'est l'intensité du courant telle qu'on l'a définie plus haut), mais celle qui traverse dans ce même temps l'unité de section de ce conducteur.

Si l'on admet que celui-ci soit homogène, il est certain que des quantités d'électricité équivalentes traverseront simultanément des portions équivalentes de la section. On obtiendra donc la valeur cherchée en prenant le rapport $\frac{i}{s}$ de la quantité totale d'électricité qui a passé en une seconde à la section du conducteur.

Ce rapport est appelé la *densité* du courant.

10. — **Travail des forces électriques.** — Dans chacune des deux expériences d'hydrostatique exposées précédemment, la chute du liquide passant d'un niveau à un autre était susceptible de produire un certain travail qu'il était facile d'évaluer.

Considérons en particulier le cas où le liquide tombe, à travers un tube de communication, d'un niveau déterminé à un autre niveau également fixe. Ce travail dépensé est alors égal au produit de la quantité de liquide écoulée par la différence des deux niveaux.

On en déduit immédiatement par analogie que le travail produit par le passage d'un courant d'intensité déterminée dans un conducteur donné, est exprimé par le produit de la quantité d'électricité écoulée par la différence des potentiels aux deux extrémités du conducteur.

Nous avons appelé intensité i du courant la quantité d'électricité qui traverse la section du conducteur dans l'unité de temps :

celle qui est débitée dans un temps t est t fois plus grande et exprimée par le produit it :

$$q = it.$$

Le travail fourni par ce courant d'intensité i pendant le temps t sera donc donné par le produit $e it$, de la différence de potentiel e , aux extrémités du conducteur, par la quantité it d'électricité qui s'est écoulée :

$$[4] \quad T = e it.$$

En substituant dans cette expression la valeur de e tirée de la loi de Ohm [3], elle devient

$$[5] \quad T = r i^2 t.$$

Si le conducteur que nous étudions n'a eu à produire aucun travail mécanique, il est nécessaire que l'énergie qu'il absorbe se retrouve sous une autre forme. Joule a vérifié que cette énergie est entièrement transformée en chaleur au sein du conducteur.

Cette constatation expérimentale est la justification des analogies qui nous ont conduit aux divers résultats qui précèdent.

Nous avons supposé que le conducteur étudié n'avait à produire aucun travail mécanique.

S'il n'en est pas ainsi, l'énergie qu'il absorbe n'est pas tout entière employée à l'échauffer.

La relation [5] doit alors s'écrire :

$$T = r i^2 t + W,$$

W représentant l'énergie consacrée à la production du travail mécanique.

On tire de cette nouvelle égalité en tenant compte de la relation [4] :

$$e = r i + \frac{W}{i t}$$

et

$$e - \frac{W}{i t} = r i.$$

Tout se passe donc en réalité comme si la force électromotrice e était diminuée d'une certaine quantité égale à $\frac{W}{it}$, ou bien encore comme s'il existait dans le conducteur une force électromotrice égale à $\frac{W}{it}$ opposée à la force électromotrice e et tendant à en diminuer l'effet. On dit alors que le conducteur est le siège d'une *force contre-électromotrice*, dont la valeur est précisément représentée par $\frac{W}{it}$, W étant l'énergie absorbée par la production du travail mécanique, et it la quantité d'électricité qui a passé dans le conducteur.

11. — **Puissance électrique.** — On peut considérer le conducteur comme une machine rudimentaire et chercher à évaluer sa puissance.

Rappelons que la puissance d'une machine est le travail qu'elle produit dans l'unité de temps.

Si le travail effectué par le courant pendant t unités de temps, a pour valeur eit [4], ce travail sera t fois moindre dans l'unité de temps et égal seulement à ei . C'est précisément l'expression de la puissance cherchée :

$$[6] \quad P = ei.$$

Il y a lieu de remarquer que, dans tout ce qui précède, nous nous sommes servis, pour nous guider, d'expériences choisies indistinctement parmi les phénomènes électrostatiques et électrodynamiques. Il n'existe pas, en effet, de différence entre eux. Tout transport électrique, dans quelques conditions qu'on l'imagine, implique toujours l'existence d'une force électromotrice qui le provoque et d'une certaine quantité d'électricité transportée. Ce sont de simples différences dans les valeurs relatives de ces deux éléments qui ont conduit autrefois les physiciens à admettre deux classes de faits électriques; cette séparation n'a pas sa raison d'être.

Les phénomènes électrostatiques sont caractérisés par le transport de très faibles quantités d'électricité, sous l'action de forces électromotrices extrêmement élevées.

Les phénomènes électro-dynamiques sont, au contraire, caractérisés par le transport de quantités considérables d'électricité sous l'action de forces électromotrices assez faibles.

Dans les deux cas, la nature des forces mises en jeu et les lois auxquelles elles obéissent sont identiques.

III. — UNITÉS ÉLECTRIQUES

12. — Unités électriques dérivées. — Les quatre grandeurs électriques dont nous avons reconnu l'existence sont : la *quantité d'électricité*, la *capacité électrique*, le *potentiel électrique* et le *travail des forces électriques*. Accessoirement, nous avons été amenés à leur en joindre deux autres, l'*intensité du courant* et la *résistance* des conducteurs.

Ces diverses grandeurs sont d'ailleurs liées entre elles par les relations suivantes :

$$[7] \quad c = \frac{q}{e},$$

$$[8] \quad q = it,$$

$$[9] \quad e = ri,$$

$$[10] \quad T = ri^2 t.$$

Définissons maintenant les unités qui serviront à les mesurer.

Il est nécessaire pour cela de déterminer, pour l'une d'elles, la relation algébrique qui la lie aux trois grandeurs fondamentales, la longueur, la masse et le temps.

L'expression de la force résultant de l'action, sur un pôle d'aimant, d'un fil de longueur donnée dans lequel passe un courant, a été calculée par Laplace à la suite des expériences d'Ampère,

de Biot et de Savart. En particulier, supposons que le courant parcourt un cadre circulaire de longueur l et qu'un pôle d'aimant chargé d'une certaine masse magnétique ait été placé au centre de ce cadre : Laplace a démontré que la force à laquelle était soumis, dans ce cas, le pôle d'aimant, était — en direction — normale au plan du cadre, et — en grandeur — proportionnelle à la masse magnétique m du pôle, à la longueur du fil l , à l'intensité du courant i , et en raison inverse du carré de la distance R des éléments de fil agissants au pôle. (Dans ce cas, cette distance est constante et égale au rayon du cercle.)

Cette valeur de la force peut donc s'écrire :

$$F = K \frac{ilm}{R^2},$$

On déduit de cette relation :

$$[11] \quad i = \frac{1}{K} \frac{FR^2}{lm}.$$

Ou bien encore, en tenant compte de l'égalité [8]

$$q = \frac{tFR^2}{Klm}.$$

Dans cette équation, les quantités F , R^2 , l et t sont mesurables ; nous avons en effet déterminé précédemment les unités de force, de longueur et de temps. Le coefficient K est numérique et peut être considéré, pour plus de simplicité, comme égal à l'unité. En revanche les unités de quantité d'électricité et de masse magnétique sont inconnues : nous voyons seulement qu'elles dépendent l'une de l'autre, et que le fait de déterminer la première entraîne la détermination de la seconde ou inversement.

Il faut donc se fixer *a priori* l'une ou l'autre de ces unités. Une telle fixation comporte nécessairement une part d'arbitraire ¹ :

1. S'agit-il par exemple de choisir *a priori* l'unité de masse électrique : on a vu que l'équation servant de définition à la masse électrique contient un coefficient dont les dimensions sont inconnues. Il faut cependant pour l'occasion admettre qu'il est numérique

mais une fois faite, on peut en déduire tout un système d'unités électriques, système qui sera lui-même, on le comprend, arbitraire et conventionnel.

Si l'on se donne l'unité de masse électrique, le système d'unités qui en résulte, est dit *électrostatique*.

Si l'on se donne au contraire l'unité de masse magnétique, le système d'unités correspondant est dit *électromagnétique*.

Ce dernier seul conduit à l'adoption d'unités vraiment courantes. Il est à peu près exclusivement employé dans la pratique. Aussi ne nous occuperons-nous que de lui.

L'unité de masse magnétique choisie et qui lui sert de base est celle qui, agissant à l'unité de distance — un centimètre — sur une masse magnétique identique, la repousserait avec une force égale à l'unité — une dyne — dans le vide.

En tenant compte de cette convention, et en supposant comme on l'a dit plus haut que le coefficient K soit égal à l'unité, l'unité d'intensité dans le système électromagnétique C. G. S. sera définie à l'aide de la relation [11], et nous dirons que c'est l'intensité d'un courant qui, parcourant un cercle de 1 centimètre de rayon, produit par unité de longueur (1 centimètre) l'unité de force (1 dyne) sur l'unité de pôle magnétique placée au centre du cercle.

Les relations algébriques [7, 8, 9, 10] qui lient entre elles l'intensité et les autres grandeurs électriques servent ensuite à déterminer les unités qui manquent encore.

D'après la relation [8], l'unité de quantité d'électricité est la quantité transportée dans une seconde par l'unité du courant.

L'unité de résistance se déduit de la loi de Joule [10] : c'est la résistance du conducteur dans lequel l'unité d'intensité développe l'unité de chaleur dans l'unité de temps.

La loi de Ohm [9] permet de fixer l'unité de force électromotrice : c'est la force électromotrice qui produit l'unité de courant dans l'unité de résistance.

Enfin, puisque la capacité [7] est le rapport de la quantité d'électricité chargeant un conducteur, au potentiel du conducteur corres-

pendant à cette charge, l'unité de capacité sera celle du conducteur qui, chargé de l'unité de quantité d'électricité, est au potentiel unité.

Il est clair que rien ne différenciant le travail d'une force électrique d'un travail mécanique quelconque, l'unité de travail demeure l'erg.

13. — Unités électriques pratiques. — La plupart des unités ainsi choisies ont des valeurs qui diffèrent beaucoup de celles des grandeurs que la pratique amène à mesurer. Cent mètres de fil de fer de 4 millimètres de diamètre représenteraient, par exemple, un milliard d'unités de résistance.

On a donc eu recours à l'emploi d'unités électriques pratiques, qui sont des multiples ou sous-multiples bien connus des unités précédentes.

Ces unités pratiques sont les suivantes :

1° L'*ohm*, qui vaut 10^9 unités C. G. S. de résistance.

L'*ohm* peut être défini physiquement la résistance offerte à un courant invariable par une colonne de mercure de section constante, ayant à la température de la glace fondante une masse de $14^{\text{gr}},4521$ et une longueur de $106^{\text{cm}},3$. On s'en fera encore une idée approximative en sachant qu'il est à peu près représenté par la résistance de 100 mètres de fil de fer de 4 millimètres de diamètre, ou de $0^{\text{m}},50$ de fil de cuivre rouge de 1 millimètre de diamètre.

2° L'*ampère*, qui est le dixième de l'unité C. G. S. d'intensité.

Un courant de 1 ampère dépose en une seconde environ $4^{\text{mmg}},118$ d'argent et $0^{\text{mmg}},327$ de cuivre, en décomposant un sel de ces métaux.

3° Le *volt*, qui vaut 10^8 unité C. G. S. de force électromotrice.

On peut encore le définir : la force électromotrice qui soutient un courant d'un ampère dans un conducteur dont la résistance est un ohm.

L'*ohm*, l'*ampère* et le *volt* sont donc des unités corrélatives,

c'est-à-dire qui doivent s'employer simultanément. Elles se correspondent, comme le font dans le système métrique, par exemple, le mètre, le mètre carré, le mètre cube. Il en est de même pour toutes les unités pratiques qui suivent.

4° Le *coulomb*, qui est le dixième de l'unité C. G. S. de quantité d'électricité : c'est la quantité d'électricité que débite un courant d'un ampère en une seconde.

5° Le *farad*, qui vaut 10^{-9} unités C. G. S. de capacité. C'est la capacité d'un condensateur qui contiendrait un coulomb quand la différence de potentiel entre ses plaques est de 1 volt. Cette unité est encore trop grande et l'on emploie souvent à sa place le *microfarad*, qui est la millionième partie du farad.

On se rappelle que les unités pratiques mécaniques de travail et de puissance sont le kilogrammètre et le cheval-vapeur. En électricité, on fait usage fréquemment de deux autres unités pratiques pour ces grandeurs; ces nouvelles unités sont définies de telle sorte que leur rapport avec les unités électriques pratiques soit des plus simples.

L'unité pratique de travail électrique est le travail que produit le transport d'un coulomb sous une différence de potentiel d'un volt. On lui a donné le nom de *joule*. Elle vaut 10^7 ergs ou $\frac{1}{9,81}$ de kilogrammètre.

On a vu que le travail électrique est exprimé par le produit de la force électromotrice, de l'intensité du courant et du temps employé à le fournir [4].

Supposons qu'un courant de dix ampères circule dans un conducteur durant une minute, sous une différence de potentiel de cinq volts : le travail effectué par ce courant sera de (10×60) coulombs $\times 5$ volts = 3000 joules.

L'unité pratique de puissance est la puissance d'une machine débitant en une seconde un ampère, sous une différence de potentiel de un volt [6]. Elle se nomme le *watt*. La puissance en watts

s'obtient simplement en effectuant le produit des volts par les ampères. On utilise fréquemment des multiples du watt, l'hectowatt qui vaut cent watts, le kilowatt qui en vaut mille, etc.

Le kilowatt vaut 1,36 cheval-vapeur.

Dans le cas du courant que nous avons supposé plus haut, la puissance développée aurait été de 50 watts.

IV. — ÉNERGIE.

14. — Définition de l'énergie. — Il importe, avant de commencer notre étude, de définir enfin le principe sur lequel repose la physique moderne.

On désigne sous le nom générique d'*énergie* la capacité d'activité de la matière.

Cette activité est une propriété de la matière localisée avec elle. Elle affecte des formes très diverses les unes des autres, se manifestant par des effets dont quelques-uns sont perceptibles à nos sens, mais dont un grand nombre sans doute nous échappent encore.

Les formes d'énergie qui ont pu être expérimentalement reconnues portent des noms particuliers : ce sont l'énergie mécanique, l'énergie calorifique, l'énergie électrique, l'énergie magnétique, l'énergie élastique, l'énergie chimique.

Ces noms ne possèdent qu'une simple valeur de notation. Ils n'ont en aucune façon la prétention d'expliquer des phénomènes dont la nature nous échappe.

A mesure que la science prête aux sens le secours de nouveaux instruments de précision, elle permet d'analyser des phénomènes que ni les yeux ni les doigts n'auraient pu distinguer. Le nombre des formes de l'énergie reconnues est donc appelé à s'accroître en même temps que se perfectionneront les méthodes d'observation.

15. — Mesure de l'énergie. — On vient de voir que les

différentes formes de l'énergie n'étaient manifestées à nos sens que par leurs effets, c'est-à-dire par des modifications dans les états de la matière.

Il est naturel d'admettre que l'énergie entrée en action est d'autant plus considérable que ces effets sont plus grands. En mesurant ces effets, on a donc la mesure de l'énergie correspondante. Le travail mécanique d'un corps mesure ainsi l'énergie mécanique mise en action dans ce corps.

Il convient dès lors de ne pas confondre l'*énergie*, qui correspond à une réalité, avec le *travail*, qui est une conception mathématique, permettant d'évaluer numériquement l'*effet* de l'énergie. Fréquemment, il est vrai, les termes énergie et travail sont pris l'un pour l'autre, mais c'est une confusion regrettable et qui doit être soigneusement évitée.

On remarquera, en second lieu, que le travail ne mesure que la quantité d'énergie *manifestée* dans les corps au cours du phénomène étudié, et nullement l'énergie totale disponible dans ces corps.

16. — Transformations de l'énergie. — Les différentes formes de l'énergie sont distinctes et ne présentent en apparence aucun caractère commun. L'énergie élastique, par exemple, ne semble pas persister dans les corps imparfaitement élastiques, mais se transforme spontanément en chaleur ; de même, l'énergie électrique se dissipe instantanément en chaleur dans les corps bons conducteurs, etc.

Si l'on examine les divers phénomènes naturels, l'observation prouve cependant que ces formes, en apparence étrangères, jouissent de la propriété de pouvoir se transformer directement ou indirectement les unes dans les autres. Un courant électrique, par exemple, est susceptible de produire une aimantation et des mouvements mécaniques, de déterminer des réactions chimiques : il chauffe les conducteurs qu'il traverse, et produit des étincelles lumineuses.

Les phénomènes physiques donnent tous des exemples de ces transformations d'énergie, et il paraît inutile d'insister ici sur une démonstration que l'expérience journalière fortifie sans cesse.

17. — **Équivalence des énergies.** — Il a semblé rationnel de se demander, en présence de ces multiples transformations, si chaque forme d'énergie ne se métamorphose pas en une quantité équivalente d'une ou plusieurs autres formes d'énergie. On s'est donc efforcé d'évaluer quantitativement ces transformations.

Une telle évaluation peut se faire théoriquement d'une manière assez simple. Joule a vérifié ainsi que si l'on transforme intégralement une certaine quantité d'énergie mécanique en chaleur, ou inversement, il existe un rapport constant entre le travail mécanique dépensé et la quantité de chaleur recueillie. Ce rapport est l'équivalent mécanique de la chaleur. On a constaté de même qu'il existe une relation de quantité bien déterminée entre l'énergie chimique des corps et la chaleur dégagée par leur combinaison, entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique correspondante, etc.

Ces vérifications ont amené dès lors les physiciens à admettre qu'*une certaine quantité d'une forme d'énergie déterminée est l'équivalent constant de certaines quantités des autres formes, également bien déterminées.*

Ce principe, qui est, sous cette forme très générale, le résultat d'une induction, a été toujours vérifié jusqu'à ce jour par les méthodes expérimentales. Il convient donc de l'admettre tant qu'un fait nouveau ne viendra pas en diminuer la généralité. On en déduit immédiatement une conséquence importante connue sous le nom de *principe de la conservation de l'énergie.*

Soit, en effet, un système matériel tel qu'il ne puisse recevoir aucune énergie de l'extérieur et appelé pour cette raison « système conservatif ». Si l'on considère deux états successifs de ce système, les formes d'énergie qui y seront manifestées pourront être de nature différente, mais la somme de l'ensemble dans chacun de ces

états, et en tenant compte des coefficients d'équivalence, demeure constante.

La traduction algébrique de cette relation permet de définir quantitativement un certain nombre des formes d'énergie qui sans cela échapperaient à l'analyse directe. Si, en particulier, au cours d'une expérience, on constate que la loi de la conservation de l'énergie n'est pas vérifiée et qu'une certaine quantité de l'énergie initialement manifestée a disparu, on en conclut à l'apparition d'une forme d'énergie nouvelle, et cette dernière se trouve mesurée précisément par le fait qu'elle doit correspondre exactement à la quantité d'énergie disparue.

V. — CONCLUSION ET PLAN DE L'OUVRAGE

18. — Nous avons acquis les notions principales qui nous étaient nécessaires tant au sujet des grandeurs que du langage électrique. D'autres, sans doute, sont encore utiles, mais leur définition se fera d'elle-même au cours des descriptions qui vont suivre.

Nous pouvons maintenant aborder la revue des modes de production de l'énergie électrique. C'est le but de cet ouvrage.

Imaginons que nous possédions à notre disposition une source d'électricité, une pile par exemple. Réunissons les deux pôles de celle-ci par un conducteur, et plaçons sur le trajet de celui-ci un voltamètre, une résistance à fil fin, un électroaimant. Nous constaterons que durant le passage du courant l'électrolyte du voltamètre est partiellement décomposé, que la résistance s'échauffe, que l'électroaimant attire une armature de fer placée en face de lui. Si la pile est assez forte enfin, et si nous fermons son circuit à travers notre corps, des sensations particulières nous montreront que notre corps est soumis lui-même à une action physiologique nouvelle.

Un courant produit par suite des effets chimiques, calorifiques, mécaniques et physiologiques.

Toutes ces actions jouissent d'un privilège, comme la plupart des transformations d'énergie : elles sont reversibles.

En d'autres termes, puisqu'un courant est susceptible de produire des effets chimiques, calorifiques, mécaniques et physiologiques, inversement les phénomènes chimiques, calorifiques, mécaniques et physiologiques doivent pouvoir devenir dans certaines conditions des sources d'énergie électrique.

Nous allons passer en revue ces conditions, nous attachant à ne décrire avec quelque détail que des appareils utilisés industriellement.

PREMIÈRE PARTIE

SOURCES ÉLECTROCHIMIQUES D'ÉNERGIE

CHAPITRE PREMIER

Piles.

19. — Un courant est toujours dû à l'action d'une force électromotrice. Les sources d'énergie électrique sont donc en réalité des sources de force électromotrice.

Il peut se trouver que des sources de force électromotrice diverses et diversement orientées soient intercalées dans un même circuit. C'est même ce qui se présente le plus fréquemment. Malgré cela, le courant qui circule dans le circuit possède à chaque instant une valeur bien déterminée. On peut donc le considérer comme dû à l'action d'une force électromotrice unique qui serait la résultante de toutes les forces électromotrices intercalées.

Cette résultante est facile à déterminer. Il suffit, en effet, de partager en deux groupes toutes les forces électromotrices du circuit, celle qui tendent à accroître la différence de potentiel dans un sens, et celles qui tendent à la diminuer, dans le même sens. La force électromotrice totale qui provoque le passage du courant a une valeur évidemment égale à la différence des valeurs de ces deux groupes.

20. — Principe de la pile. — Toutes les fois qu'une

action chimique a lieu entre deux corps, cette action provoque l'établissement d'une différence de potentiel entre ces corps.

En particulier, si l'on plonge un corps métallique A dans un liquide qui l'attaque, il se produit entre ce corps et le liquide une différence de potentiel (le potentiel du liquide étant le plus élevé).

Plongeons en même temps dans le liquide un autre métal B (fig. 1) qui ne soit pas attaqué par lui : ce métal et le liquide constituent un conducteur dont toutes les parties se mettent au même potentiel, et la différence de potentiel existant entre A et le liquide existera également entre A et B.

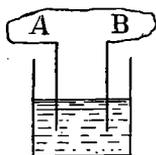


Fig. 1.

Si l'on réunit ces deux métaux par un conducteur, leurs potentiels tendent aussitôt à s'égaliser à travers lui, mais l'action chimique qui a lieu rétablit constamment la différence initiale. Un courant passe donc dans le conducteur et dure tant que dure l'action chimique elle-même.

Supposons, enfin, que le liquide, au lieu d'être absolument sans action sur le second métal, l'attaque aussi, la force électromotrice résultante est alors la différence des forces électromotrices dues à chacune des deux actions chimiques considérées séparément (§ 19). Il en résulte que deux métaux absolument identiques, plongés dans un même liquide, ne produisent pas de force électromotrice résultante.

21. — Pile de Volta. — La réalisation pratique la plus simple de ces principes a été imaginée par Volta. Il suffit de plonger une lame de zinc et une lame de cuivre dans de l'eau acidulée d'acide sulfurique. Le zinc joue le rôle de métal attaqué, le cuivre celui de corps conducteur. On peut d'ailleurs substituer à ce dernier toute autre substance (charbon, platine, etc.), à la fois bonne conductrice et à l'abri d'actions chimiques de la part de l'eau acidulée.

L'appareil ainsi formé constitue un *élément* de pile. Les lames sont appelées les *pôles* ou *électrodes* de cet élément. La lame non attaquée est dite *pôle* ou *électrode positif*, l'autre, *pôle* ou *électrode négatif*. Si l'on réunit les deux pôles par un fil métallique, un courant passe dans le fil allant du pôle positif au pôle négatif.

Un examen attentif de l'élément voltaïque fera comprendre d'une manière plus précise la nature intime de la pile et les procédés d'utilisation dont elle est susceptible.

1° Considérons l'élément ayant ses deux pôles isolés. Au moment où l'on a plongé les lames dans le liquide, il s'est produit une différence de potentiel entre ces lames. Cette différence persiste et est évidemment caractéristique des réactions chimiques entrant en jeu dans l'élément. Elle porte le nom de *force électromotrice de l'élément*.

Si l'on réunit ensuite les deux pôles par un fil métallique, un courant s'établit, allant de l'eau acidulée en contact avec le zinc au zinc lui-même, en passant par le fil. L'élément est non seulement un producteur d'électricité, mais encore une portion du conducteur. Il doit donc présenter au passage du courant une certaine résistance, également caractéristique et qui s'appelle la *résistance intérieure de l'élément*.

La force électromotrice et la résistance intérieure, telles sont les indicatrices de la valeur électrique d'une pile. On les désigne très improprement sous le nom de *constantes de la pile*, bien que leurs valeurs varient à chaque instant pour un même élément.

Il y a intérêt, dans les applications, à disposer de sources d'électricité ayant des forces électromotrices et des résistances intérieures notablement différentes de celles d'un élément unique.

Deux procédés principaux sont utilisés suivant le but qu'on se propose d'atteindre.

Supposons d'abord qu'on réunisse le pôle positif d'un premier élément avec le pôle négatif d'un second. Ces deux pôles seront au

même potentiel (fig. 2). Il se crée dans le second élément, et par son action même, une différence de potentiel entre le cuivre et le zinc équivalente à celle qui a déjà été créée entre les deux lames du premier. La différence de potentiel existant entre le cuivre et le zinc extrêmes sera donc double de celle qui aurait existé avec un seul élément.

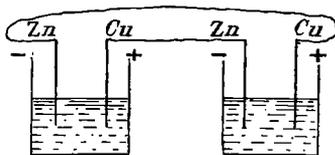


Fig. 2.

Les deux éléments jouent ici le même rôle que deux machines hydrauliques élevant l'eau par degrés successifs.

On montrerait de même qu'en ajoutant de cette façon n éléments, la force électromotrice de la pile totale devient n fois plus grande. Le montage est dit, dans ce cas, en *série* ou en *tension*.

Supposons, au contraire, qu'on groupe deux éléments en réunissant entre eux leurs pôles positifs et leurs pôles négatifs (fig. 3). L'ensemble résultant constitue un élément identique à chacun des éléments constitutifs, mais ayant une surface de lames double. La force électromotrice, qui dépend uniquement des réactions chimiques, n'a pas changé ; mais le courant trouve à sa traversée de la pile un chemin de surface double ; la résistance intérieure est donc devenue deux fois moindre.

En associant de la même façon n éléments, on constaterait que la résistance intérieure de la pile totale ainsi formée est aussi devenue n fois moindre. Le montage, cette fois, est dit en *dérivation* ou en *surface*.

Si E et r désignent la force électromotrice et la résistance intérieure d'un élément, n le nombre des éléments groupés, R la résistance du conducteur extérieur à la

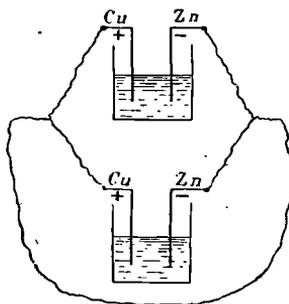


Fig. 3.

pile, la simple application de la loi de Ohm fournit pour la valeur de l'intensité i du courant :

$$i = \frac{nE}{nr + R}$$

dans le premier cas, et

$$i = \frac{E}{\frac{r}{n} + R}$$

dans le second.

Les deux modes de montage peuvent évidemment se combiner entre eux, suivant les besoins.

2° Nous avons constaté que l'action chimique a lieu seulement au moment où le courant s'établit, et tant que dure celui-ci.

Il y a entière dépendance entre les deux ordres de phénomènes. Le passage du courant dans le conducteur produit une certaine quantité de travail, soit sous forme mécanique, soit sous forme de dégagement de chaleur. Ce travail est l'équivalent exact du travail fourni par les combinaisons chimiques qui ont lieu dans l'élément.

Ces réactions sont toujours nombreuses. Dans la pile de Volta, par exemple, — qui est la plus simple de toutes, — l'eau acidulée est décomposée. L'oxygène mis en liberté attaque le zinc et forme avec lui de l'oxyde de zinc qui, se combinant à son tour avec l'acide sulfurique, produit du sulfate de zinc ; de l'hydrogène se dégage.

Parmi ces réactions, les unes restituent de la chaleur, c'est-à-dire fournissent du travail disponible, les autres absorbent de la chaleur, c'est-à-dire du travail. Il est évident que, pour faire une bonne pile, il y a tout intérêt à accroître le nombre des premières, et à diminuer les secondes.

3° Si on laisse quelque temps les pôles d'un élément voltaïque réunis par un conducteur, on constate que le courant produit s'affaiblit rapidement.

Différentes causes produisent cet affaiblissement.

En premier lieu, une simple inspection de l'élément montre que, si le zinc est impur, chacune des particules qui lui sont mélangées forme avec lui de véritables petits éléments locaux, fermés sur eux-mêmes. Il est constamment attaqué et s'use rapidement.

Il suffirait, pour supprimer cet effet, d'employer du zinc pur ; mais celui-ci est d'un prix élevé. Il est plus économique de recourir à l'usage du zinc amalgamé. On l'obtient en chauffant en vase clos et jusqu'à la fusion, 4 parties de mercure et 96 parties de zinc. On peut aussi se contenter de frotter le zinc avec une brosse en fil de fer, plongée au préalable dans du mercure. Dans ce cas, toutefois, l'amalgamation est superficielle, et il est utile de l'entretenir, soit en renouvelant de temps à autre le traitement, soit en plongeant l'extrémité du bâton de zinc dans une coupelle remplie de mercure.

D'autre part, si l'on examine la lame de cuivre qui sert de pôle positif, on voit qu'elle se recouvre d'une série de bulles de gaz (hydrogène) et qu'il se dépose également du zinc à sa surface.

L'hydrogène est un des produits des réactions principales de la pile ; le zinc provient de la décomposition, sous l'action du courant, du sulfate de zinc formé dans l'élément.

La présence du premier diminue l'étendue des contacts du liquide avec la lame, et augmente par suite la résistance intérieure de l'élément. Le second tend à créer à l'intérieur de l'élément un deuxième élément orienté en sens inverse, et diminue la force électromotrice initiale, en en développant une de sens contraire.

L'ensemble de ces phénomènes porte le nom de *polarisation de la pile*, mot qui exprime assez bien la formation de nouveaux pôles opposés aux premiers. Il suffit évidemment, pour supprimer cette polarisation, d'empêcher toute substance étrangère de parvenir à la surface de l'électrode positive.

22. — Piles à dépolarisant. — Ce fut Becquerel qui, en 1829, imagina d'arriver à ce résultat en introduisant dans l'élé-

ment un corps convenablement choisi, et qui, par ses réactions chimiques, fit disparaître précisément ces substances étrangères.

Les piles fondées sur ce principe comprennent dès lors, en dehors des deux lames servant d'électrodes, deux corps, l'un appelé l'*excitateur* et qui a pour mission, comme le liquide de la pile de Volta, de créer la force électromotrice en attaquant l'électrode négative ; l'autre appelé le *dépolarisant*, détruisant par ses réactions les effets de la polarisation.

L'excitateur est généralement un liquide.

Le dépolarisant peut être soit liquide, soit solide. Dans le premier cas, il est nécessaire de le séparer par un vase poreux du liquide excitateur.

Les dépolarisants les plus employés sont le sulfate de cuivre, l'acide azotique, l'acide chromique, le bioxyde de manganèse et le bioxyde de cuivre.

Toutes les piles usitées sont à dépolarisant. Passons donc en revue celles qui, soit historiquement, soit au point de vue industriel, méritent une attention plus particulière.

23. — Éléments du type Daniell. — Dans les éléments du type Daniell, le dépolarisant est un sulfate, de préférence le sulfate de cuivre ; le liquide excitateur est constitué par de l'eau acidulée d'acide sulfurique (généralement au dixième).

L'élément Daniell proprement dit (fig. 4) comprend un vase de verre rempli d'eau acidulée, dans lequel plonge une lame de zinc. L'intérieur de l'élément renferme un vase en terre poreuse, rempli d'une dissolution de sulfate de cuivre au milieu de laquelle est placée la lame de cuivre servant d'électrode positive.

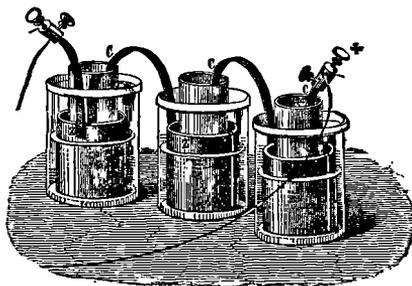
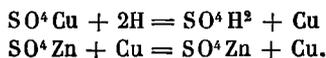


Fig. 4.

L'action du dépolarisant s'explique de la façon suivante. L'hydrogène et le zinc qui se portent sur l'électrode positive, rencontrent le sulfate de cuivre et le décomposent : il se forme du sulfate de zinc, de l'acide sulfurique, et du cuivre emprunté au sulfate de cuivre se dépose à leur place, ce qui n'a pas d'inconvénient. Les réactions sont les suivantes :



Il en résulte que la solution de sulfate de cuivre s'appauvrit sans cesse. On l'entretient en y ajoutant de temps à autre de nouveaux cristaux.

La force électromotrice de l'élément Daniell est de 1^v,07 ; sa résistance intérieure varie de 7 à 12 ohms.

A mesure que la pile fonctionne, le sulfate de zinc dissous dans le liquide excitateur se concentre. Peu à peu, la solution se sature ; le fond du vase et ses parois se tapissent de cristaux. Le liquide monte par capillarité, et des efflorescences nombreuses atteignent la partie supérieure de l'élément. Ces cristaux sont souvent désignés sous le nom de *sels grimpants*. Ils peuvent entraîner la création, entre des éléments voisins, de communications secondaires qui affaiblissent l'intensité du courant. On s'en débarrasse en recouvrant les bords du vase extérieur d'une couche de paraffine ou de peinture à l'huile de lin. Les cristaux ne peuvent adhérer à cette couche et retombent d'eux-mêmes dans la liqueur.

La pile Daniell a divers inconvénients :

1° Elle nécessite l'emploi d'un vase poreux. On sait que celui-ci a pour but de séparer les deux liquides. S'il est trop poreux, cette séparation n'est plus suffisante : s'il ne l'est pas assez, la résistance intérieure de l'élément est notablement accrue.

2° Elle est composée avec des liquides, et par suite difficilement transportable.

3° Enfin elle exige une surveillance qui, sans être continuelle, la rend peu propre aux usages domestiques.

Callaud en France (1863), et Meidinger en Allemagne (1858) ont réussi d'une manière très heureuse à supprimer le vase poreux. Dans leurs éléments, les liquides sont superposés et simplement séparés par leurs densités. Leur diffusion est alors des plus lentes.

Dans la pile Callaud (fig. 5), le sulfate de cuivre occupe le fond du vase ; au-dessus de lui est une dissolution de sulfate de zinc. Une couronne de zinc, suspendue aux rebords du vase par trois crochets, plonge dans cette dernière. Au fond est une autre

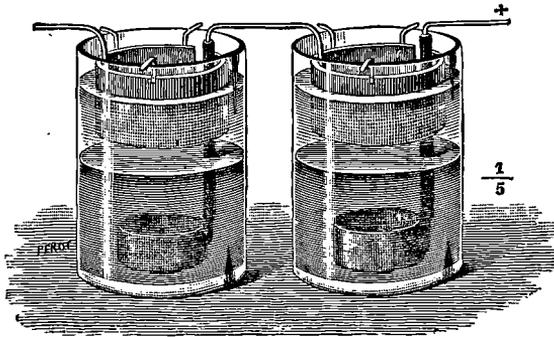


Fig. 5.

couronne de cuivre, rivée à un fil de cuivre recouvert de gutta qui traverse les deux liquides et sert de prise de courant.

La pile Callaud est universellement employée en France pour les usages de la télégraphie. Elle dure fort longtemps, à condition de ne pas laisser la solution de sulfate de zinc se saturer, ce qu'on vérifie par un simple essai à l'aréomètre. On la revise environ tous les six mois.

L'élément Meidinger est à peu près identique. Sa principale différence avec l'élément Callaud réside dans l'emploi d'un ballon renversé et rempli de cristaux qui maintient d'une manière constante la saturation de la dissolution de sulfate de cuivre.

Un grand nombre d'inventeurs ont tenté de rendre la pile

Daniell plus transportable. Il faut citer parmi eux Minotto, Trouvé et Guérin.

Les uns et les autres se contentent d'en faire absorber les liquides par des substances convenables. L'élément Minotto est un élément Callaud, entre les électrodes duquel ont été interposés, soit de la sciure de bois, soit du noir animal. Il est utilisé sur les lignes télégraphiques de l'Inde, mais sa résistance intérieure est très grande.

Trouvé superpose des rondelles de papier buvard imbibées les unes de sulfate de cuivre, les autres de sulfate de zinc.

Guérin immobilise les liquides dans une dissolution faite à chaud d'agar-agar (sorte d'algue récoltée en extrême Orient). Cette dissolution forme en se refroidissant une gelée solide et élastique.

On a essayé enfin de diminuer d'une manière notable la fréquence de l'entretien de l'élément Daniell. Le modèle le plus heureux dans ce genre est dû à Marié-Davy.

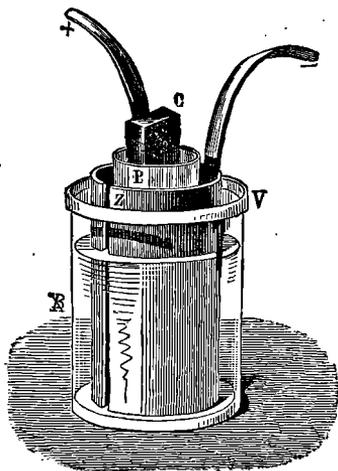


Fig. 6.

Il est semblable comme disposition à l'élément Daniell (fig. 6), mais le dépolarisant est constitué cette fois par une pâte de sulfate mercurieux (Hg^2SO^4) obtenue en délayant dans l'eau ce sel préalablement pulvérisé. L'électrode de cuivre est aussi remplacée, car elle serait attaquée par le mercure résultant de la décomposition du sel dépolarisant. On y substitue un prisme de charbon recouvert d'un chapeau de plomb sur lequel se prennent les contacts. On a soin, d'ailleurs,

avant de placer ce chapeau, de plonger la tête du charbon dans de la paraffine fondue, afin d'éviter les attaques ultérieures sous

l'action du liquide qui, sans cela, monterait par capillarité.

L'emploi du sulfate mercureux a pour avantage de donner, comme produit résultant, du mercure qui se porte sur le zinc et régularise l'action de l'élément.

L'entretien de la pile Marié-Davy est à peu près nul. Elle dure une année, sans qu'il soit nécessaire d'y ajouter autre chose qu'un peu d'eau pour compenser les pertes par évaporation. Sa force électromotrice est de 1^v,27; sa résistance intérieure, de 6 ohms environ.

Toutefois les sels vénéneux qu'elle emploie rendent sa manipulation délicate; ils sont en outre d'un prix élevé.

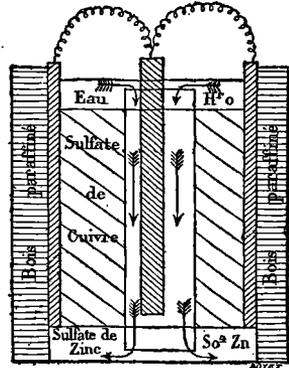


Fig. 7.

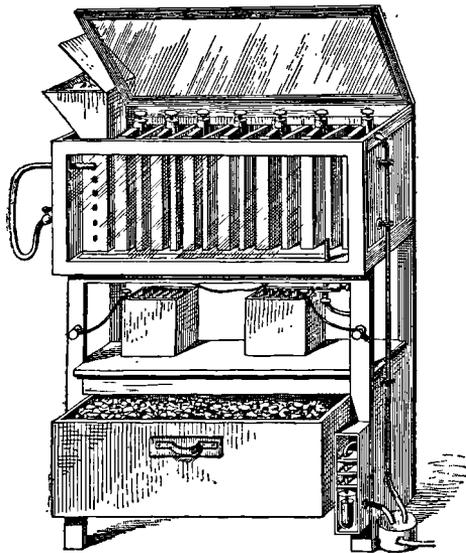


Fig. 8.

On est d'ailleurs allé plus loin encore dans la même voie, en imaginant des piles dites « automatiques ».

La pile d'O'Keenan, par exemple, est une pile Daniell dans laquelle le renouvellement des liquides se fait entièrement de lui-même.

L'élément (fig. 7) est contenu dans une boîte en bois paraffiné. Deux lames de plomb forment le pôle positif et plongent dans une solution de sulfate de cuivre. Au centre est une

gaine de papier parchemin, ouverte en haut et en bas, et contenant le bâton de zinc (électrode négative) et une solution de sulfate de zinc. De l'eau recouvre le tout.

Remarquons que l'ordre de superposition des liquides par densité est inverse de celui qui existe dans l'élément Callaud, justement parce qu'on emploie des solutions saturées.

Dès que le circuit est fermé, le zinc est attaqué; du sulfate de zinc se forme dans la gaine, en même temps que du cuivre se dépose sur le plomb. Le sulfate de zinc produit augmente la densité du liquide contenu dans le bas de la gaine et le force à descendre : il y a simultanément refoulement de celui-ci à la partie inférieure, et appel d'eau à la partie supérieure.

Les figures 8 et 9 indiquent par quel procédé s'opère l'alimentation. Une trémie T laisse tomber peu à peu des cristaux de sulfate de cuivre. Un robinet R

amène de l'eau goutte à goutte à la partie supérieure, et plus vite qu'il ne serait nécessaire. Un trop-plein SP maintient le niveau constant.

Un tube vertical descend de la partie inférieure et plonge dans un vase rempli de mercure. La hauteur x de celui-ci est réglée une fois pour toutes, de manière à équilibrer exactement la hauteur H de sulfate de zinc concentré. Toute augmentation de poids

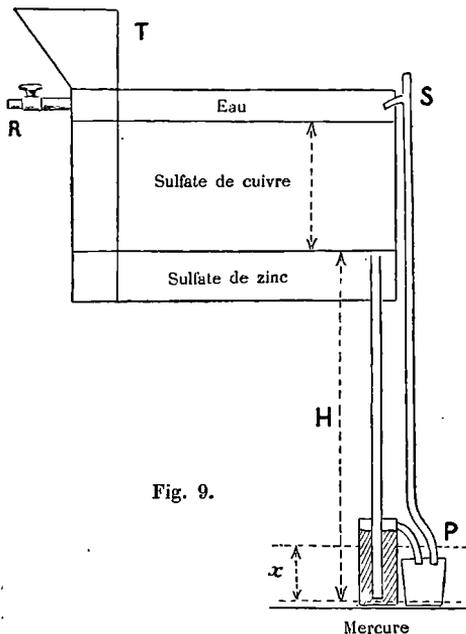


Fig. 9.

de celui-ci se traduit donc par une dénivellation du mercure et par l'échappement de l'excès de liquide.

Cette pile et plusieurs autres semblables, spécialement créées pour les besoins de l'éclairage domestique, ne sont pas entrées dans la pratique régulière, en dépit de leur ingéniosité. Nous verrons plus loin quelles raisons ont motivé cet insuccès.

24. — Éléments du type Bunsen. — Le dépolarisant utilisé dans les éléments du type Bunsen est l'acide azotique.

Un élément Bunsen comprend (fig. 10) un vase en grès contenant de l'eau acidulée d'acide sulfurique et une lame de zinc (électrode négative). Au milieu du vase en grès est un autre vase en terre poreuse contenant de l'acide azotique et une électrode positive en charbon.

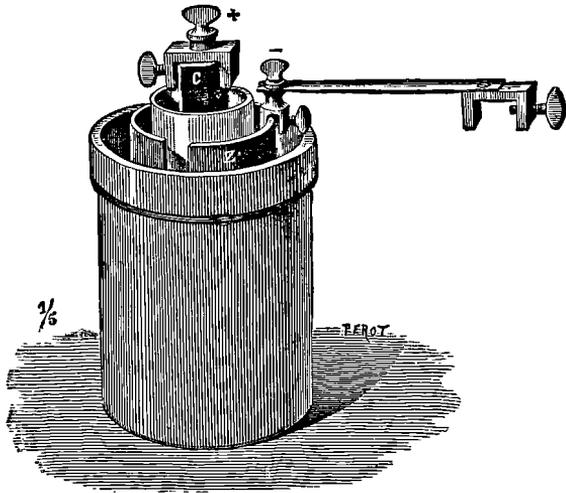
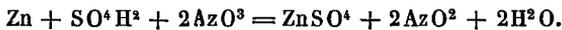


Fig. 10.

L'hydrogène mis en liberté s'empare d'une partie de l'oxygène de l'acide azotique, en laissant comme sous-produits de l'eau et des vapeurs rutilantes :

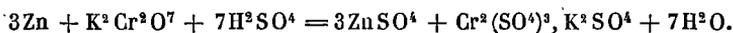


La pile Bunsen est très usitée dans les laboratoires. Sa force électromotrice est de 1,8; sa résistance intérieure est des plus

faibles (1/4 d'ohm environ). Toutefois elle utilise des substances difficiles à manier, dégage des vapeurs dangereuses et s'affaiblit assez rapidement, par suite de l'appauvrissement en acide azotique.

M. d'Arsonval l'a modifiée heureusement en y remplaçant l'acide sulfurique par de l'acide chlorydrique.

25. — Éléments du type Poggendorff. — Le dépolarisant employé dans les piles du type dû à Poggendorff est l'acide chromique. Comme ce corps n'était pas jusqu'à ces temps derniers un produit industriel, on l'a remplacé d'habitude par le mélange de bichromate de potasse ou de bichromate de soude (moins coûteux) et d'acide sulfurique qui sert à le produire. L'hydrogène naissant réduit l'acide chromique. La réaction, assez complexe, peut se représenter de la façon suivante :



Sauf le choix du dépolarisant, rien ne distingue extérieurement un élément du type Poggendorff d'un élément du type Bunsen. Les modèles divers en usage (pile Fuller, pile Radiguet) ne diffèrent que par des dispositions de détail.

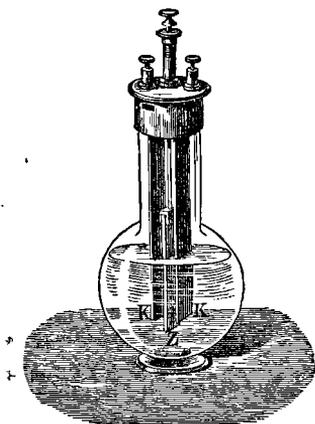


Fig. 11

Il est possible de simplifier considérablement le montage des éléments à l'acide chromique en supprimant le vase poreux et en plongeant directement les deux électrodes dans le mélange de bichromate de potasse et d'acide sulfurique ; mais il faut dans ce cas munir l'élément de dispositifs spéciaux (treuils, leviers, etc.) propres à maintenir le zinc en dehors du liquide quand

la pile est au repos, car l'attaque du zinc à circuit ouvert est assez vive. La pile Grenet (fig. 11) est un modèle de ce genre.

Quel qu'en soit le modèle, les piles à acide chromique s'épuisent très rapidement. Il est donc utile de pouvoir en renouveler fréquemment le dépolarisant. On a l'habitude de se servir de siphons spéciaux pour cette opération que la nature du liquide rend assez dangereuse. Quelquefois même des siphons placés à demeure et préalablement amorcés réunissent les éléments. Le renouvellement s'opère alors d'une façon continue.

La force électromotrice d'un élément du type Poggendorff est de 2,2 volts, et sa résistance intérieure de 1 ohm environ. Ces constantes, les plus remarquables parmi toutes celles que nous avons déjà mentionnées, ont amené à recourir aux piles qui les fournissent chaque fois qu'il est nécessaire de posséder des sources d'énergie électrique assez fortes sous un faible volume.

C'est ainsi que le commandant Renard les a employées pour actionner les moteurs des ballons dirigeables.

La figure 12 représente deux éléments associés de la pile Renard.

L'électrode positive est un cylindre d'argent recouvert d'une couche de platine de 1/500 de millimètre. L'électrode négative est un bâton de zinc placé au centre du cylindre précédent et maintenu écarté de lui par des guides en ébonite : l'ensemble de ces deux électrodes est enfermé dans un tube de verre présentant une faible ouverture à sa partie inférieure.

Le liquide, à la fois excitateur et dépolarisant, est un mélange

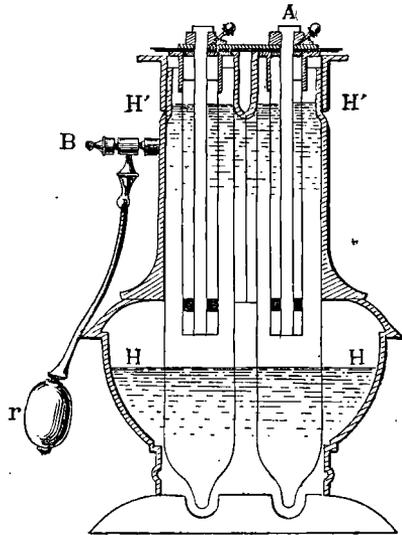


Fig. 12.

à équivalents égaux d'acide chlorhydrique et d'acide chromique. A l'état de repos, il est à la hauteur H et ne baigne pas les électrodes.

Pour mettre la pile en activité, après avoir bouché l'orifice A on insuffle de l'air au moyen de la poire en caoutchouc *p*. Le liquide monte aussitôt, jusqu'en H' par exemple, dans tous les éléments; la manœuvre d'un ajustage B permet de régler à volonté cette hauteur H' et par suite le débit. Trente-six éléments Renard de 3 centimètres de diamètre, et pesant 15 kilogrammes, peuvent fournir pendant deux heures une puissance de 250 watts sous une différence de potentiel de 2^v,2 par élément.

26. — Piles à dépolarisant solide. — Deux types principaux de piles à dépolarisant solide sont entrés dans la pratique. Ce sont les piles *Leclanché* et les piles *Lalande et Chaperon*.

Dans la pile Leclanché (fig. 13), le dépolarisant est du bioxyde de manganèse; le liquide excitateur est une solution de chlorhydrate d'ammoniaque.

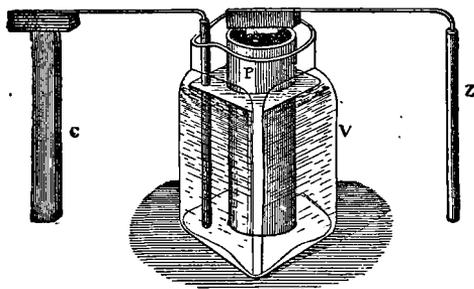
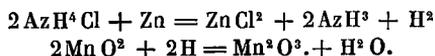


Fig. 13.

La tige de zinc (électrode négative) plonge dans cette solution que contient un vase de verre. Au centre est un vase poreux, clos à sa partie supérieure et renfermant un mélange de charbon

de cornue et de bioxyde de manganèse et un prisme de charbon (électrode positive).

L'hydrogène produit réduit le bioxyde de manganèse à l'état de sesquioxyde : le zinc attaqué par le chlorhydrate d'ammoniaque se dissout à l'état de chlorure de zinc. Les réactions sont les suivantes :



Au lieu de placer le dépolarisant dans un vase poreux, on fabrique quelquefois des plaques, dites *agglomérés*, en mélangeant 40 parties de bioxyde de manganèse, 55 parties de charbon et 5 parties de gomme laque. L'électrode positive est alors simplement maintenue entre deux de ces plaques.

L'élément Leclanché est employé d'une façon générale dans les usages domestiques, il est d'un prix peu élevé, utilise des substances qui ne sont ni caustiques ni vénéneuses, et ne réclame pas

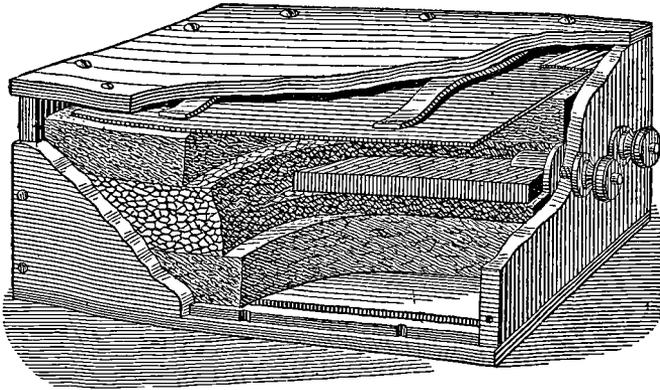


Fig. 14.

de soins durant des mois entiers. Toutefois l'action du dépolarisant y est assez lente. Sa force électromotrice est de $1,4$; sa résistance intérieure varie entre 3 et 5 ohms. Il est utile en outre, pour que celle-ci n'augmente pas, de gratter de temps à autre le zinc pour enlever les oxychlorures de zinc peu solubles qui se déposent à sa surface.

Une des modifications les plus heureuses de la pile Leclanché a consisté à immobiliser ses liquides dans une substance appelée la *cofferdam* et extraite des fibres extérieures de la noix de coco.

L'élément de ce modèle, connu sous le nom de « pile Bloc » et dont le premier type fut imaginé par M. Germain, est renfermé dans

une caisse en bois, protégée à l'intérieur par un enduit à base de goudron et à l'extérieur par de la paraffine (fig. 14). Il contient, disposés horizontalement et par couches successives :

- Une caisse de zinc amalgamé,
- Une couche de pâte de cofferdam,
- Un lit de bioxyde de manganèse entourant la lame de charbon,
- Une seconde couche de pâte de cofferdam,
- Une seconde lame de zinc soudée à la première.

La pression, qu'il est important de maintenir, s'obtient à l'aide de ressorts robustes placés entre le couvercle et une plaque de bois paraffiné.

Cette pile, extrêmement constante, facilement transportable et de longue durée, a été adoptée en France, malgré son prix élevé, pour les usages téléphoniques, et quelquefois pour alimenter de petits moteurs électriques.

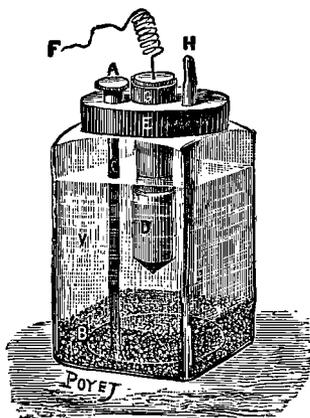


Fig. 15.

Le second type de pile à dépolarisant solide est dû, comme on l'a dit plus haut, à MM. Lalande et Chaperon. Dans cet élément, le dépolarisant est l'oxyde de cuivre : le liquide excitateur est la potasse caustique qui, attaquant le zinc, fournit du zincate de potasse.

Le vase en verre qui contient cet élément (fig. 15) est fermé par un couvercle isolant auquel est suspendu un bâton de zinc. Une ouverture donne passage à un fil isolé à la gutta qui est relié à une lame de cuivre placée au fond du vase, sous une couche d'oxyde de cuivre.

La force électromotrice de la pile Lalande et Chaperon est de 0^v,9 seulement. Sa résistance intérieure atteint à peine 1/3 d'ohm. La régularité de son fonctionnement a beaucoup contribué à en répandre l'emploi, particulièrement en téléphonie. Son maniement

est en revanche assez dangereux, par suite de la présence de la potasse caustique.

27. — Coût de l'énergie électrique fournie par les piles. — Si rapide qu'ait été la description qui précède, on a pu constater qu'un grand nombre des piles connues étaient de nature à donner satisfaction au point de vue électrique. Comment s'expliquer dès lors que leur emploi soit limité à des cas très particuliers tels que la télégraphie, la téléphonie ou les essais de laboratoire?

On en trouve aisément la raison en évaluant le prix de revient de l'énergie électrique fournie par les piles.

Prenons la pile Callaud, par exemple, qui est l'un des modèles les plus parfaits du type Daniell. Un calcul très simple établit qu'un débit d'un ampère pendant une heure (ce débit est fréquemment désigné par le mot ampère-heure) représente, avec cet élément et aux prix actuels des matières premières, 0 fr. 00588. Il en résulte qu'un cheval-heure reviendrait à 2 fr. 88. Ce chiffre serait ramené à 1 fr. 90, en admettant qu'on utilisât le cuivre déposé sur l'électrode positive, pour le revendre.

Avec un élément du type Bunsen, le prix du même cheval-heure est encore de 1 fr. 40.

Avec la pile Renard, il atteint 5 francs.

Au contraire, le cheval-heure fourni par une machine à vapeur revient à 0 fr. 10 seulement.

Une telle différence est aisément explicable. La pile est en effet une machine qui, au lieu de consommer du charbon comme le moteur à vapeur, consomme du zinc, c'est-à-dire une matière première d'un prix très élevé.

Deux moyens peuvent être théoriquement employés pour diminuer le coût de l'énergie électrique fournie par la pile :

1° On peut d'abord chercher à utiliser les sous-produits de celle-ci.

C'est ainsi que nous avons dit tout à l'heure qu'en revendant

le cuivre déposé sur l'électrode positive de l'élément Callaud, il était possible de diminuer à peu près de 1 franc le prix du cheval-heure fourni par cette pile.

M. Fournier a proposé également de traiter les sels de chrome qui se produisent dans les éléments du type Poggendorff pour en extraire des sels rares de teinture.

M. Perreur a imaginé enfin de recueillir, comme produit secondaire, l'énergie électrique dégagée dans les réactions qui accompagnent la fabrication de certains produits chimiques d'usage courant, tels que les sulfates et les chlorures simples ou doubles de cuivre, fer, zinc, etc.

Toutefois, et pour des causes étrangères peut-être à l'idée même de leurs appareils, aucun de ces inventeurs n'a vu ses efforts couronnés d'un plein succès.

2° On peut aussi, puisque l'élévation du prix de revient tient à celui des matières premières consommées, chercher à utiliser d'une manière indéfinie la même quantité de matière première.

Il suffirait, par exemple, quand le zinc d'une pile a été dissous dans le liquide exciteur, de faire passer dans des conditions convenables un courant à travers ce liquide pour provoquer de nouveau le dépôt du zinc dissous et le rendre susceptible d'une nouvelle utilisation.

C'est à ce second moyen que l'on a le plus habituellement recours. Les piles ainsi régénérées sont alors dites *piles secondaires* ou *accumulateurs*.

CHAPITRE II

Accumulateurs.

28. — Principe des accumulateurs. — Intercalons dans un circuit un voltamètre composé de deux lames de cuivre plongeant dans de l'eau acidulée (fig. 16). Ce voltamètre est en réalité une pile dont les deux électrodes sont identiques. Nous avons vu qu'un tel appareil a normalement une force électromotrice égale à zéro (§ 20).

A partir du moment où le courant passe à travers le voltamètre, l'eau contenue dans celui-ci est décomposée, et l'on pour-

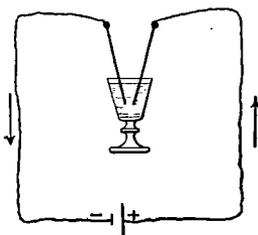


Fig. 16.

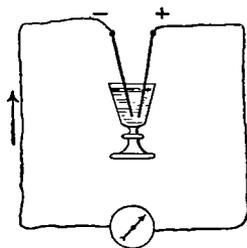


Fig. 17.

rait recueillir avec des éprouvettes convenablement disposées les gaz oxygène et hydrogène qui se dégagent au contact de chacune des lames de cuivre.

Interrompons brusquement le courant et relierons aussitôt les lames à un galvanomètre. Nous constaterons (fig. 17) qu'un second courant passe dans ce dernier, et qu'il est de sens inverse du précédent (dans le voltamètre).

Sous l'action du courant primitif, les deux électrodes du vol-

tamètre, identiques au début, ont subi des modifications chimiques qui les ont différenciées l'une de l'autre, ou bien encore, pour employer le terme usité, ces électrodes se sont *polarisées*. Le voltamètre est devenu une pile susceptible de fournir un courant appelé *secondaire*, parce qu'avant de l'obtenir il a fallu préparer l'appareil à l'aide d'un courant *primaire*.

Au bout d'un certain temps, le courant secondaire cesse. Les électrodes redeviennent identiques. L'appareil se retrouve à l'état initial. Il a fonctionné comme une sorte de réservoir d'électricité, ne consommant théoriquement rien de lui-même, emmagasinant l'énergie électrique que le courant primaire lui a fournie, la restituant ensuite. C'est un *accumulateur* ou *pile secondaire*.

29. — Généralités sur les accumulateurs. — La durée et l'intensité du courant secondaire que nous venons d'obtenir dépendent essentiellement de la nature des électrodes du voltamètre utilisé et des altérations qui s'y sont produites sous l'action du courant primaire. Suivant que ces altérations sont plus ou moins grandes, on dit que l'accumulateur possède une plus ou moins grande *capacité*. Il importe de ne pas confondre cette capacité avec la capacité électrique des conducteurs qui a été déjà définie (§ 8).

La polarisation des électrodes s'opère à leur surface ; il est évident qu'elle est d'autant plus importante que cette surface est elle-même plus considérable. La capacité d'un accumulateur est, par suite, proportionnelle à la surface de ses électrodes, et il y a toujours intérêt à accroître cette dernière.

Il résulte enfin de ce que nous avons dit plus haut, que l'emploi d'un accumulateur comporte toujours deux opérations très distinctes : la première destinée à créer la polarisation des électrodes sous l'action du courant primaire, — c'est la charge — ; la seconde consistant à recueillir sous forme de courant secondaire l'énergie électrique emmagasinée pendant la charge, — c'est la décharge.

On désigne sous le nom d'électrode positive de l'accumulateur celle par laquelle entre le courant pendant la charge et qui est par suite reliée au pôle positif de la source d'électricité produisant cette charge. La seconde électrode est appelée électrode négative. Un examen sommaire des figures 16 et 17 montre que l'électrode positive de l'accumulateur, par exemple, joue bien exactement, pendant la décharge, le rôle du pôle positif d'une pile. C'est ce qui justifie l'emploi de ces noms.

30. — Accumulateurs au plomb. — Nous connaissons le principe de l'accumulateur. Il reste à le réaliser. Il y a pour cela une infinité de manières ; on peut en effet faire varier, soit la nature de l'électrolyte, soit celle des électrodes, soit encore la surface de ces dernières.

Nous pouvons ainsi considérer comme un voltamètre une pile ordinaire épuisée, — par exemple un élément Lalande et Chaperon. En faisant passer le courant de charge à travers un tel élément, le zinc dissous dans l'électrolyte se dépose et la pile est régénérée. C'est le principe de l'accumulateur Commelin et Desmazures.

On peut encore se contenter du voltamètre à eau acidulée que nous avons décrit plus haut. Dès 1829, Grove imagina ainsi la pile à gaz (fig. 18). Des électrodes en platine pénètrent dans l'électrolyte par le sommet de deux cloches en verre destinées à recueillir les gaz produits par la décomposition de l'eau sous l'action du courant de charge. Lorsque ces gaz sont dégagés, on constate, en réunissant les électrodes, l'existence d'un courant secondaire. Rien n'empêche d'ailleurs, au lieu de préparer à l'aide du courant de charge l'oxygène et l'hydrogène nécessaires, d'introduire d'avance dans les éprouvettes ces gaz préparés par les moyens chimiques habituels.

Toutefois, l'accumulateur n'est devenu un outil réellement

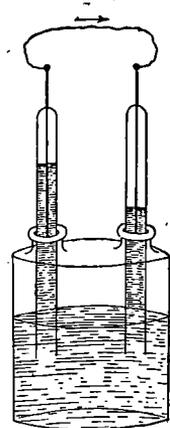


Fig. 18.

industriel que le jour où Planté découvrit les remarquables avantages des électrodes en plomb.

De tous les métaux employés pour les électrodes, le plomb est en effet celui qui subit, pendant la charge, les altérations les plus profondes. Par une rencontre heureuse, il arrive en outre que les éléments constitués avec lui ont une force électromotrice très élevée.

Le modèle d'accumulateur le plus usité aujourd'hui se compose donc d'un voltamètre ordinaire à eau acidulée d'acide sulfurique et à électrodes en plomb de très grande surface.

Dans son premier type, Planté obtenait (fig. 19) cette grande surface en enroulant ensemble deux feuilles de plomb, séparées par des bandes de caoutchouc chargées de maintenir l'écartement.

Fig. 19.

Il est essentiel que les deux lames ne se touchent pas : il s'établirait sans cela dans l'accumulateur ce que l'on appelle un *court circuit*. L'appareil se déchargerait alors en pure perte et d'une façon continue, en utilisant comme conducteur extérieur ce point de contact de résistance électrique à peu près nulle.

La disposition primitive de Planté n'était évidemment pas favorable pour éviter un tel accident. On lui en a préféré depuis une autre, consistant à former chacune des électrodes avec une série de plaques parallèles, généralement suspendues aux parois du récipient et réunies entre elles de deux en deux (fig. 20). C'est celle qui est actuellement en usage.

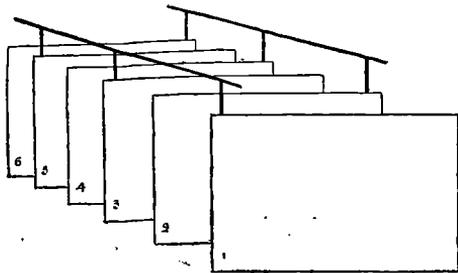


Fig. 20.

34. — **Formation des plaques.** — Tel quel, l'accumulateur au plomb possède une assez faible capacité. Une découverte accidentelle permit à Planté de l'accroître notablement. Il reconnut qu'il suffisait, pour arriver à ce résultat, de charger et décharger un grand nombre de fois l'accumulateur. C'est la *formation de l'accumulateur*.

Cherchons à nous rendre compte du phénomène.

Les réactions chimiques qui se produisent dans un accumulateur, sont fort complexes. Toutefois, il est possible, sans entrer dans leur détail, d'en découvrir l'essentiel. Il se réduit à ce qui suit.

Au moment où on les plonge dans la liqueur acidulée, les deux électrodes de plomb sont toujours plus ou moins oxydées. Faisons passer le courant de charge et examinons-les ensuite.

L'électrode positive s'est recouverte d'un dépôt brun rougeâtre de bioxyde de plomb (oxyde puce). L'électrode négative est devenue d'un gris caractéristique, sa surface ne présente plus que du plomb pur.

Continuons à faire passer le courant de charge : il arrive un moment où la formation de l'oxyde puce s'arrête. Des bulles de gaz se dégagent, en même temps que la polarisation des électrodes, c'est-à-dire leur altération superficielle, cesse de se produire. A cet instant, la charge est complète. Le courant de charge ne fait plus que décomposer inutilement l'eau acidulée.

Une analyse semblable montre que la décharge donne lieu à la succession inverse des mêmes phénomènes. La décharge terminée, les deux électrodes se retrouvent recouvertes d'oxyde de plomb.

Ces couches de bioxyde de plomb ou de plomb pur, qui se sont formées en cours de charge, sont très poreuses. Plus leur épaisseur croît, plus est grande également la capacité de l'accumulateur. La charge disparaît avec elles. Aussi leur a-t-on donné le nom de *couches de matières actives*. On constate qu'une série de charges et de décharges successives a précisément pour résultat d'augmenter l'épaisseur de ces couches.

Nous voici dès lors fixés sur un nouvel élément essentiel de l'accumulateur; pour être de grande capacité, ses électrodes doivent être recouvertes d'une grande épaisseur de matières actives, et subir dans cette intention une formation préalable.

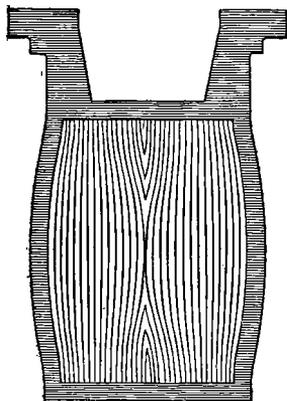


Fig. 21.

On connaît trois procédés de formation des accumulateurs :

- 1° La formation lente ;
- 2° La formation artificielle ;
- 3° La formation rapide.

La *formation lente* s'effectue à l'aide d'une série de charges et décharges successives. C'est celle indiquée par Planté. Il arrive qu'au cours de ces opérations, les électrodes augmentent de volume et se déforment. Reynier a substitué à l'électrode de Planté des plaques plissées, enchâssées dans un cadre (fig. 21). Les plis de la plaque foisonnent sans provoquer la déformation de l'électrode. Un autre type d'accumulateur à formation lente est dû à Tudor (fig. 22). La plaque de celui-ci est très épaisse et porte des rainures

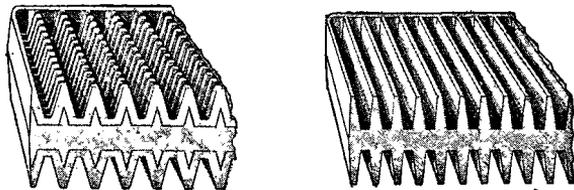


Fig. 22.

horizontales; au début, ces rainures sont remplies d'oxyde de plomb qui sert à amorcer la formation. Comme la plaque pourrait subir, au bout d'un certain temps, un allongement latéral d'en-

viron 5 pour 100 de la longueur totale, on a soin de lui donner la forme représentée (fig. 23), qui a l'avantage de permettre des dilatations dans tous les sens, sans que le cadre subisse lui-même de déformation. Il faut citer enfin les accumulateurs Legay, dont les plaques sont cylindriques et striées.

D'une manière générale, la formation lente produit d'excellents résultats, mais elle dure plusieurs mois, et nécessite une dépense

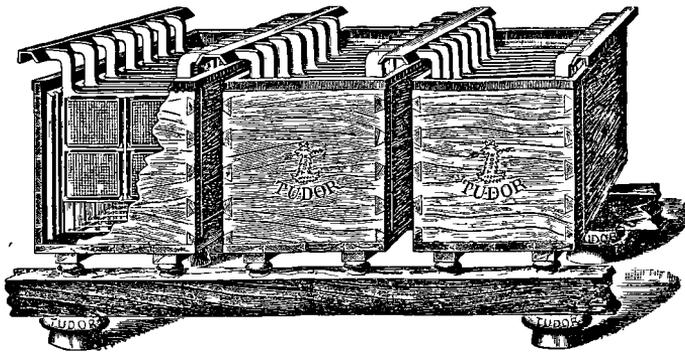


Fig. 23.

d'énergie qui augmente considérablement le prix de revient des appareils. Elle doit, dans tous les cas, être conduite méthodiquement, en graduant progressivement la durée des charges et des décharges successives.

La *formation artificielle* consiste à déposer au préalable sur les électrodes, par une action chimique directe, les couches nécessaires de matières actives.

Planté a indiqué le premier qu'en plongeant les plaques durant deux ou trois jours dans de l'acide nitrique étendu, la formation par charges et décharges successives était beaucoup plus rapide.

M. de Montaud décompose, entre les plaques à former, une

solution de litharge dans de l'eau chargée de soude caustique, à l'aide d'un courant dont l'intensité est calculée à raison de 5 ampères par décimètre carré de plaques. En très peu de temps, il se forme un dépôt de bioxyde de plomb sur l'électrode positive et de plomb pur sur l'électrode négative. Ce dernier dépôt est ensuite consolidé par pression.

La *formation rapide* enfin, presque universellement usitée, consiste à déposer non plus chimiquement, mais physiquement, les matières actives.

Chaque électrode est alors formée de deux parties distinctes : 1° une carcasse de plomb, aussi légère que le permettront les déformations possibles en cours de service ; 2° des matières actives posées d'avance sur cette carcasse.

Ces matières actives doivent être du bioxyde de plomb pour la plaque positive, du plomb pur pulvérulent pour l'autre.

En fait, le bioxyde de plomb n'est pas préparé d'une façon courante, et le plomb pulvérulent adhérerait difficilement à l'électrode. On préfère donc substituer au bioxyde une pâte épaisse d'oxyde de plomb, d'eau et d'acide sulfurique, — ou bien encore du minium, — et au plomb pulvérulent, de la litharge. Il suffit ensuite de faire passer un courant de sens convenable dans l'accumulateur, pour que le minium se peroxyde et pour que la litharge se réduise à l'état de plomb pulvérulent.

Tout l'art consiste à obtenir une adhérence réelle de ces matières actives à la carcasse. Les procédés ne se comptent plus.

Dans le premier modèle d'accumulateurs à formation rapide, dû à Faure, chaque électrode était enveloppée dans un sac de feutre ; mais ce sac s'oblitérait rapidement : il fallut recourir à un nouvel artifice.

Cet artifice, qui depuis s'est généralisé avec des variantes diverses, fut trouvé par Sellon. Il consiste à employer des électrodes en plomb fondu, en forme de grilles ; les trous de ces grilles sont ensuite remplis, soit de minium, soit de litharge. Afin de

rendre la carcasse plus rigide, on a soin, en outre, de mélanger au plomb qui la forme, un peu d'antimoine. Les électrodes de ce type, très répandues, sont désignées dans le commerce sous la marque EPS. La figure 24 représente la section de l'une d'elles. On voit que les trous ont une section en forme de losange qui facilite dans une certaine mesure la chute des pastilles de matières actives. Tous les perfectionnements imaginés par les inventeurs n'ont guère porté depuis que sur la forme de ces trous. Nous ne citerons que les principaux.

Gadot réunit par des rivets deux carcasses coulées séparément (fig. 25). Les pastilles sont alors emprisonnées.

Dans le modèle dû à Julien, le grillage, beaucoup plus serré, est formé de plomb, d'antimoine et de mercure, et chaque pastille est percée d'un trou. De cette façon, le foisonnement a pour unique résultat de remplir ce trou et la pastille reste adhé-



Fig. 24.

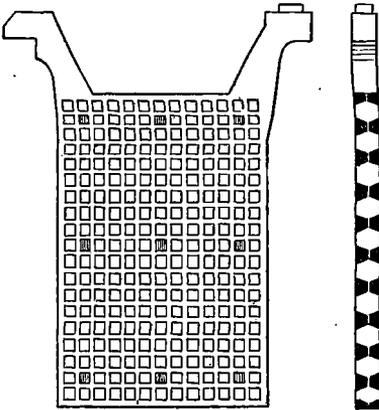


Fig. 25.

rente. Pollak prépare ses plaques en laminant du plomb entre deux cylindres munis de saillies capables de produire, sur les deux côtés de la feuille, des rainures croisées dans lesquelles on loge la pâte. Les électrodes ont alors l'aspect de brosses en plomb entre les brins desquelles auraient été immobilisées les matières actives.

Laurent Cély dispose des pastilles de chlorure de plomb dans un moule à plaques. Il coule ensuite dans ce moule du plomb qui emprisonne les pastilles latéralement. Une électrolyse

transforme enfin le chlorure de plomb en plomb spongieux et en bioxyde.

Atlas et Verdier ont proposé des accumulateurs à plaques horizontales. Dans ces appareils, l'électrode positive est une briquelette d'oxyde de plomb, la négative est une plaque de plomb. Ces électrodes sont superposées et séparées les unes des autres par des tasseaux en bois. Des fils isolés partent de chacune d'elles et se rendent aux deux bornes extérieures de prise de courant.

Enfin, la Société d'Oerlikon a préconisé des accumulateurs portatifs. Le liquide y est emprisonné dans une gelée obtenue en mélangeant 3 volumes de silicate de soude à 3 volumes de solution sulfurique d'une

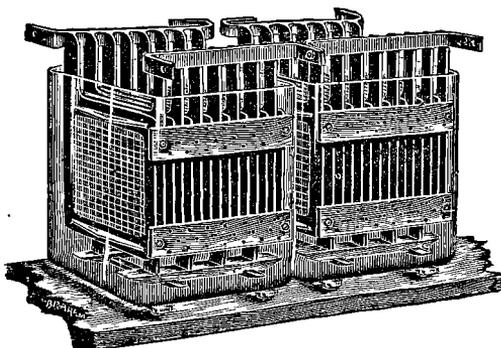


Fig. 26.

densité de 1,1. On arrose de temps à autre les éléments avec de l'eau. La résistance intérieure de l'élément est très notablement accrue par suite de l'interposition de cette gelée.

Quel que soit le procédé de formation adopté, les électrodes

et l'électrolyte qui les baigne sont contenus dans des caisses en bois doublé intérieurement de plomb ou d'ébonite (fig. 23), ou bien encore en verre (fig. 26). Dans ce dernier cas, le verre, qui est hygrométrique, est généralement recouvert sur ses bords d'une couche de paraffine ou de vaseline, destinée à empêcher l'acide de monter le long des parois.

32. — Charge et décharge des accumulateurs. — L'accumulateur une fois formé, comment l'utiliser, c'est-à-dire dans quelles conditions opérer sa charge et sa décharge ?

La charge s'opère sous l'action d'un courant emprunté à une source d'électricité. Le pôle positif de cette source doit être relié à l'électrode positive de l'accumulateur, son pôle négatif à l'électrode négative. On a soin, pour éviter les erreurs, de peindre en rouge l'électrode positive et en noir la négative.

La source d'électricité doit, de plus, être convenablement choisie.

A mesure que la charge s'opère, en effet, l'accumulateur acquiert peu à peu la force électromotrice qui lui est propre et qui, orientée en sens inverse de celle de la source, tend à détruire celle-ci (fig. 16 et 17). Pour que la charge puisse s'effectuer entièrement, il est donc nécessaire que la force électromotrice de la source soit supérieure à celle que possédera la batterie après charge complète.

De plus, la charge a pour résultat de produire des modifications chimiques dans la nature des électrodes. Une modification chimique déterminée exige, pour être produite, le passage d'une quantité d'électricité également bien déterminée. Suivant que ce passage à travers les électrodes s'effectue plus ou moins vite ou, ce qui revient au même, suivant que l'intensité du courant de charge est plus ou moins grande, les modifications résultantes, pour une même dépense d'énergie, s'opéreront dans des conditions plus ou moins satisfaisantes.

C'est l'expérience qui a guidé dans le choix de cette intensité la plus favorable.

A priori, sa valeur est proportionnelle à la surface des électrodes. Si une électrode de 1 décimètre carré a besoin d'un courant de 5 ampères pour être modifiée, une plaque identique, mais de surface double, exigera un courant de 10 ampères. L'épaisseur des électrodes étant sensiblement constante, leur surface est proportionnelle à leur poids. Les constructeurs ont donc pris l'habitude de désigner simplement le régime de charge le plus favorable par kilogramme de plaques.

Ce régime est généralement voisin de l'ampère. Cela veut

dire que si l'ensemble des plaques positives et négatives (connexions non comprises) pèse, par exemple, 10 kilogrammes, l'intensité du courant de charge la plus convenable sera d'environ 10 ampères.

On peut reconnaître à divers signes que la charge est terminée :

1° Au moment où les électrodes cessent d'être attaquées, le courant de charge s'emploie entièrement à décomposer l'eau du liquide ; celui-ci bouillonne violemment sous l'action des gaz qui se dégagent. C'est un premier indice.

2° Un second indice est fourni par la marche même de la force électromotrice de l'accumulateur. Avant toute charge, cette force électromotrice est d'environ 1^v,9. Lorsque le courant commence à passer, elle atteint très rapidement 2^v,2. Elle croît ensuite lentement, jusqu'à ce qu'elle remonte brusquement à 2^v,5. A ce moment, le dégagement de gaz commence. La charge peut être considérée comme terminée. Si on laisse ensuite l'accumulateur à lui-même, sa force électromotrice baisse de nouveau rapidement pour retomber à 2^v,3.

3° Enfin, si l'on pèse le liquide de l'accumulateur avec un aréomètre Baumé, on constate que celui-ci marque avant la charge de 18° à 20°. A mesure que la charge s'effectue, la densité du liquide augmente. Lorsque la charge est complète, l'aréomètre marque de 28° à 30°.

La décharge d'un accumulateur présente exactement les mêmes phases que la charge, mais en ordre inverse. Elle exige les mêmes précautions. L'intensité choisie pour le courant de décharge peut être cependant supérieure à celle du régime de charge et monter jusqu'à 3 ampères : il y a intérêt à ne pas atteindre ce chiffre en marche normale.

La fin de la décharge se reconnaît, soit à l'aide de l'aréomètre dont les indications passent de 28° ou 30° à 18° ou 20°, soit à la baisse brusque de la force électromotrice des éléments qui tombe rapidement de 2^v,2 à 1^v,9.

33. — Précautions à prendre dans l'emploi des accumulateurs. — Plusieurs précautions sont nécessaires pour maintenir en bon état une batterie d'accumulateurs.

Il faut, en premier lieu, éviter les courts circuits (§ 30) qui pourraient se produire, soit entre deux électrodes d'un même élément, soit entre les éléments voisins de la batterie. Ces courts circuits provoqueraient, en effet, la décharge permanente des appareils, sans résultat utilisable. On a soin, dans ce but, de veiller très exactement à ce que les pastilles qui se détachent accidentellement des électrodes à grille, n'établissent pas de contacts entre les plaques. On doit s'abstenir également de toute manœuvre susceptible de provoquer la chute des pastilles (chocs, décharge trop rapide, etc.). Chaque accumulateur de la batterie est en outre supporté par des isolateurs en verre et à huile minérale, destinés à l'isoler parfaitement des éléments voisins.

Il faut, en second lieu, surveiller la composition du liquide, ramener au taux nécessaire la densité par l'addition d'acide sulfurique très pur et préparé au soufre, et éviter la chute des poussières qui consomment l'acide inutilement. On recouvre généralement à cette intention le liquide d'une couche d'huile minérale.

Le bouillonnement du liquide, à la fin de la charge, a l'inconvénient de projeter de l'acide sur les connexions. Celles-ci se détériorent rapidement. Il est donc nécessaire de recouvrir d'huile minérale celles qui sont en cuivre.

Dans certains modèles, par exemple le modèle Faure, Sellon et Volckmar, ou bien encore le modèle Tudor (fig. 27), ces connexions sont en plomb et soudées d'avance. Mais ce procédé rend difficiles les modifications de montage. On préfère employer pour

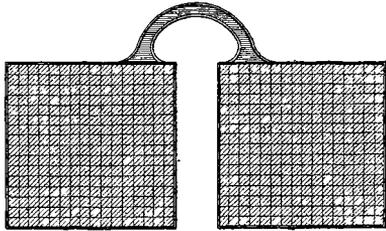


Fig. 27.

les connexions un alliage de plomb et d'antimoine qui a l'avantage de ne pas s'oxyder.

Enfin, on a constaté qu'une batterie laissée longtemps déchargée s'usait rapidement. Il est dès lors utile de procéder à la charge immédiatement après la décharge.

34. — **Constantes des accumulateurs.** — La force électromotrice des accumulateurs au plomb est généralement voisine de 2^r,2. Leur résistance intérieure est des plus faibles. Elle croît d'ailleurs à la fin de la charge et de la décharge. Il résulte, de mesures faites par M. Ayrton sur un élément EPS, que la résistance intérieure de celui-ci était d'environ 0^m,12 à la charge et 0^m,0355 à la décharge, par décimètre carré d'électrodes.

Les prospectus des fabricants mentionnent en général d'autres constantes dont il est utile d'indiquer ici la signification.

Ce sont :

1° *La capacité utilisable.* — C'est la quantité d'électricité que l'accumulateur peut fournir à la décharge. Elle est mesurée en supposant que l'élément a été chargé à refus et déchargé jusqu'au moment où commence la baisse brusque de sa force électromotrice.

De même que le régime de charge, cette capacité est d'habitude rapportée au kilogramme de plaque. Celle des accumulateurs à formation rapide varie de 9 à 13 ampères-heures.

2° *Le rendement en énergie.* — D'une manière générale, on appelle rendement d'une machine le rapport entre la puissance recueillie dans cette machine et la puissance totale qui lui a été fournie.

Un exemple va faire comprendre la signification exacte de cette définition.

Supposons qu'il s'agisse d'une turbine actionnée par une chute d'eau. La chute produit, en chaque unité de temps, un certain nombre de kilogrammètres, égal au produit du nombre de litres d'eau tombant pendant une seconde par la hauteur de chute.

D'autre part, on recueille sur l'arbre de la turbine un nombre de kilogrammètres évidemment moindre. Une partie de l'énergie fournie par la chute a été en effet absorbée par les chocs, les frottements, l'échauffement des paliers, etc.

Le rapport de l'énergie, en kilogrammètres, disponible sur l'arbre de la turbine à l'énergie de la chute, est précisément ce qu'on appelle le rendement de la turbine.

Semblablement, le rendement en énergie d'un accumulateur est le rapport de l'énergie restituée par l'accumulateur à la décharge, à l'énergie qui lui a été fournie pendant la charge.

Chacune de ces énergies n'est autre chose que le travail électrique, exprimé en watt-heures, fourni pendant chacune des opérations de charge et de décharge. On l'évalue en prenant dans chaque cas le produit de la force électromotrice moyenne (exprimée en volts) par l'intensité moyenne (exprimée en ampères-heures).

Ce rendement ne dépasse pas 0,87 dans les meilleurs accumulateurs.

3° *Le rendement en quantité.* — Par analogie, on appelle rendement en quantité le rapport de la quantité d'électricité restituée pendant la décharge par l'accumulateur, à la quantité d'électricité qu'il a reçue pendant la charge.

Ce rendement est toujours supérieur au précédent. Il peut atteindre 0,90.

35. — *Utilisation des accumulateurs.* — Sans entrer dans le détail, nous pouvons prévoir dès maintenant quels services les accumulateurs sont appelés à rendre dans l'industrie. Ils peuvent servir en effet, soit de régulateurs de débit électrique, soit de transformateurs, soit de réservoirs d'énergie électrique.

Pour les utiliser comme régulateurs, il suffira, par exemple, de les mettre en dérivation aux bornes d'une machine. Si la force électromotrice de la machine s'élève, l'excès correspondant d'énergie électrique charge les accumulateurs et s'y emmagasine. Si elle diminue, la batterie se décharge à son tour et fournit l'excédent

nécessaire. Dans les deux cas, le débit à l'extérieur est resté fixe.

Pour les utiliser comme transformateurs, il suffira, si l'on veut, de charger les éléments groupés en tension et de les décharger en les groupant en quantité.

La dernière application, et l'une aussi des plus fréquentes, s'explique d'elle-même.

Quel que soit le mode d'utilisation choisi, on a le plus grand intérêt à être fixé, à tout instant de la décharge, sur la quantité d'électricité encore disponible dans la batterie. On a imaginé à cet effet des *indicateurs de charge*.

Tous sont fondés sur le même principe. Ce sont des aréomètres qui inscrivent l'état de la décharge, à l'aide de l'observation des variations de densité du liquide de l'accumulateur. Il convient de citer, parmi ces appareils, ceux qu'ont imaginés MM. Sellon et Roux.

L'indicateur Sellon est un densimètre ordinaire plongé dans le liquide et dont les mouvements sont enregistrés par un appareil automatique.

L'indicateur Roux est un aréomètre dont la boule a toute la hauteur de l'accumulateur, afin de tenir compte des diverses densités des couches du liquide. Un système de leviers équilibrés permet de mettre la tige en relation avec une aiguille indicatrice qui se déplace sur un cadre convenablement gradué.

L'usage des accumulateurs est fort répandu. Il s'étendrait encore plus, si le poids et la durée de ces appareils n'en rendaient l'emploi assez difficile ou coûteux.

Il faut en moyenne 260 kilogrammes de plaque pour produire un cheval-heure. D'autre part, si les bonnes électrodes négatives d'un élément à grille bien entretenu peuvent durer jusqu'à dix ans, les électrodes positives subsistent rarement plus d'un an.

Si l'on soumet l'élément à un régime forcé ou s'écartant fréquemment des allures normales (c'est le cas de la traction des tramways), cette durée est encore plus limitée.

CHAPITRE III

Sources électro-chimiques diverses.

36. — Nous venons de passer en revue la plupart des sources électro-chimiques d'énergie. D'autres existent, encore inutilisées, et le nombre en est grand.

Toutes les actions chimiques qui dégagent de la chaleur, en particulier l'oxydation des métaux, les combustions de quelque nature qu'elles soient, etc., produisent de l'électricité.

Il suffit, par exemple, de la combustion de $0^{\text{mmgrm}},000000154$ de zinc pour faire dévier de un degré l'aiguille d'un galvanomètre sensible. L'eau douce ou salée, mise en contact avec les sels de la terre, crée de même une force électromotrice. M. Pellat, ayant placé un bec de Bunsen à l'intérieur d'un cylindre de métal creux fermé en haut par une plaque de même métal qui ne laissait que l'ouverture nécessaire au tirage, a constaté également la production d'un courant continu dans le conducteur réunissant le cylindre et le bec. L'appareil forme un véritable élément de pile pouvant s'associer avec toute autre pile. Sa force électromotrice est de $1,72$ si le bec est en cuivre et le cylindre en platine. Elster et Geitel ont enfin montré que toutes les flammes étaient des sources de force électromotrice et parvinrent à les réunir en tension comme des éléments ordinaires.

D'autres sources électro-chimiques d'énergie existent, dont le fonctionnement est encore à peu près inexpliqué. Parmi elles, il convient de citer particulièrement les *actinomètres*.

On appelle actinomètre une pile fonctionnant sous l'action de la lumière.

Becquerel annonça, dès 1839, que deux lames métalliques

plongées dans diverses solutions étaient susceptibles de fournir un courant quand un faisceau lumineux tombait sur l'une d'elles. Cette découverte donna lieu aussitôt à de nombreux travaux dus à MM. Grove, Egoroff, Hankel, Grivaux et Pellat. Tout récemment enfin, MM. Maréchal et Rigollot ont décrit un actinomètre de leur invention qui vient d'entrer dans la pratique.

Celui-ci se compose de deux lames de cuivre de un centimètre carré de surface environ. L'une d'elles, après avoir été bien nettoyée, est oxydée en la chauffant sur un bec Bunsen jusqu'à ce que les irrisations produites aient pris une teinte uniforme. On la plonge ensuite dans une solution au millième, soit de vert malachite, soit d'azuline, soit de toute autre substance colorante convenablement choisie.

L'une des faces de cette lame reçoit les rayons lumineux. L'autre face est recouverte d'un isolant (paraffine, gomme laque, etc.).

La seconde lame est en cuivre ordinaire et est placée à 2 millimètres environ de la précédente. Le tout est plongé dans une solution de chlorure ou de bromure de sodium.

L'action de la lumière sur cet élément est instantanée. La force électromotrice dépend de la matière colorante choisie et de la nature des rayons incidents. Avec le vert malachite et des rayons rouges, elle atteint 0,6.

On a proposé d'utiliser cet actinomètre dans la télégraphie sous-marine et, d'une façon générale, pour enregistrer mécaniquement des signaux lumineux.

La théorie des actinomètres est encore très mal connue.

DEUXIÈME PARTIE

SOURCES ÉLECTRO-CALORIFIQUES D'ÉNERGIE

37. — Piles thermo-électriques. — Les sources électro-calorifiques d'énergie ont été connues dès la plus haute antiquité. C'est ainsi qu'on attribue à Théophraste d'Éricée (300 ans avant J.-C.) la découverte de l'électrisation des tourmalines sous l'action de la chaleur. Cependant, de tous les modes d'électrisation, celui-ci, qui paraît à la fois le plus naturel et le plus désirable, est aussi celui qui a le plus découragé les inventeurs et s'est refusé à tout progrès.

Il est d'usage de diviser en deux classes les phénomènes de production d'électricité sous l'action de la chaleur : les phénomènes *pyro-électriques* et les phénomènes *thermo-électriques*.

En réalité, il n'existe pas de différence essentielle entre eux. Les uns et les autres sont l'application du fait expérimental suivant : chaque fois que deux molécules de nature différente sont en contact et soumises à des variations de température, il se produit entre elles une force électromotrice.

Il existe trois procédés généraux connus pour réaliser ce contact de molécules différentes :

1° On peut prendre un cristal dont le coefficient de dilatation soit variable suivant les axes, et, par suite, dont les diverses molécules sont physiquement différentes.

On constate, en effet, qu'en chauffant un cristal de ce genre (tourmaline, boracite, topaze, axinite, silicate de zinc, etc.), ce cristal s'électrise et fonctionne comme une véritable pile thermo-

électrique de grande résistance intérieure. C'est aux phénomènes de ce genre qu'on a donné le nom de pyro-électriques.

2° On peut modifier physiquement l'état de deux parties voisines d'un même conducteur.

En chauffant, par exemple, un fil de cuivre dont une partie a été recuite et l'autre écroûie (cadre de Magnus), on voit qu'un courant passe dans ce fil.

3° On peut enfin, et c'est le moyen le plus simple, souder l'un à l'autre deux métaux différents.

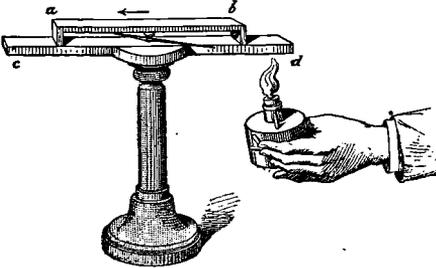


Fig. 28.

L'expérience classique de Seebeck met ce fait en évidence. Elle consiste à prendre une lame de cuivre *ab*, soudée en deux points à une lame de bismuth *cd* (fig. 28). Lorsque l'on chauffe une des deux soudures, un courant se

produit dans le circuit métallique ainsi formé, allant de la soudure chaude à la soudure froide en passant par le cuivre.

Toutes les piles thermo-électriques ne sont que la réunion d'un certain nombre de couples analogues à celui de Seebeck.

La force électromotrice produite dans ces conditions dépend de la nature des métaux en contact, de la température de la soudure chauffée et de la différence de cette température avec celle de la soudure froide. Elle est toujours très faible. C'est ainsi que, d'après Becquerel, la force électromotrice d'un couple bismuth-plomb, pour une différence de température de 1° entre les deux soudures, la soudure froide étant à 50°, atteint seulement 40 microvolts (millionièmes de volt). Il en résulte que, pour avoir des forces électromotrices pratiques, on est obligé d'associer en tension un très grand nombre d'éléments thermo-électriques.

Cette association est généralement faite d'avance. On constitue pour cela une sorte de chaîne (fig. 29) dont les chaînons sont alternativement formés avec les corps choisis pour les couples. Toutes les soudures de rang pair sont placées d'un côté, les soudures de rang impair de l'autre. Pour provoquer le passage du courant, il suffit ensuite de chauffer avec un foyer unique toutes les soudures paires, par exemple.

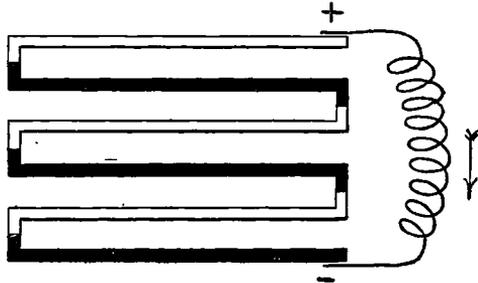


Fig. 29.

Nous ne décrivons, parmi les piles thermo-électriques connues, que la pile de Melloni et Nobili, et la pile Clamond.

La pile de Melloni et Nobili se compose d'environ 50 petits barreaux de bismuth et d'antimoine ayant chacun 5 ou 6 centimètres

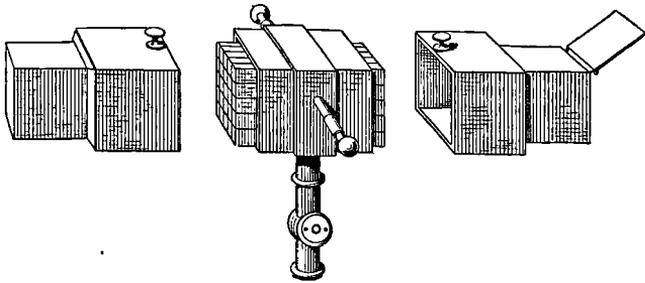


Fig. 30.

de longueur et soudés les uns aux autres de manière que les barreaux de bismuth alternent avec ceux d'antimoine.

L'ensemble forme un petit parallépipède enfermé dans une gaine de laiton (fig. 30).

Cet appareil fournit des courants appréciables, sous l'action de

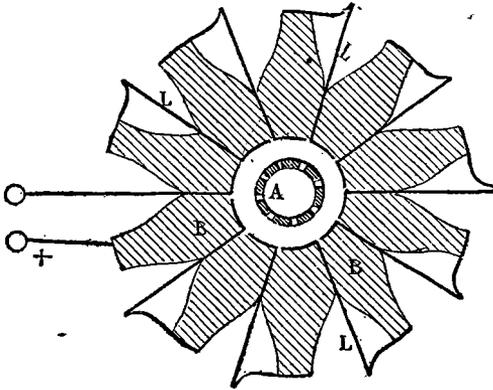


Fig. 31.

très faibles différences de température entre ses deux faces. Il a été heureusement utilisé dans les laboratoires pour l'étude de la chaleur rayonnante.

La pile Clamond est, au contraire, un appareil industriel. Le couple élémentaire se compose d'un barreau de fer soudé à un autre barreau en alliage de

zinc et d'antimoine. On forme une couronne avec dix couples réunis en tension (fig. 31). On superpose ensuite un certain nombre de ces couronnes, en ayant soin de les séparer les unes des autres par de l'amiante. Des bornes réunies aux extrémités du circuit formé par chacune d'elles permettent à volonté de grouper ces séries de 10 éléments, soit en tension, soit en quantité (fig. 32). Un tube central en terre réfractaire et muni d'ouvertures latérales par lesquelles s'échappent les gaz chauffe toutes les soudures intérieures. Dans certains modèles, on effectue aussi le chauffage à l'aide d'un feu de coke. Dans tous

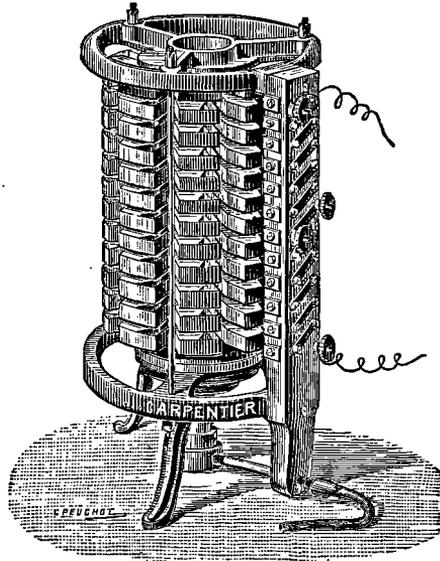


Fig. 32.

les cas, afin de régulariser l'action du foyer et d'éviter la fusion des soudures par suite d'un coup de feu, il est d'usage d'emprisonner les soudures à chauffer dans une couronne en terre réfractaire.

Une pile de Clamond de 10 couronnes (100 éléments) a une force électromotrice de 8 volts, et dépense 180 litres de gaz d'éclairage à l'heure. Elle n'exige aucun entretien et est très constante. Sa résistance intérieure est de 3^m,2 seulement.

Noé et Rebiceck ont substitué avec avantage au couple de Clamond un autre couple composé d'un barreau de maillechort et d'un barreau en alliage de zinc et d'antimoine.

38. — Rendement des piles thermo-électriques. — Le rendement des piles thermo-électriques est de 0,02 environ.

La faiblesse de ce chiffre explique le faible usage qui est fait de ces piles. Il n'est pas douteux cependant que si l'on parvenait à transformer la chaleur en électricité, de manière à obtenir un rendement comparable, par exemple, à celui qui s'obtient à l'aide d'une dynamo, la plus grande révolution industrielle du siècle serait accomplie. Aucune raison théorique n'autorise à douter que cette révolution se fasse. L'écart à franchir n'est pas d'ailleurs considérable, car, en tenant compte des pertes diverses (machine à vapeur, transmission, dynamo, etc.), le rendement total d'une installation avec dynamo n'atteint pas plus de 0,06.

TROISIÈME PARTIE

SOURCES ÉLECTRO-MÉCANIQUES D'ÉNERGIE

39. — Un grand nombre d'actions mécaniques sont susceptibles de produire de l'électricité. C'est ainsi que le frottement des corps, leur compression, la flexion ou les vibrations des solides, le clivage des cristaux mauvais conducteurs, peuvent, dans certaines conditions, être accompagnés de manifestations électriques.

Tous les appareils destinés à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique peuvent cependant se grouper en deux classes très distinctes :

- 1° Les machines à frottement et à influence;
- 2° Les machines dynamo-électriques.

La seconde de ces classes comprend la presque totalité des appareils utilisés par l'industrie électrique. Dans un sujet si vaste, il sera nécessaire de limiter nos descriptions. Nous essayerons du moins de donner des indications générales permettant au lecteur de se rendre compte des machines qu'il rencontrerait et dont nous n'aurions pas parlé.

CHAPITRE PREMIER

Machines à frottement et à influence.

40. — Les machines à frottement et à influence sont plus généralement connues sous le nom de *machines électrostatiques*, bien que ce terme implique une distinction sans objet dans l'électricité. Après avoir passionné, les premières, l'intérêt des savants, elles ont été délaissées, et ne servent plus guère qu'à des applications médicales restreintes ou à des expériences de laboratoire.

Leur théorie est encore très obscure ; nous ne l'exposerons que sommairement.

41. — **Généralités sur l'électrisation.** — Tous les corps peuvent se diviser au point de vue de l'électrisation en deux groupes : les corps *conducteurs* et les corps *isolants* ou *diélectriques*.

Les premiers, tels que les métaux, sont caractérisés par ce fait que les actions électriques semblent s'y propager avec une grande rapidité et sans rencontrer d'obstacle apparent.

Les seconds, au contraire, tels que l'air, le verre, la soie, la résine, la gutta-percha, etc., paraissent opposer une résistance considérable au déplacement des masses électriques, et les actions électriques ne s'y propagent qu'avec une extrême lenteur.

Plusieurs conséquences importantes découlent de ce fait.

1° La circulation des masses électriques s'opérant sans difficulté dans les corps conducteurs, la pression électrique doit être constante dans ces corps. Nous savons, en effet, que dans un conducteur électrisé en équilibre, le potentiel est constant.

C'est là un phénomène entièrement analogue à celui de la répartition des pressions dans un liquide en équilibre.

2° Supposons pour un instant que des masses électriques soient situées à l'intérieur d'un corps conducteur. Par définition (§ 6), elles exercent entre elles des forces répulsives et tendent à s'écartier autant que possible les unes des autres.

Rien ne s'oppose, dans le corps conducteur, à ce que ces masses électriques obéissent à l'action de ces forces. Ces masses se déplaceront donc et s'éloigneront jusqu'à ce qu'elles rencontrent un obstacle à leur déplacement, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'elles soient parvenues à la surface même du conducteur où elles seront arrêtées par le diélectrique environnant.

Dans un corps conducteur, les masses électriques sont, par suite, toujours à la surface. Les expériences bien connues des sphères de Biot et du bonnet électrique mettent cette seconde conséquence en évidence.

3° Considérons les masses électriques parvenues à la surface du conducteur. Si le diélectrique a arrêté leur déplacement, les forces qui tendent à provoquer la continuation de ce déplacement n'en existent pas moins. Tout le long de la surface du conducteur, le diélectrique subit donc une véritable pression électrique dépendant de la répartition des masses et de leur nombre. Cette pression est calculable.

On peut assimiler les masses électriques ainsi arrêtées à la surface du conducteur à une série de petits ressorts tendus, agissant sur le diélectrique tout en ayant une tension généralement trop faible pour vaincre la résistance de celui-ci¹.

La pression exercée en un point du diélectrique est, comme

1. Le diélectrique subit en réalité de véritables déformations physiques sous l'action des forces électriques. En 1879, Duter a montré que le volume du diélectrique d'une bouteille de Leyde se dilatait proportionnellement au carré de la différence de potentiel des armatures et en raison inverse de l'épaisseur de ce diélectrique.

Kerr a découvert également que le verre, entreposé entre deux corps électrisés, se comporte comme les corps biréfringents à un axe, et est susceptible de polariser la lumière. L'axe est, dans ce cas, parallèle en chaque point à la direction de la force électrique en ce point.

on vient de le dire, la résultante de toutes les actions élémentaires dues aux masses environnantes. Rien ne détermine à priori le sens de cette pression. En particulier, elle peut être dirigée, soit du conducteur vers le diélectrique, soit en sens inverse, suivant l'orientation de ses composantes.

On a l'habitude de spécifier ce sens en ajoutant les mots positif ou négatif, suivant qu'on se trouve dans le premier ou le second de ces cas. On dit alors, par abréviation, que le corps est électrisé positivement ou négativement. L'expression est d'ailleurs fâcheuse, car elle semblerait impliquer l'existence de deux sortes de masses électriques, tandis qu'en fait elle a uniquement pour but de définir le sens de la résultante des actions mécaniques exercées par une surface de conducteur couverte de masses électriques, sur un corps placé dans le voisinage.

4° Il peut arriver que la pression exercée par une masse électrique sur le diélectrique devienne suffisante pour vaincre la résistance de celui-ci. Cette masse se déplace alors, mais le travail correspondant à ce déplacement est généralement assez considérable pour que la chaleur développée se manifeste sous forme d'étincelle lumineuse, et cette étincelle est accompagnée d'une véritable rupture de l'isolant. C'est le phénomène de *décharge*.

Un moyen commode pour provoquer une décharge consiste à armer d'une pointe le conducteur électrisé. On constate, en effet, expérimentalement qu'à l'extrémité des pointes la pression électrique devient infiniment grande. Il résulte de là que placer en regard deux conducteurs électrisés, dont l'un est armé d'une pointe, revient à les mettre en communication, comme si le diélectrique interposé entre eux n'existait pas.

Ces remarques faites, nous pouvons exposer maintenant les deux expériences fondamentales d'électrisation sur lesquelles repose la construction de toutes les machines électrostatiques.

42. — **Électrisation par frottement.** — La première de ces expériences est la suivante :

Chaque fois que l'on frotte l'un contre l'autre deux corps isolants, ou deux conducteurs munis de supports isolants, ces deux corps s'électrisent, et, dans ce cas, les actions mécaniques exercées par chacun d'eux sur le diélectrique environnant sont dirigées en sens inverse l'une de l'autre, ou bien encore, en employant le langage usuel, l'un des corps est électrisé positivement et l'autre négativement.

Ce dernier fait n'a rien qui puisse étonner. On ne saurait, en effet, provoquer en un point d'un corps une pression dans un sens, sans faire manifester en un autre point quelconque de l'espace une dépression équivalente.

43. — **Électrisation par influence.** — La seconde expérience est un peu plus complexe.

Supposons qu'un corps électrisé A soit placé dans un diélectrique, l'air par exemple. Amenons à une certaine distance de lui

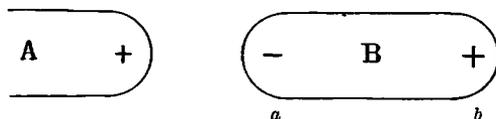


Fig. 33.

un autre conducteur B à l'état neutre, c'est-à-dire ne présentant aucune apparence d'électrisation : aussitôt le conducteur B paraît électrisé (fig. 33).

Pour reconnaître ce fait, prenons une balle de sureau suspendue à l'extrémité d'un petit pendule et électrisée préalablement en la portant au contact de A : ce pendule est dès lors fortement repoussé par le corps A.

Approchons-le de B, on voit qu'il est également soumis à de violentes actions mécaniques de la part de ce corps ; mais, dans le voisinage de la partie *a* de ce conducteur, ces actions se réduisent

à une attraction, tandis que dans la partie *b* elles se réduisent à une répulsion. Le corps B est donc électrisé, mais les divers points de sa surface agissent différemment sur le pendule.

Pour faire disparaître cette différence d'action, l'expérience prouve qu'il faut mettre un instant un point de B en communication avec le sol. Dès lors, tous les points de B, indistinctement, produisent des attractions sur le pendule, c'est-à-dire un effet exactement inverse de celui produit par le conducteur A.

En résumé, il suffit donc d'approcher un corps neutre que nous appellerons *induit* d'un corps électrisé que nous appellerons

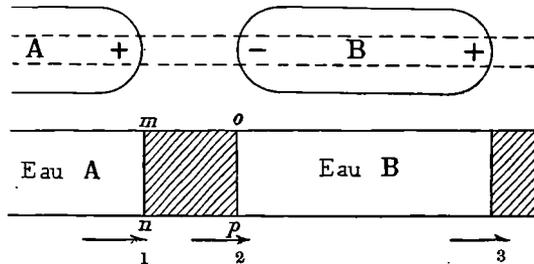


Fig. 34.

inducteur, et de mettre un instant l'induit en communication avec la terre, pour qu'il soit lui-même électrisé, les effets mécaniques qu'il produit sur le diélectrique environnant étant du reste contraire à ceux produits par l'inducteur.

Une analogie hydrostatique sera encore d'un précieux secours pour bien comprendre le sens du phénomène.

Soient une conduite d'eau en équilibre, fermée à l'une de ses extrémités, suivant *qr*, par une paroi solide d'épaisseur indéterminée, et dans cette conduite, un piston *mnop* (fig. 34).

Nous pouvons assimiler l'eau à un corps conducteur, les parois et le piston à un diélectrique : nous voyons que ces éléments se succèdent exactement dans le même ordre que les conducteurs et le diélectrique dans l'expérience d'électrisation par influence.

Nous avons dit que le fait d'électriser le corps A revenait à provoquer sur sa surface une série de pressions d'un sens déterminé s'exerçant sur le diélectrique environnant. Cela revient, dans notre dispositif hydrostatique, à faire exercer, par exemple, par la masse A du liquide une pression sur la face mn du piston. Représentons sa direction par la flèche 1.

Des pressions correspondantes et de même sens se manifestent aussitôt sur la face op du piston, dans toute la masse de B et en particulier sur la paroi qr . Si nous examinons l'orientation des flèches qui marquent les directions de ces pressions, nous voyons que celles-ci vont de l'intérieur à l'extérieur de A, en mn , de l'extérieur à l'intérieur de B en op , de l'intérieur à l'extérieur de B en qr . Nous avons précisément la succession d'orientations inverses signalées dans la première partie de l'expérience électrique.

De même, la mise à la terre du conducteur B revient à substituer à la paroi qr une masse indéfinie de liquide, et par conséquent à rendre négligeable la pression qui s'exerçait sur elle.

Suivant qu'elles utilisent l'un ou l'autre des deux modes d'électrisation que nous venons de décrire, les machines électrostatiques sont dites à *frottement* ou à *influence*.

44. — Machines à frottement. — Les machines à frottement, aujourd'hui à peu près abandonnées, sont d'un fonctionnement très simple. Leur principe est le suivant :

On électrise un plateau de verre ou d'ébonite A en le faisant passer à frottement dur entre deux coussinets. L'électricité produite sur le plateau est recueillie à distance sur un conducteur à l'aide d'une série de pointes réunies en forme de peigne ; on se rappelle, en effet, que l'emploi des pointes permet de mettre en véritable communication électrique deux corps électrisés voisins, séparés par un diélectrique (§ 41). L'électricité produite sur les coussinets s'écoule à la terre par l'intermédiaire d'une chaîne.

Tout le monde a vu dans les laboratoires la machine de

Ramsden, qui est une des plus anciennes réalisations de la machine à frottement. Nous donnons ici (fig. 35), d'après M. Eric Gérard, le modèle d'une machine à peu près identique, due à Bornhardt, et qui est encore en usage dans certaines exploitations de mines belges.

Cette machine est enfermée dans une caisse en bois, soigneu-

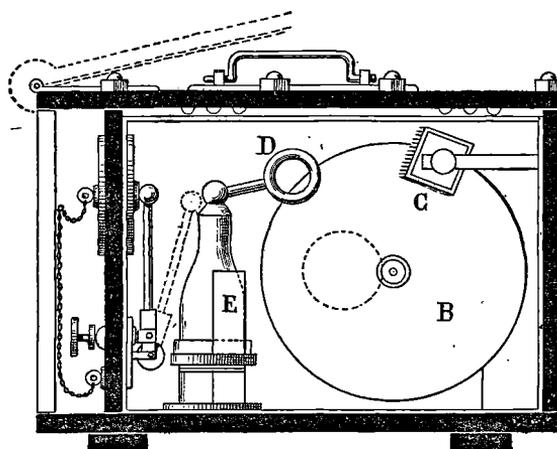


Fig. 35.

sement desséchée. On voit en B le plateau d'ébonite, en c le coussinet, en d le peigne recueillant l'électricité du plateau.

On emploie cette machine à charger une bouteille de Leyde ; pour cela, l'une des armatures de la bouteille est constamment reliée aux peignes, et l'autre au coussinet. Au moment de la décharge de cette bouteille, l'étincelle produite fait éclater du fulminate et partir la mine préparée.

Les machines à frottement sont des appareils défectueux et de très faible rendement. Il est nécessaire, pour qu'elles fonctionnent, de dessécher parfaitement leurs supports. On recouvre aussi généralement leurs coussinets avec de l'or mussif (bisulfure d'étain) ou tout autre substance également douce au toucher (talc, farine, charbon de coke en fine poussière, etc.). L'électrisation par frotte-

ment s'opère beaucoup mieux dans ces conditions. Cependant, malgré toutes les précautions, il arrive rapidement un moment où la rotation du plateau ne produit plus que l'électricité nécessaire pour compenser exactement les pertes par l'air ou les supports.

45. — **Machines à influence.** — La plus ancienne et la plus rudimentaire des machines à influence est due à Volta. C'est l'électrophore.

L'électrophore (fig. 36) permet de reproduire commodément l'expérience d'électrisation par influence que nous avons déjà

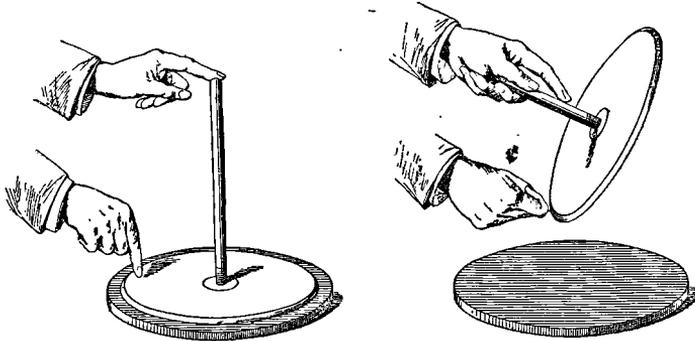


Fig. 36.

décrite (§ 43). Il se compose de deux parties : un gâteau de résine électrisé préalablement, c'est l'inducteur ; un conducteur porté par un manchon isolant, et que l'on électrise par influence en l'approchant de l'inducteur et en le mettant un instant, avec le doigt, en communication avec la terre, c'est l'induit.

L'emploi de l'électrophore nécessite donc plusieurs mouvements : 1° approcher l'induit de l'inducteur ; 2° le toucher avec le doigt ; 3° l'écarter de l'inducteur ; 4° utiliser enfin sa charge, en le mettant en communication avec le conducteur qu'on charge, une bouteille de Leyde, par exemple.

Il est évidemment désirable de produire mécaniquement et

avec rapidité cette succession d'opérations. C'est ce que l'on a tenté dans toutes les machines qui ont suivi, et ce que réalisent, avec plus ou moins de complication, les machines actuelles.

Nous pouvons les diviser en trois groupes : les machines du type replenisher, les machines dérivées de l'électrophore tournant et les machines du type Holtz.

Machines du type replenisher. — Le replenisher proprement dit est dû à lord Kelvin. Il est formé de deux électrophores associés et munis chacun de ressorts qui, par des contacts appropriés, jouent le rôle réservé à l'opérateur dans le cas où l'on fait usage de l'électrophore habituel.

Chacun des électrophores du replenisher se compose (fig. 37) d'un inducteur formé par une lame cylindrique I ou I', et d'un induit *i* ou *i'*, également métallique, monté sur un arbre et susceptible de prendre un mouvement de rotation. L'inducteur I est électrisé au préalable. Quand l'induit *i* passe devant lui, il s'électrise par influence. Un ressort *r* jouant le rôle du doigt de l'opérateur le met ensuite en communication avec l'induit *i'*. Puis, continuant de tourner, l'induit *i* cède sa charge par l'intermédiaire du ressort R à l'inducteur I' du second électrophore. C'est l'utilisation de la charge acquise par l'induit.

Nous avons bien ici, réalisée mécaniquement, la succession des quatre opérations de l'appareil de Volta ; mais, de plus, l'appareil est un véritable multiplicateur d'électricité, puisque, à chaque tour, la charge acquise par l'induit sert à augmenter celle de l'inducteur et, par contre-coup, celle de l'induit lui-même.

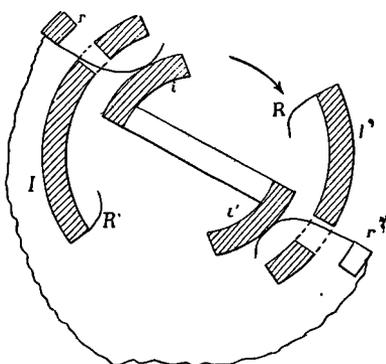


Fig. 37.

Le second électrophore I' , i' ajoute simplement son action à celle du premier.

L'appareil de lord Kelvin a été utilisé dans la télégraphie sous-marine. On en a fait aussi d'autres applications ingénieuses (allumeur de gaz). Il n'est pas douteux que, construit avec de grandes dimensions, ce ne soit une excellente machine. Nous rattacherons

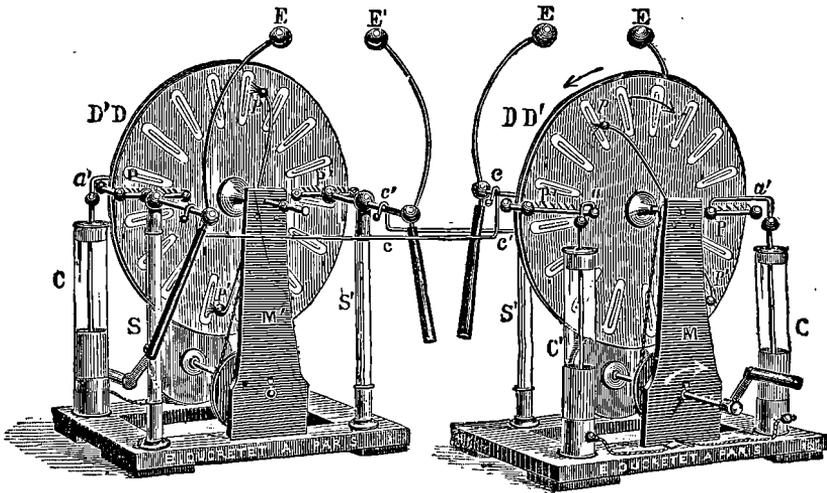


Fig. 38.

à son type la plus puissante des machines à influence actuelles, la machine de Whimshurst.

Celle-ci se compose essentiellement de deux plateaux D et D' en ébonite ou en verre (fig. 38) soigneusement vernis, auxquels une manivelle communique des rotations en sens inverse. Chacun de ces plateaux porte une série de disques en étain (une douzaine en général) disposés radialement. Deux conducteurs diagonaux, P et P' , correspondant à chaque plateau, sont munis de brosses métalliques qui balayent les secteurs passant devant elles. Deux peignes ayant leurs pointes tournées vers la surface extérieure des plateaux sont

enfin placés aux extrémités d'un diamètre horizontal et recueillent, pour le compte d'électrodes *E* et *E'* qu'on manœuvre à la main,

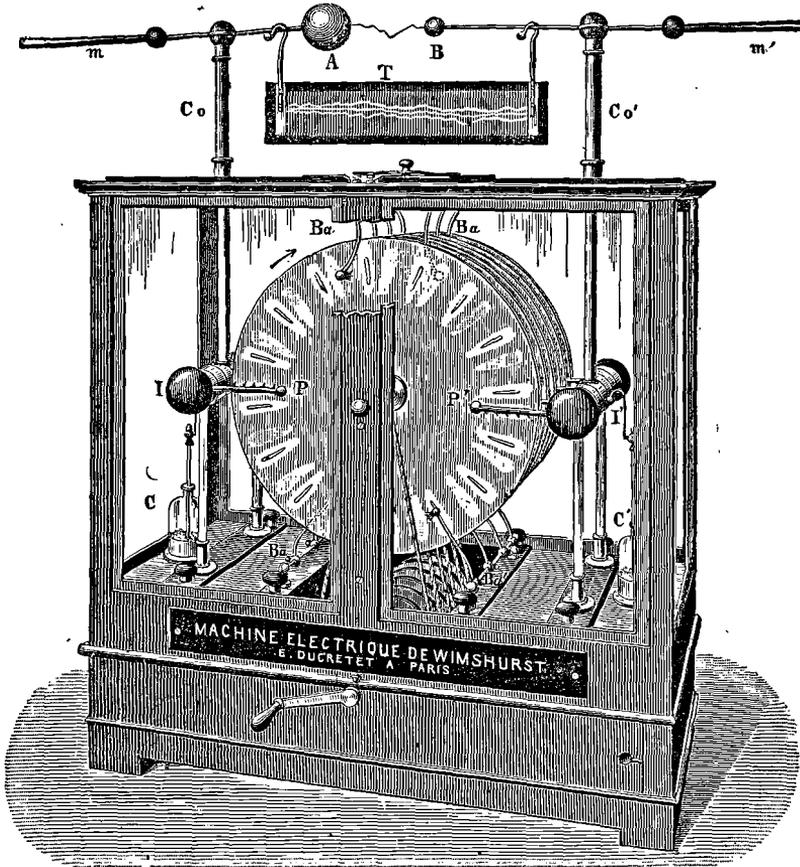


Fig. 39.

l'électricité produite. La figure 38, qui représente deux de ces machines associées, permet de se rendre compte à première vue de leur construction.

On voit que, comme dans le replenisher, nous avons là une série d'inducteurs et d'induits représentés par les secteurs d'étain, chaque secteur d'un plateau jouant le rôle d'inducteur par rapport au secteur correspondant de l'autre plateau et inversement. Les brosses tiennent lieu des ressorts r , r' et les peignes remplacent les contacts R, R' du replenisher.

M. Whimshurst a construit des modèles très puissants en associant un certain nombre de machines simples.

Une machine ainsi construite a été représentée figuré 39.

Tous les plateaux sont montés sur le même arbre et entraînés alternativement en sens contraire par des courroies ouvertes ou croisées. Chacun d'eux porte seize secteurs d'étain. Les brosses B_a sont fixées aux extrémités de tiges de cuivre, aboutissant elles-mêmes à la charpente de la cage. Les tiges C_o et C_o' de cuivre qui conduisent l'électricité des conducteurs I et I' aux électrodes externes A et B passent par des tubes de verre. On diminue ainsi considérablement les pertes. Une machine de ce genre fournit aisément 6 étincelles de 0^m,20 de longueur à chaque tour de manivelle.

Tout récemment, M. Bonetti a apporté de notables perfectionnements à la machine de Whimshurst en supprimant les secteurs et en augmentant le nombre des balais.

La machine Bonetti (fig. 40) comporte encore deux plateaux, soit en verre, soit en ébonite, à faces parallèles, isolés l'un de l'autre, et recevant des mouvements de rotation égaux et de sens contraire. Toutefois, ces plateaux ne sont plus munis de secteurs et chacun d'eux est pourvu d'un conducteur diamétral, dont on peut régler à volonté la position.

Ces conducteurs diamétraux sont munis, l'un et l'autre, de six balais disposés de manière à embrasser presque toute la surface du plateau qui leur correspond. Grâce à cette disposition, la partie électrisée qui, dans la machine Whimshurst, est limitée aux abords du balai frotteur, s'étend sur la presque totalité de la surface du plateau, et le débit est considérablement accru.

Des peignes embrassant les plateaux recueillent l'électricité

produite. Il est nécessaire d'amorcer au préalable la machine en posant un instant le doigt contre la partie supérieure de l'un des plateaux.

La machine Bonetti peut fournir des étincelles continues de 0^m,19 de longueur, avec des plateaux de 0^m,35 de diamètre

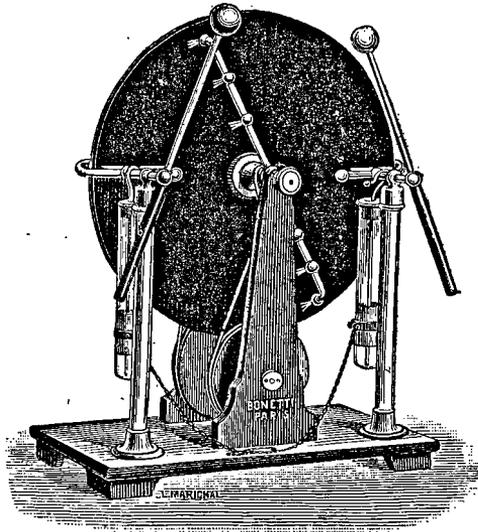


Fig. 40.

seulement. On peut, en outre, en déplaçant les balais le long du conducteur diamétral qui les porte, régler le débit à volonté. C'est un avantage précieux pour les applications médicales.

Machines du type électrophore tournant. — L'électrophore tournant est dû à Bertsch.

Il se compose essentiellement d'un disque de verre A (fig. 41) tournant en regard de deux peignes métalliques P et P', et d'un secteur S en caoutchouc placé vis-à-vis de sa partie inférieure.

On électrise au préalable ce secteur, et il constitue l'induc-

teur. La portion du disque de verre placée en regard de lui à un instant donné forme l'induit. Le peigne P' joue le rôle du doigt de l'opérateur ; le second peigne P recueille l'électricité de l'induit. Nous avons bien encore ici les éléments des quatre opérations nécessaires dans l'emploi de l'électrophore.

Carré a modifié, avec un certain succès, l'appareil de Bertsch,

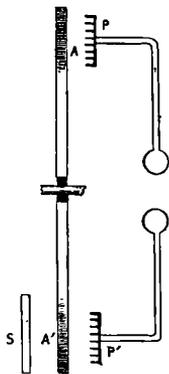


Fig. 41.

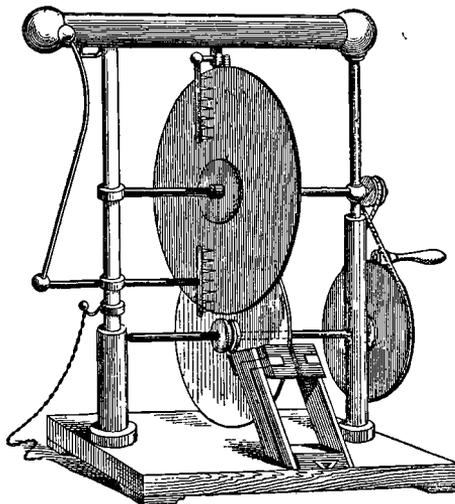


Fig. 42.

en supprimant l'obligation d'électriser l'inducteur S. Cet inducteur est alors constitué par un petit disque d'ébonite (fig. 42) électrisé d'une manière continue par frottement, grâce à son passage entre deux coussinets. La machine Carré est fréquemment employée dans la thérapeutique.

Machines du type Holtz. — La machine Holtz se compose de deux disques en verre (fig. 43) distants de 0^m,003 environ et de diamètres inégaux. Celui qui a le plus grand diamètre est fixe et percé de deux fenêtres. Le long de ces fenêtres sont collées

une bande et une languette de papier, cette dernière étant terminée en pointe. Le second disque est mobile et peut recevoir un mouvement de rotation très rapide (15 tours à la seconde). Deux peignes métalliques armés de pointes sont placés en regard de lui, aux extrémités d'un même diamètre horizontal.

Pour mettre en marche la machine, il est nécessaire d'électriser tout d'abord les deux bandes de papier. Pour cela, on approche de l'une d'elles un corps électrisé, après avoir réuni métalliquement les peignes, et l'on donne quelques tours à la machine.

Nous retrouvons là, comme dans les appareils précédents, les éléments de l'électrophore, c'est-à-dire : 1° des inducteurs (les bandes de papier); 2° des induits (les portions du disque tournant placées en regard des inducteurs);

3° les peignes et les pointes des languettes servant, soit à donner un contact momentané, soit à récolter l'électricité produite. Le détail des actions diverses mises en jeu dans la machine Holtz a cependant donné lieu à tant d'explications diverses que nous ne chercherons pas à l'analyser ici.

Moins considérable que celui de la machine Whimshurst, le débit d'une bonne machine de Holtz est encore vingt ou trente fois supérieur à celui d'une machine ordinaire.

On construit depuis quelque temps des machines de Holtz à quatre plateaux de 1 mètre de diamètre, qui peuvent fournir des étincelles de 0^m,30 de longueur.

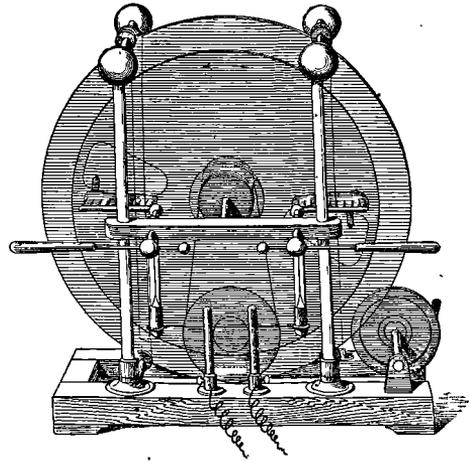


Fig. 43.

46. — Force électromotrice des machines électrostatiques. — Nous avons dit (§ 11) que les phénomènes électrostatiques étaient caractérisés par le transport de quantités d'électricité relativement faibles sous l'action de forces électromotrices considérables. Quelques chiffres seront utiles pour donner idée de ces valeurs. Ils sont, bien entendu, très approximatifs.

Il résulte de mesures effectuées par Rossetti que la force électromotrice développée par une bonne machine Holtz peut atteindre 52,000 volts. La résistance intérieure de cette machine varie avec la vitesse de rotation des plateaux; elle passe de 2,800 mégohms (millions d'ohms) pour une vitesse de 2 tours à la seconde à 570 mégohms pour une vitesse de 8 tours à la seconde.

D'après Kohlrausch, le courant maximum que fournirait une machine Holtz serait de 40 millièmes d'ampères.

CHAPITRE II

Machines dynamo-électriques.

47. — Les machines dynamo-électriques sont des appareils à l'aide desquels on utilise, pour la production d'une force électromotrice, les actions réciproques des courants et des aimants. Pour bien saisir leur fonctionnement, il est nécessaire de rappeler diverses notions générales relatives à ces actions.

I. — LOIS GÉNÉRALES DE L'INDUCTION

48. — Définitions. — On sait qu'un aimant est un morceau d'acier ou de fer qui jouit de la propriété d'attirer le fer.

Un barreau d'aimant présente à ses extrémités deux centres

apparents d'attraction. On les désigne sous le nom de *pôles* de l'aimant.

Quel que soit le point de l'espace où l'on place un aimant libre de se mouvoir, on constate que cet aimant s'oriente d'une manière identique; cette direction d'orientation coïncide sensiblement avec la ligne nord-sud géographique. Le pôle qui se tourne chaque fois vers le nord est dit *pôle nord* de l'aimant; l'autre est dit *pôle sud*. La ligne idéale qui joint ces deux pôles s'appelle *l'axe magnétique* de l'aimant.

49. — **Champ magnétique.** — Suspendons un barreau d'aimant A de manière qu'il affleure au niveau d'une nappe d'eau

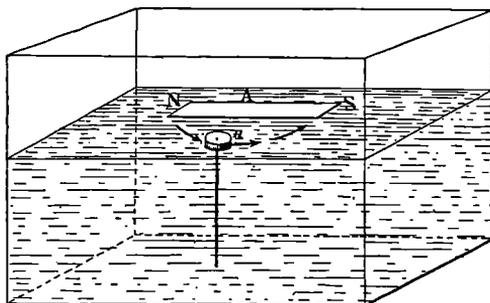


Fig. 44.

placée dans un vase (fig. 44). Plaçons verticalement dans l'eau une aiguille aimantée très longue et légère, dont le pôle nord *n*, par exemple, aura été encastré dans un bouchon de liège, et approchons-la du pôle N de l'aimant A.

Grâce à la longueur de l'aiguille, on peut admettre que les mouvements qui vont être observés sont uniquement dus à l'action de A sur le pôle *n* de l'aiguille. Dès qu'on abandonne celle-ci, on constate qu'elle se dirige vers le pôle sud de A, en suivant une certaine route curviligne. Ce déplacement a lieu, quel que soit le point

de départ et chaque fois dans le même sens; seule la route suivie varie.

Des conséquences importantes se déduisent de cette expérience :

1° Puisque les forces agissantes ne peuvent émaner que de A, un aimant exerce une action sur un pôle d'aimant placé dans son voisinage.

Ceci est vrai, non seulement dans le plan horizontal qui a servi à l'expérience, mais dans toutes les directions de l'espace. On peut en effet faire tourner sur lui-même l'aimant A autour de son axe magnétique, sans que pour cela le pôle N de l'aiguille cesse de se déplacer.

On appelle *champ magnétique* d'un aimant, l'ensemble des points de l'espace dans lesquels l'action de cet aimant sur un autre pôle d'aimant peut être manifestée. L'étendue du champ magnétique est théoriquement indéfinie; pratiquement, elle est limitée par la sensibilité des appareils qui servent à mettre en évidence cette action.

On appelle *force du champ en un point*, la force qui agit sur un pôle d'aimant choisi pour unité (celui de notre aiguille, par exemple) et placé en ce point.

2° En chaque point de sa route, le pôle N de l'aiguille se déplaçait évidemment dans la direction même de la force du champ qui agissait sur lui en ce point.

Puisque cette route était curviligne, on en conclut que, dans les conditions de l'expérience, la direction de la force du champ était elle-même constamment variable. Cette direction était fournie à chaque instant par la tangente à la courbe décrite par le pôle, et menée au point où se trouvait le pôle à l'instant considéré.

3° Cherchons un procédé graphique qui permette de rendre visible, pour ainsi dire, la répartition des forces émanées de l'ai-

mant A et s'exerçant dans le champ créé par lui. Pour être complète, cette représentation devra indiquer en chaque point la direction, le sens et l'intensité de ces forces.

Traçons d'abord les différents chemins suivis par le pôle n quand on l'a fait partir de points de départ différents. Ces chemins indiquent, comme on vient de le dire, la direction des forces auxquelles a été soumis le pôle, à chaque instant de son déplacement. On désigne par suite les lignes qui les représentent sous le nom de *lignes de force* (fig. 45).

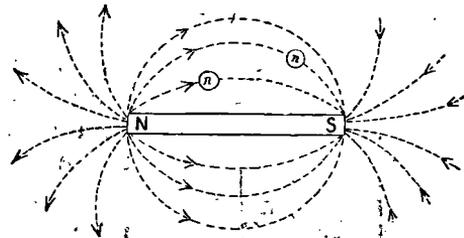


Fig. 45.

Puisque le pôle allait chaque fois du pôle nord au pôle sud de A, nous conviendrons de donner à ces lignes le même sens qu'aux forces agissant sur n , et

l'on dira qu'elles vont du pôle nord au pôle sud de l'aimant A, en passant par l'extérieur de celui-ci.

Enfin, il existe théoriquement un nombre illimité de lignes de force correspondant au nombre illimité des points de départ du pôle n . On ne peut toutefois qu'en tracer quelques-unes. On choisira leur nombre de telle sorte qu'il soit précisément proportionnel à la valeur en dynes des forces agissant en chaque point, à travers l'unité de surface comptée dans un plan perpendiculaire à leur direction. Le plus ou moins grand nombre des lignes tracées rendra compte, à première vue, de l'intensité des forces en chaque point du champ, de même que, dans le dessin d'une carte géographique, le plus ou moins grand nombre des hachures rend compte de la pente des terrains.

Grâce à ces conventions, il est facile désormais de se représenter la distribution des forces dans n'importe quel champ magnétique. Elle est définie en sens, direction et intensité, par le sens, la forme et le nombre des lignes de force représen-

tées. En particulier, un champ uniforme, c'est-à-dire dans lequel toutes les forces sont égales entre elles et parallèles, serait figuré par une série de lignes de force parallèles et également espacées.

Il importe maintenant de bien se pénétrer de l'idée que ces lignes de force correspondent à une réalité, mais seulement de la

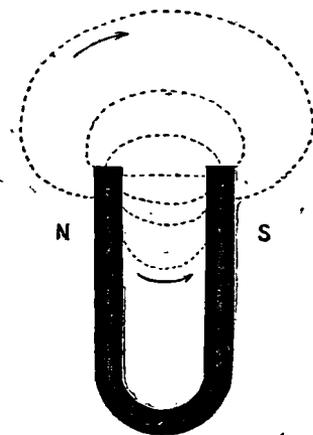


Fig. 46.

même façon que des lignes de niveau existent, par exemple, dans un milieu hydrostatique en équilibre. L'expérience bien connue du spectre magnétique permet de les rendre tangibles. Il suffit de secouer légèrement au-dessus d'un barreau aimanté une feuille de papier recouverte de limaille de fer. D'elle-même, cette limaille se répartit en chapelets affectant la forme des lignes de force : et la figure obtenue est en tous points analogue à la figure 45.

Le spectre magnétique, et par suite la répartition des lignes de force dans un champ, varie avec la forme de l'aimant qui le produit. Nous avons vu plus haut celle qui correspondait à un barreau droit. Un aimant courbé en fer à cheval donnerait la figure 46.

Résumons les résultats acquis :

Tout aimant, quel qu'il soit, crée autour de lui un champ magnétique caractérisé par le nombre et la forme des lignes de force qui le représentent. Ce champ embrasse tout l'espace environnant et peut être exploré, par exemple, avec un pôle d'aimant, comme nous l'avons fait plus haut.

Une seule partie de l'espace est restée inabordable à notre analyse : l'intérieur de l'aimant lui-même. Un procédé détourné va combler cette lacune.

50. — Champ magnétique créé autour d'un fil parcouru par un courant. — En 1820, OErstœdt constata qu'un fil parcouru par un courant crée autour de lui un champ magnétique. Tout pôle d'aimant placé dans le voisinage de ce fil est soumis à une action émanée de lui.

Comme dans le cas des aimants, la distribution des forces dans le champ créé par un fil dépend de la forme de celui-ci. Examinons deux de ces formes plus particulièrement intéressantes.

51. — Cas d'un fil rectiligne et long. — Des procédés analogues à ceux que nous avons déjà utilisés (exploration d'un

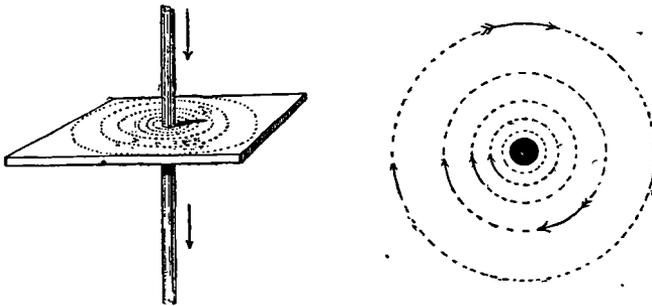


Fig. 47.

champ avec un pôle d'aimant, spectre magnétique) permettent de reconnaître la forme des lignes de force dans ce cas. Ces lignes présentent une particularité nouvelle : elles sont circulaires, et par suite *fermées* sur elles-mêmes (fig. 47). Leur sens dépend du sens de propagation du courant dans le fil. Une règle facile permet de le déterminer. Il suffit de considérer une vis couchée le long du fil. Le sens dans lequel on doit la faire tourner pour la faire aller dans le sens du courant est précisément celui des lignes de force cherché.

52. — Cas d'une boucle. — Comme précédemment, on

vérifie encore que les lignes de force du champ sont fermées sur elles-mêmes. De plus, leur *totalité* passe par l'intérieur de la boucle formée par le fil (fig. 48).

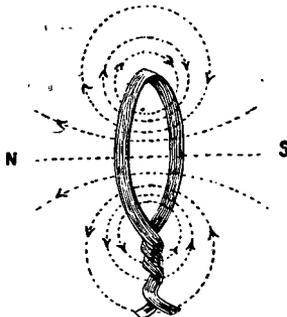


Fig. 48.

D'autre part, on constate expérimentalement qu'une telle boucle est entièrement assimilable à un aimant. Dans le cas de la figure 48, la face de gauche, par exemple, attire un pôle sud et repousse un pôle nord, c'est-à-dire constitue un véritable pôle nord ; de même, la face de droite de la boucle produit les mêmes effets qu'un pôle sud.

Il est aisé d'accentuer le phénomène en accolant ensemble un certain nombre de boucles semblables. L'appareil ainsi formé constitue un solénoïde (fig. 49).

Comme lorsqu'il s'agissait d'une boucle unique, toutes les lignes de force du champ produit par un solénoïde passent par l'intérieur de celui-ci, et sont encore fermées sur elles-mêmes. Leur sens dépend de celui du courant dans les boucles. La règle pratique suivante permet de le retrouver :

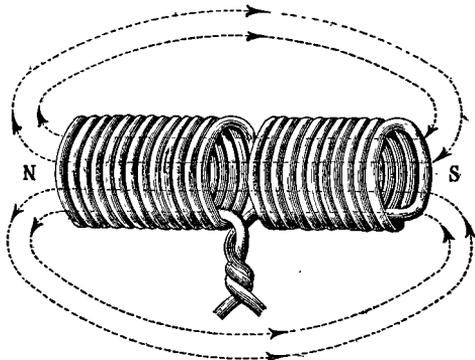


Fig. 49.

Le sens dans lequel se déplace une vis couchée suivant l'axe du solénoïde lorsqu'on la fait tourner dans le sens du courant est précisément le sens des lignes de force cherché.

Il est intéressant de remarquer que, si le solénoïde a une lon-

gueur suffisante, les lignes de force qui passent à son intérieur sont sensiblement parallèles et également réparties. Dans les parties qui n'avoisinent pas immédiatement les extrémités, le champ créé à l'intérieur d'un solénoïde est donc uniforme.

53. — Lignes d'induction. — Puisqu'un solénoïde est entièrement assimilable à un aimant, il est naturel d'admettre que la répartition des lignes de force dans le champ créé par un aimant est identique à celle qui existe dans le champ créé par un solénoïde de même forme. On en conclut que, dans le champ produit par un aimant, toutes les lignes de force se ferment sur elles-mêmes, en allant, par l'intérieur de l'aimant, du pôle sud au pôle nord.

On a donné le nom de *lignes d'induction* à la portion de ces lignes, intérieure à l'aimant. Leur ensemble constitue le *flux d'induction*. Le rapport du nombre des lignes d'induction à la section de l'aimant qu'elles traversent, ou, ce qui revient au même, le nombre de lignes d'induction passant à travers l'unité de section dans l'aimant, est désigné simplement sous le nom d'*induction magnétique*.

Il résulte de ces définitions que les lignes de force, telles qu'on les a définies, sont en réalité de véritables *lignes d'induction dans l'air*.

54. — Perméabilité. — Reprenons le solénoïde de tout à l'heure et cherchons à évaluer la relation numérique qui existe entre la valeur du champ uniforme créé à son intérieur et celle du courant qui parcourt le solénoïde.

Soit I la valeur exprimée en ampères de ce courant, l la longueur du solénoïde, et supposons que ce dernier soit composé de N boucles juxtaposées. Le nombre des boucles du solénoïde par unité de longueur est par suite $\frac{N}{l}$.

On constate expérimentalement que la valeur cherchée H du

champ, ou mieux, la valeur de l'induction magnétique à l'intérieur du solénoïde, est proportionnelle au produit $\frac{NI}{l}$:

$$H = k \frac{NI}{l}.$$

La valeur du coefficient k dépend du système d'unités choisies. Elle est égale, dans le système C. G. S. à 1,256. Cela veut dire que le nombre de lignes de force passant à travers un centimètre carré de section dans l'intérieur du solénoïde examiné est :

$$H = 1,256 \frac{NI}{l},$$

l et l étant exprimés en unités pratiques C. G. S. (ampères et centimètres).

Le flux total d'induction traversant le solénoïde est par suite S fois plus grand (S étant la section du solénoïde exprimée en centimètres carrés) :

$$[1] \quad \Phi = 1,256 \frac{NI}{l} S.$$

On a l'habitude de donner au produit NI du nombre de boucles du solénoïde, par l'intensité en ampères du courant qui les parcourt, le nom d'*ampères-tours*.

Introduisons maintenant dans l'intérieur du solénoïde un barreau de fer doux et cherchons de nouveau la valeur de l'induction. On s'aperçoit aussitôt que celle-ci s'est accrue notablement et est devenue μ fois plus grande, de telle sorte que si B représente cette nouvelle valeur, on a :

$$[2] \quad B = \mu H.$$

Le flux total d'induction est dans ce cas :

$$[3] \quad \mathcal{N} = \mu HS.$$

La valeur du coefficient μ dépend de la nature du fer introduit : elle est généralement très élevée et peut atteindre 2,500. La

présence du noyau de fer à l'intérieur du solénoïde a donc eu pour résultat d'accroître, dans une proportion énorme, le nombre des lignes d'induction qui le traversent. On peut par suite considérer le fer comme une substance particulièrement perméable aux lignes de force qui emplissent le champ, et c'est pourquoi le coefficient μ a été désigné sous le nom de *perméabilité*, mot de signification figurée et qui a le tort de ne pas correspondre à l'exacte réalité des faits. C'est le rapport entre les valeurs successives de l'induction après et avant l'introduction du noyau de fer.

Si dans l'équation [2] on fait $\mu = 1$, on trouve $B = H$.

La perméabilité de l'air est par suite l'unité.

55. — **Circuit magnétique.** — Remplaçons H dans l'expression [3] par sa valeur $1,256 \frac{NI}{l}$ Il vient :

$$\mathcal{N} = \mu \times 1,256 \frac{NI}{l},$$

expression qui peut encore s'écrire :

$$[4] \quad \mathcal{N} = \frac{1,256 NI}{\frac{1}{\mu} \bar{S}}$$

On ne peut s'empêcher de rapprocher cette relation de celle qui exprime la valeur du courant électrique en fonction de la force électromotrice e et de la résistance du conducteur (§ 9) :

$$i = \frac{e}{r_1 \bar{S}}$$

Toutes deux sont en effet de même forme, le produit $1,256 NI$ jouant le rôle de la force électromotrice e , et l'inverse de la perméabilité $\frac{1}{\mu}$, celui de la résistance spécifique r_1 .

D'autre part, en nous reportant à la figure 48, nous voyons que les lignes d'induction suivent, comme le courant, une courbe

fermée et sont dues à une force spéciale dont le siège est dans le solénoïde, de même que le courant est toujours dû à une force électromotrice intercalée dans le circuit.

Une analogie complète surgit donc entre les deux séries de phénomènes.

A la notion du circuit électrique correspondra celle du circuit magnétique.

Nous appellerons *force magnétomotrice* le produit $1,256 NI$, *reluctance* ou *résistance magnétique* le produit $\frac{l}{\mu S}$; et de même que la loi de Ohm s'énonce :

L'intensité d'un courant est égale au quotient de la force électromotrice par la résistance électrique,

la relation [4] se traduira de la façon suivante :

Le flux d'induction qui traverse un circuit magnétique donné est égal au quotient de la force magnétomotrice par la résistance magnétique.

Il demeure bien entendu que cette analogie, pas plus que celles qui nous ont servi jusqu'ici, n'implique nécessairement une identité entre les faits auxquels elle s'applique. On en retire toutefois une utilité considérable dans les calculs. On traite en effet les circuits magnétiques comme on traiterait les circuits électriques, à condition seulement de remplacer l'intensité par le flux d'induction, la force électromotrice par la force magnétomotrice, la conductibilité par la perméabilité, la résistance électrique par la résistance magnétique, dans les énoncés des théorèmes utilisés. Les substances magnétiques sont l'analogie des corps très bons conducteurs. L'air ne doit pas être considéré comme un corps isolant au point de vue magnétique, mais sa perméabilité étant faible, il joue le rôle d'un conducteur de résistance considérable.

Deux réserves sont, en outre, nécessaires pour pouvoir appliquer en toute rigueur ces extensions.

La résistance électrique d'un corps ne varie pas sensiblement avec l'intensité du courant qui le traverse. La perméabilité magnétique, et par suite la résistance magnétique, varient au contraire pour un même corps avec la valeur du flux d'induction traversant ce corps. Des tables dressées expérimentalement fournissent ces valeurs diverses ¹. Elles montrent que la perméabilité diminue à mesure que le flux d'induction augmente. Pour des valeurs de ce flux très élevées, le fer est à peine plus perméable que l'air.

En second lieu, de même qu'un courant cesse lorsqu'on supprime la force électromotrice qui le produit, les lignes d'induction disparaissent quand on supprime la force magnétomotrice. Mais cette disparition s'opère d'une façon toute spéciale. L'espace enveloppé par le flux va en diminuant pour se réduire à un point. Il semble en quelque sorte que chacune des lignes élémentaires qui composent le flux soit une bague élastique, plus ou moins tendue sous l'action de la force magnétomotrice, et se resserrant à mesure que cette force magnétomotrice diminue. Cette seconde particularité nous donnera tout à l'heure la clef d'une série de phénomènes nouveaux.

56. — **Saturation magnétique.** — En résumé, chaque fois qu'un courant parcourt un solénoïde, ce solénoïde produit un flux d'induction dont la valeur est proportionnelle à l'intensité du courant qui traverse le solénoïde.

Si l'on introduit, en outre, un noyau de fer dans l'intérieur du solénoïde, la simple présence de ce fer ajoute en quelque sorte au flux d'induction précédent un nouveau flux se superposant au premier et dont la valeur est en raison directe du coefficient de perméabilité du noyau.

Lorsque l'on fait croître l'intensité du courant dans le solénoïde, le premier de ces flux croît aussi proportionnellement à cette

1. Nous renvoyons pour ces tables aux ouvrages spéciaux (Eric Gérard, t. I^{er}, p. 517) et aux intéressants travaux de MM. Rössler et Culman.

intensité; le second, au contraire, cesse rapidement d'augmenter, puisque le coefficient de perméabilité diminue très vite à mesure que l'induction à laquelle est soumis le fer s'accroît. On dit alors que le fer *se sature*.

La valeur du flux dû à la présence du fer étant beaucoup plus considérable que celle du flux dû au solénoïde seul, il n'y a pas intérêt à accroître l'intensité du courant, lorsque le fer a atteint sa limite de saturation.

57. — **Hystérésis.** — On a vu que lorsqu'un courant constant passe dans un solénoïde à noyau de fer, ce dernier est soumis à une induction fixe.

Imaginons qu'on fasse varier d'une manière continue l'intensité du courant, de telle façon que l'induction, après avoir passé par une série de valeurs correspondantes à celles de l'intensité, reprenne précisément sa valeur initiale : on dit alors que le noyau de fer a parcouru un cycle magnétique fermé.

On constate qu'à la suite de ces opérations, le noyau s'est échauffé, et que son échauffement est proportionnel à son volume.

Une partie de l'énergie s'est donc dissipée, employée à vaincre, en quelque sorte, des frottements magnétiques à l'intérieur du fer. Cette perte d'énergie est connue sous le nom de perte d'énergie dans l'*hystérésis*.

La loi suivante, due à Steinmetz, permet de l'évaluer assez exactement :

Si l'on appelle B l'induction maxima à laquelle le métal est soumis, η un coefficient qui varie de 0,002 (fer doux) à 0,009 (acier), la perte d'énergie, par centimètre cube et par cycle, exprimée en joules, est égale à $\frac{\eta B^{1,6}}{10^7}$.

58. — **Lois de l'induction.** — Étant donnés un conducteur et un champ magnétique, toutes les fois qu'il existe un mouvement relatif de l'un par rapport à l'autre, tel que le conducteur ren-

contre des lignes de force, et pendant toute la durée de ce mouvement, le conducteur est le siège d'une force électromotrice.

Cette force électromotrice est la même, quelle que soit la nature du conducteur ; elle se produit aussi bien quand on déplace le conducteur dans le champ, que lorsqu'on fait varier, par un moyen quelconque, le champ dans lequel est placé le conducteur, en laissant ce dernier immobile.

Pour achever de la définir, il est nécessaire de déterminer sa valeur et son sens.

1° *Valeur de la force électromotrice induite.* — La valeur moyenne de la force électromotrice induite pendant un temps donné t , dans le conducteur, est proportionnelle au nombre n des lignes de force rencontrées par le conducteur dans ce temps :

$$e = k \frac{n}{t},$$

k étant égal à 10^{-8} dans le système d'unités pratiques (e étant par suite exprimé en volts). Il en résulte que plus le nombre de lignes de force rencontrées à temps égal est considérable, ou bien encore, plus le temps nécessaire pour faire rencontrer par le conducteur un nombre de lignes de force donné est bref, et plus la force électromotrice induite est élevée.

2° *Sens de la force électromotrice induite.* — La force électromotrice induite dans le conducteur a pour résultat de créer une différence de potentiel entre les deux extrémités de ce conducteur. En réunissant celles-ci par un autre fil conducteur, un courant passerait dans un certain sens à travers la boucle ainsi formée. On constate que ce sens est tel que le champ produit par le courant induit tende à affaiblir le champ initial.

C'est là un exemple remarquable d'une des lois les plus générales de la matière. Celle-ci s'efforce toujours, en effet, de résister aux déformations qu'on veut lui faire subir.

Des règles pratiques simples permettent de retrouver ce sens du courant induit et, par suite, celui de la force électromotrice induite.

L'une des plus en usage est due à Fleming. C'est la suivante :

On place le pouce, l'index et le médium de la main droite, autant que possible, à angles droits les uns par rapport aux

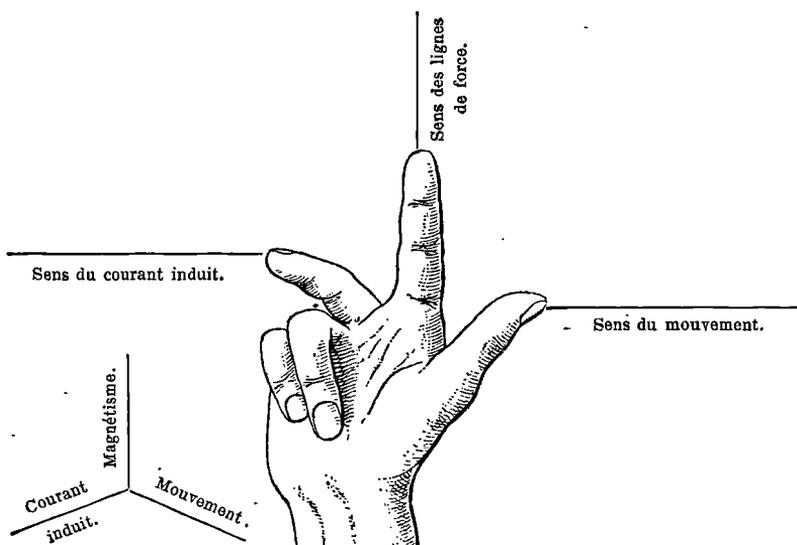


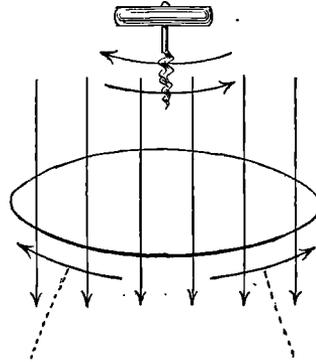
Fig. 50.

autres, comme l'indique la figure 50, de manière à représenter trois axes rectangulaires dans l'espace ; le pouce étant dirigé dans le sens du mouvement, et l'index suivant le sens des lignes de force, le médium se trouvera dirigé dans le sens de la force électromotrice induite.

On peut aussi se servir de la règle de Maxwell : celle-ci suppose toutefois que l'on sait si le nombre des lignes de force rencontrées par le conducteur va en croissant ou en décroissant. Elle

est particulièrement commode, lorsqu'il s'agit de boucles fermées. Elle s'énonce ainsi :

Si l'on imagine un tire-bouchon s'avancant parallèlement aux lignes de force et dans le même sens qu'elles (fig. 51), la force électromotrice induite dans le conducteur est orientée dans le sens de la rotation de ce tire-bouchon, lorsque le nombre de lignes de force rencontré par le conducteur va en décroissant; elle l'est en sens inverse quand il croît.



Sens du courant induit, lorsque le flux diminue.

Sens du courant induit, lorsque le flux augmente.

Fig. 51.

59. — Application des lois de l'induction à divers cas particuliers. — 1° Supposons d'abord un cadre *abcd*

rectangulaire, se déplaçant (fig. 52) dans le sens indiqué par la flèche *o*, dans un plan perpendiculaire à la direction d'un champ uniforme. Les intersections des lignes de force figuratives du champ avec ce plan (qui coïncide avec celui de la figure)

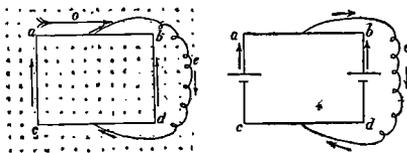


Fig. 52.

sont représentées par une série de points équidistants.

Les portions *ab* et *cd* du conducteur, ne rencontrant dans leur déplacement aucune

ligne de force, ne sont le siège d'aucune force électromotrice. Les portions *ac* et *bd* coupant, au contraire, constamment un nombre égal de lignes, il s'y produit deux forces électromotrices orientées de la même façon et d'égale valeur.

Le résultat dans le cadre est le même que si l'on y avait inséré deux piles identiques en opposition. Aucun courant ne passe.

Il est facile toutefois d'utiliser les forces électromotrices induites en ac et bd . Si l'on réunit, en effet, les portions ab et cd du cadre par un conducteur e , un courant circulera dans ce conducteur; les côtés ac et bd jouent, en effet, par rapport à lui, le rôle de deux piles associées en quantité. Le résultat est le même que si un seul de ces côtés avait été déplacé dans le champ, mais le débit d'électricité est double.

2° Supposons que le champ dans lequel se meut le cadre $abcd$ ne soit plus uniforme, mais variable (fig. 53).

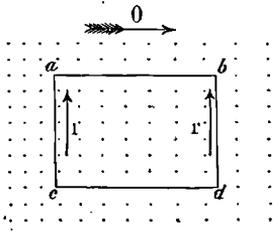


Fig. 53.

Comme précédemment, aucune force électromotrice n'est produite dans les portions ab et cd du cadre; les sections ac , bd sont également le siège de forces électromotrices orientées de même façon, mais celles-ci ne sont plus égales, puisque bd coupe, dans le même temps, un nombre de lignes de force moindre que ac . Un courant circule donc dans le cadre, et la force électromotrice qui le produit est égale à la différence des deux forces électromotrices induites dans ac et bd .

3° Supposons, enfin, qu'une portion de conducteur rectiligne projetée en a (fig. 54) se déplace dans un champ uniforme, en tournant autour d'un axe o parallèle à ce conducteur et perpendiculaire à la direction du champ.

Soit a le point de départ du conducteur.

Au début du mouvement, ce conducteur glissant le long des lignes de force n'en coupe aucune. La force électromotrice induite est donc nulle. Celle-ci augmente ensuite graduellement, et atteint

en *b* son maximum. Le déplacement du conducteur est en effet, en ce point, exactement perpendiculaire à la direction des lignes de force, et le nombre des lignes coupées dans l'unité de temps est lui-même maximum.

Le mouvement continuant, la force électromotrice induite commence à décroître, et redevient nulle en *c*. On verrait de même qu'elle passe par un nouveau maximum (en valeur absolue) en *d* pour redevenir nulle en *a*.

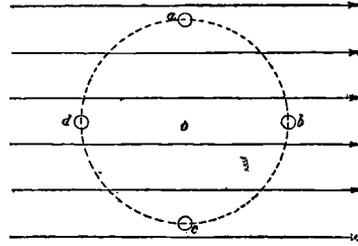


Fig. 54.

Si l'on construit une courbe ayant pour abscisses la longueur des chemins parcourus par un point du conducteur et pour ordonnées la valeur des forces électromotrices induites correspondant aux diverses positions du conducteur, on constate que cette courbe affecte la forme périodique d'une sinusoïde (fig. 55).

On voit, à l'inspection de cette courbe, que la force électromotrice induite est constamment dirigée dans le même sens pendant la première partie de la rotation (de 0° à 180°), et dans un sens contraire dans la seconde partie (de 180° à 360°). Si l'on avait réuni

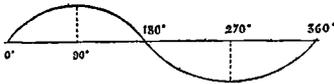


Fig. 55.

les extrémités du conducteur déplacé par un fil, on aurait donc constaté dans ce fil la production de deux courants successifs de sens contraire, correspondant chacun à l'une

des deux demi-révolutions composant la révolution complète. La règle de Fleming permet de vérifier sans peine ces résultats.

60. — Réactions mécaniques. — Nous avons dit que tout conducteur ouvert déplacé dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice induite. Si, pendant ce déplacement, on réunit par un fil les deux extrémités du conducteur, cette force

électromotrice induite provoque le passage d'un courant dans le circuit ainsi constitué. Aussitôt apparaît un nouveau phénomène.

On constate que le conducteur subit alors l'action d'une force mécanique agissant dans une direction normale aux lignes de force et au conducteur lui-même, et tendant à entraîner ce dernier en dehors du champ.

La règle de Fleming permet encore de retrouver aisément en pratique la direction de cette force, à condition d'employer cette fois la *main gauche* : le médium et le pouce représentant toujours le sens du courant et la direction des lignes de force du champ, l'index indique alors le sens de la force mécanique agissant sur le conducteur.

L'existence de cette force est des plus importantes en électricité. C'est elle, en effet, qui permet de se rendre compte du fonctionnement des moteurs électriques; elle nécessite également l'application de forces mécaniques extérieures considérables pour faire tourner les machines dynamo-électriques.

On démontre expérimentalement que l'intensité de la force agissant sur un conducteur de longueur L se déplaçant dans un sens perpendiculaire à sa direction est proportionnelle à l'intensité du courant qui parcourt le conducteur, à l'induction B et à la longueur L du conducteur.

$$[1] \quad f = kiLB^2,$$

k est égal à 1 dans le système C. G. S. Si l'on exprime f , L et B en unités C. G. S. et i en ampères, ce qui est le cas de la pratique, k est égal à 10^{-4} .

L'action mutuelle du champ initial et du champ créé par le courant est l'origine de cette réaction mécanique. On a vu (§ 51) qu'un conducteur parcouru par un courant crée autour de lui un

1. Lorsque le conducteur se déplace obliquement par rapport à sa direction, il est nécessaire de remplacer dans l'expression [1] la longueur L du conducteur par la longueur de sa projection sur une droite perpendiculaire à la direction du déplacement.

champ caractérisé par une série de lignes de force circulaires, concentriques au conducteur et d'autant plus serrées qu'elles sont plus voisines de ce fil.

Imaginons que ce conducteur et son champ soient transportés par exemple dans un champ uniforme. Le champ résultant est dû à la combinaison des lignes de force produites par le conducteur et de celles du champ uniforme. On sait, d'autre part, que ces lignes de force peuvent être assimilées à de véritables cordes élastiques tendant naturellement à se raccourcir.

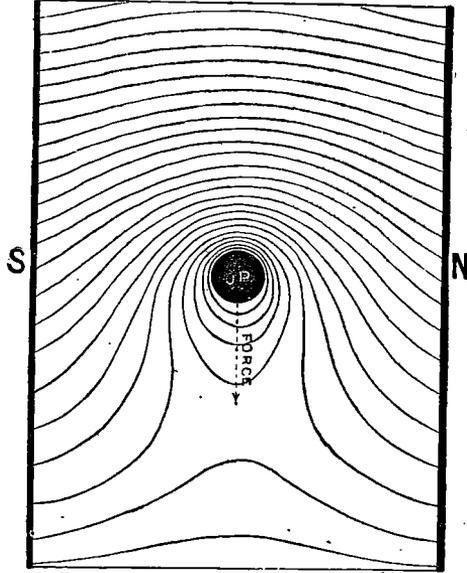


Fig. 56.

Un effort s'exercera sur le conducteur dans le sens marqué par la flèche. Ce sens coïncide parfaitement avec celui qu'indique la règle de Fleming.

61. — **Self-induction.** — Il n'existe pas dans la nature d'actions rigoureusement instantanées. En particulier, lorsqu'un courant s'établit, son intensité croît progressivement de zéro à la valeur finale qu'il doit atteindre. Inversement, lorsqu'on supprime un courant, son intensité décroît par une série graduée de la valeur initiale à zéro.

Considérons, en particulier, le cas de l'établissement d'un courant dans un conducteur rectiligne.

A mesure que l'intensité croît, on constate, si l'on examine le

champ magnétique produit, qu'un plus grand nombre de lignes de force paraissent sortir du conducteur et s'épanouir circulairement autour de lui. Il semble que de véritables anneaux élastiques, initialement à l'intérieur du conducteur, soient tendus progressivement sous l'action d'une pression interne s'exerçant sur tout leur contour et croissant avec la force électromotrice elle-même.

Lorsque l'intensité du courant a atteint sa valeur définitive, l'apparente émission des lignes de force s'arrête. Le champ ne varie plus.

Si l'on supprime ensuite le courant, les phénomènes inverses se passent. La force qui maintenait ces sortes d'anneaux tendus ayant disparu, ceux-ci se contractent, coupent de nouveau la surface du conducteur et disparaissent à l'intérieur de celui-ci pour s'y réduire à un point.

Dans un cas comme dans l'autre, ces changements exigent, pour s'opérer, une certaine durée, fort courte à la vérité, mais encore parfaitement définie.

On voit donc que chaque fois qu'un courant varie d'intensité, le conducteur dans lequel il passe coupe un certain nombre des lignes de force du champ produit par le courant. Conformément aux lois générales de l'induction, une force électromotrice doit être induite dans ce conducteur, d'autant plus élevée que la variation d'intensité du courant dans un temps donné (et par suite le nombre de lignes coupées par le conducteur) est plus considérable.

La règle de Fleming montre que cette force électromotrice est dirigée suivant l'axe même du conducteur, et est orientée de telle sorte qu'elle s'oppose à la variation de courant dont le conducteur est le siège. Elle tend à affaiblir un courant qui s'établit et croît, et à prolonger un courant que l'on supprime ou qui décroît. Des expériences nombreuses, notamment l'étincelle qui se produit au moment où l'on ouvre un circuit parcouru par un courant, montrent son existence.

La force électromotrice ainsi induite est dite force électromotrice de *self-induction*, parce qu'elle est produite par une induc-

tion du circuit sur lui-même. On désigne aussi fréquemment sous le nom d'*extra-courant* le courant qui lui est dû.

La self-induction est une véritable inertie électrique. De même que, par suite de l'inertie, il n'est pas possible de communiquer instantanément une vitesse donnée à un volant, ou d'arrêter sa marche, on ne peut produire, modifier ou supprimer instantanément un champ magnétique déterminé autour d'un conducteur.

L'intensité d'un courant variable qui circule dans un conducteur n'est donc plus déterminée seulement par la force électromotrice qui produit le courant et par la résistance électrique de ce conducteur, mais encore par une propriété définie, dépendant du mode de variation du courant, de la nature du champ dans lequel est plongé le conducteur, et de la forme de celui-ci. On a donné à cette qualité spéciale le nom d'*inductance*.

Pour la définir avec précision, nous dirons que l'inductance est une quantité L telle que, si l'on exprime par le symbole $\frac{di}{dt}$ la variation d'intensité du courant dans un temps très faible dt , la force électromotrice e de self-induction soit représentée par :

$$e = - L \frac{di}{dt},$$

le signe — signifiant d'ailleurs que lorsque l'intensité du courant va en croissant, la direction de la force électromotrice de self-induction est négative et s'oppose à cet accroissement, et inversement.

L'unité pratique d'inductance (correspondant à une valeur de e exprimée en volts et de i exprimée en ampères) est l'*henry* ; elle vaut 10^9 unités absolues d'inductance.

62. — Principe des machines dynamo-électriques. — Une machine dynamo-électrique se compose toujours d'un circuit mobile par rapport à un champ magnétique ou inversement. On sait que, d'après la loi fondamentale de l'induction (§ 58), la production dans le circuit d'une force électromotrice de sens et de

valeur déterminés résulte nécessairement d'un déplacement de cette nature.

Des organes particuliers permettent de réunir d'une manière continue le circuit mobile à un circuit fixe extérieur à la machine, et d'utiliser par suite dans ce dernier le courant produit.

Toute machine dynamo-électrique comporte donc trois éléments essentiels :

1° Un *induit* ou circuit en déplacement relatif par rapport à un champ magnétique ;

2° Un *inducteur* ou producteur de champ magnétique ;

3° Un *collecteur* ou organe de liaison entre l'induit et le circuit extérieur dans lequel doit se faire l'utilisation du courant fourni par la machine.

On peut distinguer les machines dynamo-électriques en deux catégories bien distinctes.

Les unes fournissent un courant toujours de même sens et d'intensité relativement constante, analogue à celui que fournirait une pile ou un accumulateur : ce sont les machines dites à *courant continu*.

Les autres fournissent un courant d'intensité variable et changeant périodiquement de sens à des intervalles très rapprochés (une centaine de fois à la seconde) : ce sont les machines à *courants alternatifs* ou *alternateurs*.

Nous étudierons successivement ces deux catégories.

II. — MACHINES A COURANT CONTINU

63. — On ne peut pas réaliser dans la pratique des champs d'étendue indéfinie ; ceux qui sont utilisés dans les machines sont toujours obtenus à l'aide de pôles d'aimants placés en regard les uns des autres et alternés d'une façon convenable.

Supposons donc que l'on dispose d'un de ces champs, de dimensions limitées, et réduisons pour un instant l'induit à un simple

conducteur rectiligne tournant autour d'un axe et relié d'une manière quelconque au circuit extérieur de la machine.

Il existe un grand nombre de manières de déplacer cet induit dans le champ. Elles dépendent évidemment de la situation qu'occupe l'axe de rotation. On peut toutefois les classer en deux

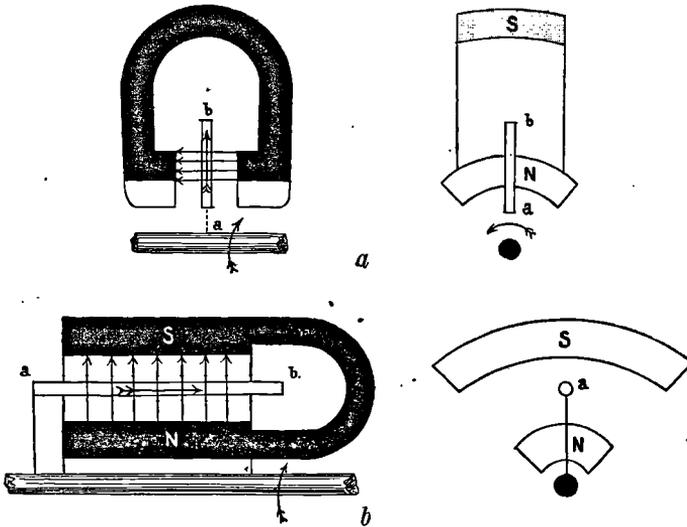


Fig. 57.

groupes, suivant que, dans une révolution de l'induit, le conducteur rencontre une ou deux fois la même ligne de force.

La figure 57 montre les dispositions permettant de réaliser le premier de ces cas. On voit, en appliquant la règle de Fleming, que la force électromotrice induite a constamment la même direction dans le conducteur mobile. Les machines présentant ces dispositions respectives de l'inducteur et de l'induit sont donc, au sens strict du terme, des génératrices de courant de même sens. On leur a donné le nom fort impropre de machines *unipolaires*.

Les dispositions relatives au second cas sont représentées

figure 58. Le conducteur coupant deux fois de suite par révolution la même ligne de force, son mouvement par rapport à elle est différent à chacune de ces rencontres : la force électromotrice dont il est le siège change donc de sens à chaque demi-révolution.

En réunissant les extrémités du conducteur à un circuit extérieur, un courant alternatif passerait dans ce dernier. On oblige

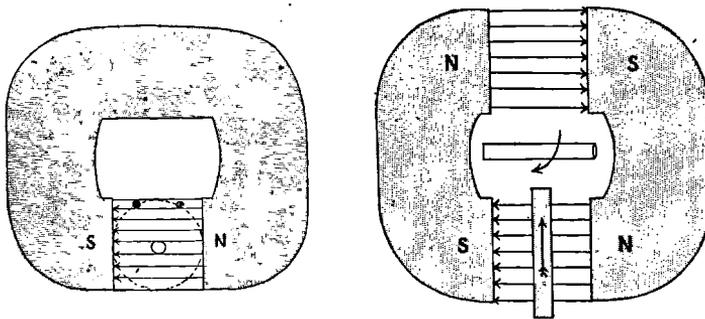


Fig. 58.

le courant à y conserver le même sens en intervertissant les attaches du circuit à l'induit, au moment même de l'inversion de la force électromotrice. Les machines de ce genre sont, par suite, en réalité des machines à *courants redressés*, et leur collecteur doit jouer en même temps le rôle de commutateur.

La presque totalité des dynamos à courant continu rentre dans cette catégorie. On les désigne sous le nom de machines *bipolaires* ou *multipolaires*, suivant que leurs inducteurs comportent deux ou un plus grand nombre de pôles d'aimant. Comme l'indique la figure 58, on peut en outre les grouper en deux classes, suivant que dans ces machines l'induit est parallèle à l'axe de rotation autour duquel on le déplace ou perpendiculaire à celui-ci. Dans la première de ces classes rentrent toutes les machines dites à *anneau* et à *tambour*. Dans la seconde, les machines dites à *disque*.

III. — MACHINES UNIPOLAIRES

64. — Les machines unipolaires ne sont entrées que rarement dans la pratique usuelle.

La première en date et la plus rudimentaire est connue sous le nom de disque de Faraday. Elle se compose d'un disque de cuivre monté sur un axe (fig. 59) et dont un segment est engagé entre les deux pôles d'un aimant. Deux lames en contact, l'une avec le champ du disque, l'autre avec l'axe, recueillent le courant.

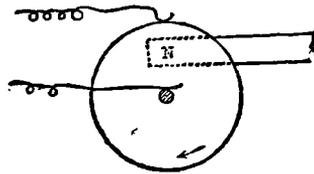


Fig. 59.

Un grand nombre de modèles de machines unipolaires dus à

Ferraris, Hummel, Thomson, etc., ont été imaginés depuis lors. L'un des plus connus a été réalisé par Siemens.

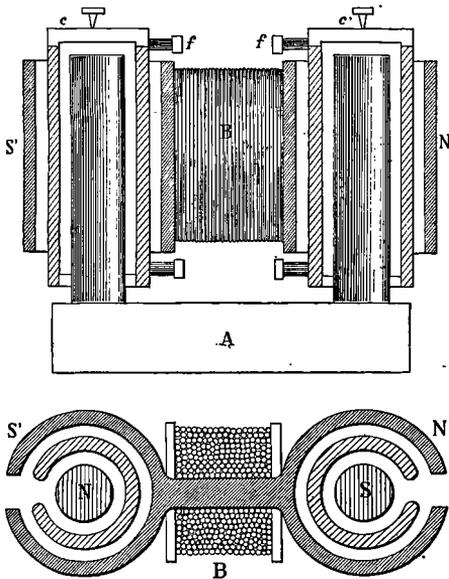


Fig. 60.

La machine Siemens se rapporte au type général (a) de la figure 56. Elle est constituée essentiellement par deux cylindres de cuivre *c* et *c'* fendus longitudinalement pour éviter la production des courants parasites (fig. 60). Chacun de ces cylindres peut tourner autour d'un des pôles N ou S, également cylindriques, d'un électro-aimant A. Un

deuxième électro-aimant B possède deux épanouissements polaires N' et S' en forme d'arc qui embrassent c et c' . Ces cylindres tournent donc entre deux pôles de polarités contraires, l'un interne, l'autre externe. Chacune de leurs génératrices coupe successivement les lignes de force joignant ces pôles. Il en résulte une différence de potentiel entre les extrémités de ces génératrices.

Les courants sont recueillis par des balais frotteurs $f f'$.

La force électromotrice obtenue avec la machine Siemens est très faible, mais les courants développés ont une grande intensité, et c'est ce qui a conduit autrefois à essayer l'emploi de cet appareil pour effectuer des dépôts électrolytiques.

La faiblesse du voltage réalisé est un défaut commun à toutes les machines unipolaires. Elle est la raison de la défaveur qui les entoure. Nous n'insisterons pas sur leur description.

IV. — MACHINES A COURANTS REDRESSÉS

65. — Nous examinerons tout d'abord les types généraux d'induits et d'inducteurs. Après avoir indiqué rapidement leurs propriétés et les conditions de leur construction, nous passerons ensuite à la description d'un certain nombre des machines usuelles.

Induits.

66. — Cas de l'induit élémentaire parallèle à son axe de rotation. — L'induit de ce type, le plus simple qui se puisse imaginer, se compose d'une boucle rectangulaire $abcd$. (fig. 61) tournant autour d'un axe oo' dans un champ magnétique sensiblement uniforme, produit par deux pôles d'aimant en regard l'un de l'autre.

Chacune des extrémités de cette boucle aboutit à une coquille placée sur l'axe. Des balais frotteurs, reliés au circuit extérieur,

appuient sur ces coquilles et recueillent le courant. L'ensemble des balais et des coquilles constitue le collecteur.

Des quatre côtés du cadre formant l'induit, ab est le seul qui coupe des lignes de force pendant la rotation et qui soit, par suite, le siège d'une force électromotrice induite.

Supposons que la boucle parte de la position marquée en plein et tourne dans le sens de la flèche. On a vu (§ 58) que la force électromotrice induite en ab part d'une valeur nulle, croît jusqu'à

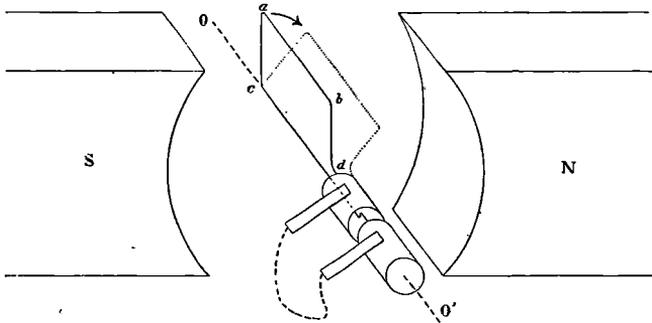


Fig. 61.

une valeur maximum atteinte pour une rotation de 90° , diminue ensuite et se réduit à zéro au bout d'une demi-révolution, puis croît de nouveau en valeur absolue, pour passer par un second maximum au bout des trois quarts de la révolution, décroît enfin et redevient nulle au moment où la boucle revient à sa position initiale. L'ensemble de ces variations est représenté graphiquement (fig. 55) par une courbe sinusoïdale.

En examinant, d'autre part, à l'aide de la règle de Fleming, le sens de ces diverses forces électromotrices induites successivement, on constate que, pendant toute la première demi-révolution, elles ont été dirigées d'avant en arrière, et pendant la seconde demi-révolution, d'arrière en avant. Deux courants de sens contraire ont donc passé dans le circuit extérieur. La résistance de

celui-ci étant supposée constante et sa self induction négligeable, l'intensité de ces courants a varié comme la force électromotrice elle-même (loi d'Ohm); elle peut donc être également représentée à l'aide d'une courbe sinusoïdale.

On remarquera que chaque fois que le cadre a passé dans le plan perpendiculaire à la direction des lignes de force, la force électromotrice et, par suite, le courant induit ont été nuls. On désigne ce plan, contenant les positions correspondant à des valeurs nulles de la force électromotrice induite, sous le nom de *zone neutre*.

Pour obtenir que le courant ait toujours le même sens dans le circuit extérieur, il est nécessaire, comme on l'a dit déjà, de transformer le collecteur en un véritable commutateur. Cela se fait très simplement dans le cas de la machine élémentaire qui est étudiée ici. Il suffit de remplacer les deux coquilles du collecteur (fig. 61) par un tube métallique fendu longitudinalement en deux parties montées sur un cylindre isolant concentrique à l'axe (fig. 62). Ces parties sont respectivement reliées

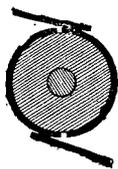


Fig. 62.

aux extrémités de la boucle. Des balais ou ressorts métalliques frottent sur elles et sont placés de telle sorte qu'au moment où la boucle occupe la position correspondant au changement de sens de la force électromotrice induite, c'est-à-dire passe dans la zone neutre, chacune des moitiés de tube échappe au balai qui la touche et vient en contact avec l'autre. Les courants qui parcouraient primitivement le circuit extérieur sont dès lors redressés dans ce circuit, et le diagramme représentant les variations d'intensité dont il est le siège devient celui de la figure 63.

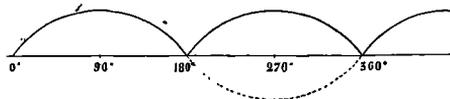


Fig. 63.

Réduite à des éléments aussi simples, une machine dynamo-

électrique serait inutilisable. Elle fournit en effet une force électromotrice extrêmement faible et un courant d'intensité trop variable pour pouvoir être pratiquement employé.

Deux procédés généraux ont permis d'accroître la force électromotrice de la machine et de régulariser le courant produit par elle dans le circuit extérieur.

Le premier consiste à concentrer le plus grand nombre possible de lignes de forces dans l'espace parcouru par la boucle et à accroître le flux d'induction, en diminuant la résistance du circuit magnétique.

On réduit dans ce but l'intervalle d'air compris entre les deux pôles de l'inducteur aux dimensions rigoureusement nécessaires au déplacement du conducteur induit, et on remplit le reste de l'espace à l'aide d'une masse de fer.

La figure 64 représente une disposition simple réalisant ce résultat. Les pièces polaires de l'inducteur affectent une forme circulaire embrasant d'aussi près que possible

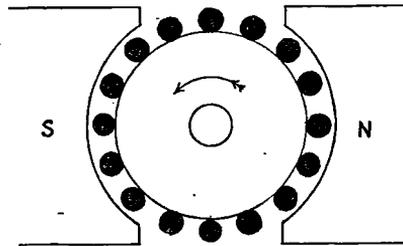


Fig. 64.

l'espace dans lequel se meut l'induit. Un cylindre de fer placé au centre de cet espace, et que nous appellerons le *noyau* de l'induit, ne laisse, entre ces pièces polaires et lui, que la place pour loger le conducteur mobile. Au point de vue de la résistance du circuit magnétique, il importe peu que ce cylindre soit en repos ou en mouvement. En pratique, on le rend donc solidaire de l'axe ; il tourne avec lui, et, outre son rôle magnétique, il a l'avantage d'être un support commode pour le conducteur induit fixé sur lui¹.

Le second procédé consiste à employer, au lieu d'une seule boucle d'induit, un grand nombre de celles-ci. On voit en effet sur

1. L'ensemble des conducteurs placés sur le noyau de l'induit est souvent désigné sous le nom d'armature de l'induit.

la figure 64 qu'il est possible de disposer un grand nombre de fils sur la périphérie du noyau. Chacun de ces conducteurs élémentaires obéit aux mêmes lois que celui de la machine simple qui a été étudiée tout d'abord, et peut être assimilé à une petite pile de force électromotrice variant sinusoïdalement.

Supposons en particulier qu'une série de conducteurs aient été répartis d'une manière uniforme autour du noyau, comme le représente la figure 64.

L'application de la règle de Fleming montre d'abord que tous les fils placés d'un même côté de la zone neutre sont le siège d'une force électromotrice induite de même sens.

En second lieu, deux conducteurs diamétralement opposés sont le siège des forces électromotrices induites orientées en sens inverse, mais de valeur absolue identique.

On peut donc se proposer d'additionner, soit les forces électromotrices de même sens induites dans les conducteurs placés d'un même côté du noyau, soit celles qui ont leur siège dans des conducteurs diamétralement opposés. La première méthode est appliquée dans les induits dits « à anneau » ; la seconde, dans les induits dits « à tambour ». Quel que soit le cas, on va voir que la combinaison de plusieurs conducteurs entre eux aura pour résultat non seulement d'accroître la force électromotrice totale de la machine, mais encore de régulariser le courant fourni par elle au circuit extérieur.

67. — Induit à anneau. — Le principe de l'induit à anneau a été indiqué en 1865 par Pacinotti et retrouvé directement par Gramme en 1870. On le désigne souvent depuis sous le nom d'*induit Gramme*.

Substituons au noyau cylindrique plein de l'induit un anneau de fer. La présence de cet anneau détermine la présence d'un fantôme magnétique représenté figure 65. Tout fil placé à l'intérieur de l'anneau ne rencontre aucune ligne de force dans sa rotation autour de l'axe et n'est, par suite, le siège d'aucune force électromo-

trice. Si l'on réunit donc l'extrémité antérieure de l'induit élémentaire A à l'extrémité postérieure de l'induit voisin B, les seules forces électromotrices induites dans A et B s'ajouteront dans la boucle ainsi formée, et le fil de jonction *c* n'interviendra théoriquement que par sa résistance propre.

En pratique, il n'en est pas tout à fait ainsi, quelques lignes de force s'échappant de l'anneau et traversant l'espace vide laissé au centre de celui-ci; mais la force électromotrice produite de ce fait en *c* et dirigée en sens inverse des deux autres est très faible et peut être considérée comme négligeable.

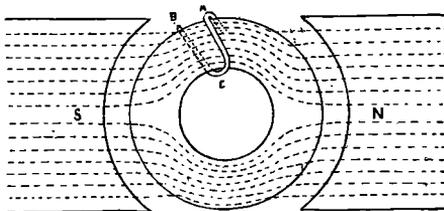


Fig. 65.

Rien n'empêche de superposer en un même point un certain nombre de boucles semblables, en enroulant plusieurs fois de suite un fil autour de l'anneau. On réalise ainsi une *section* d'induit, comprenant *n* conducteurs actifs élémentaires s'il y a *n* tours de fils. Pendant la rotation, cette section est encore le siège d'une force électromotrice variant suivant une loi sinusoïdale, mais la valeur absolue de cette force électromotrice est $\frac{n}{2}$ fois plus grande que dans le cas de la machine théorique étudiée tout d'abord (§ 58). Le champ rencontré par chaque boucle a bien, en effet, une intensité moitié moindre (le flux s'étant divisé en deux parties égales entre les deux moitiés de l'anneau), mais les forces électromotrices induites dans les *n* boucles s'additionnent à la façon de celles d'une pile de *n* éléments montés en tension.

68. — Régularisation du courant dans les induits à anneau. — On peut recouvrir la totalité de l'anneau d'un certain nombre de sections. Il reste à associer encore ces sections de manière à atténuer dans une large mesure les variations du cou-

rant fourni par la machine au circuit extérieur. Suivant le procédé choisi, on réalise un induit annulaire à circuit ouvert ou à circuit fermé.

1° *Induit annulaire à circuit ouvert.* — Soient deux sections A et A' (fig. 65) montées aux extrémités d'un même diamètre de l'anneau et réunies entre elles par un conducteur de façon que

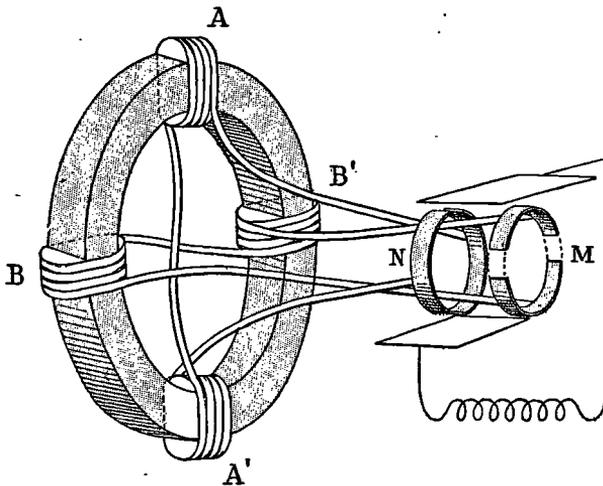


Fig. 66.

les forces électromotrices dont chacune est le siège s'ajoutent constamment. Faisons aboutir les extrémités de ce premier circuit à un commutateur redresseur N semblable à celui qui a déjà été décrit au paragraphe 66.

Les variations du courant fourni par ce circuit sont sensiblement sinusoïdales, l'intensité maximum correspondant à la position des deux sections la plus voisine des inducteurs, l'intensité minimum, au passage dans la zone neutre.

Plaçons une seconde paire de sections semblablement conjuguées, B et B', dans un plan perpendiculaire à celui des deux pre-

mières et relient-les à un second commutateur redresseur M; utilisons enfin, afin de recueillir le courant total, des balais assez larges pour frotter simultanément sur les coquilles des deux commutateurs voisins.

Il résulte d'une telle disposition que les ensembles de sections A et A', B et B', seront constamment associés à la façon de deux piles de forces électromotrices variables, montées en quantité. La résistance totale de l'induit est réduite de moitié. De plus, les maximum d'induction pour les sections A et A' coïncident précisément avec le passage des sections B et B' dans la zone neutre, et inversement. On conçoit donc que les ondulations du courant dans le circuit extérieur, qui est à chaque instant la somme des courants fournis par chacun des groupes AA', BB', soient beaucoup moins marquées.

Ce dispositif a été appliqué par Brush.

2° *Induit annulaire fermé, ou induit Gramme.* — Imaginons encore un induit annulaire sur lequel on a disposé quatre sections

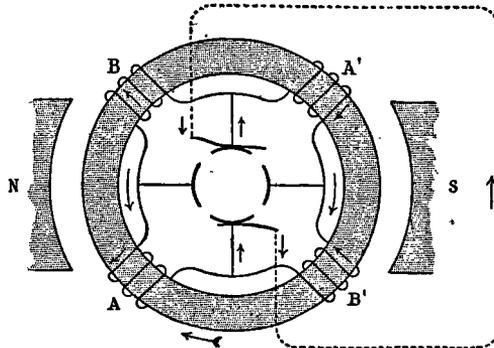


Fig. 67.

diamétralement opposées A et A', B et B', et réunissons entre elles leurs extrémités de manière que l'ensemble forme un circuit fermé (fig. 67).

On sait que les sections A et A' sont le siège de forces électromotrices égales en valeur absolue et de directions contraires. Il en est de même pour les sections B et B'. A tout instant, par suite, la somme des forces électromotrices induites dans une moitié de l'anneau située d'un même côté de la zone neutre est égale à celle des forces électromotrices induites dans l'autre moitié. L'anneau peut être assimilé à l'ensemble de deux piles égales et opposées par leurs pôles. Aucun courant n'y passe. Mais si l'on imagine deux balais reliés avec les extrémités du circuit extérieur et prenant à tout instant contact avec la portion de l'induit qui passe dans la zone neutre, les courants engendrés dans chacune des moitiés de l'anneau s'additionneront dans le circuit extérieur (§ 59).

Il est aisé de montrer que l'intensité du courant total parcourant le circuit extérieur subira des variations beaucoup moins accentuées que dans le cas d'une machine munie de deux sections seulement.

La force électromotrice, qui a pour siège la moitié d'anneau située à droite par exemple de la zone neutre, est constamment la

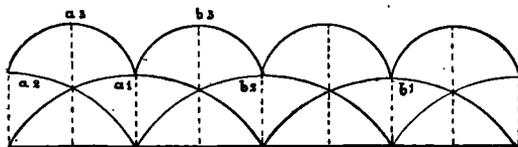


Fig. 68.

somme des forces électromotrices induites dans une des sections A ou A', et l'une des sections B ou B'. Si l'on représente par une sinusoïde $a_1 b_1$ (fig. 68), redressée afin de tenir compte de l'action du commutateur, la variation de la première de ces forces électromotrices, la variation de la seconde le sera par une courbe semblable $a_2 b_2$, mais placée de telle sorte que ses maximum coïncident avec les valeurs nulles de la première. En additionnant en chaque point les ordonnées de ces deux courbes, on en obtient une troisième $a_3 b_3$, représentant les fluctuations de la force électromotrice

totale. Cette courbe est sensiblement moins ondulée que la première. Il s'est produit là, suivant une heureuse comparaison due à M. Eric Gérard, un effet analogue à celui que l'on observe dans les cylindres accouplés des locomotives où l'un des pistons est au point mort, tandis que l'autre est vers le milieu de sa course.

Si au lieu de quatre sections, on en avait disposé huit, également espacées, l'effet eût été encore plus sensible. La variation de la force électromotrice, qui est de 50 pour 100 avec deux bobines, tombe à 2,38 pour 100 avec dix bobines, et à 0,61 pour 100 avec vingt. Aussi, en pratique, enroule-t-on toujours un nombre considérable de sections autour de l'anneau.

Il reste à examiner comment on effectue commodément la liaison des balais collecteurs avec la portion de l'induit passant devant eux.

Dans certaines machines, chaque section ne comporte qu'une spire; l'induit est constitué dans ce cas par des bandes métalliques soudées les unes aux autres, de manière à constituer des cadres réunis en chaîne sans fin (§ 103). Les sections contiguës sont isolées les unes des autres par du mica; mais leur surface extérieure est nue et les balais appuient directement sur la périphérie de l'induit.

Plus généralement on préfère réunir d'une manière continue les sections, prendre une dérivation entre chacune d'elles et amener cette dérivation à une barrette métallique isolée, placée à la périphérie d'un cylindre tournant autour du même axe que l'induit. Il y a autant de barrettes au collecteur que de sections sur l'induit; elles sont disposées dans le même ordre, et c'est sur elles que s'effectue, à l'aide des balais, la prise de courant.

69. — Induit à tambour. — Lorsque l'on réunit, pour former une section d'induit, les conducteurs élémentaires diamétralement opposés, le type d'induit ainsi réalisé est dit *induit Siemens* ou à *tambour*. Il fut indiqué pour la première fois par

Hafner Altenek, en 1873, comme une modification des petites machines Siemens usitées alors dans les laboratoires.

On voit, en se reportant à la figure 64, que si l'on opère cette jonction à l'aide d'un fil passant à la partie antérieure ou postérieure de l'induit, ce fil,

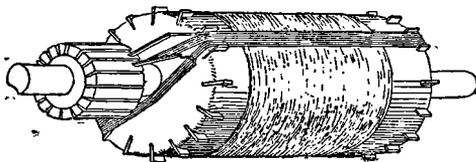


Fig. 69.

comme celui qui passe à l'intérieur de l'anneau-gramme, n'interviendra que par sa propre résistance.

On réalise une section (fig. 69) de la même

façon que dans l'induit gramme, en enroulant plusieurs fois de suite un fil le long des génératrices diamétralement opposées du cylindre en fer servant de noyau à l'induit.

La force électromotrice totale induite dans une section composée de n conducteurs élémentaires est cette fois n fois supérieure à celle d'un fil unique, chacune des boucles rencontrant dans sa rotation la totalité du flux.

70. — Régulation du courant dans les induits à tambour. — La régulation du courant dans les induits à tambour s'obtient, comme dans les induits à anneaux fermés, en répartissant à intervalles réguliers un certain nombre de sections sur le tambour et en les réunissant bout à bout. Des dérivations prises sur les points de jonction de chacune d'elles aboutissent aux lames d'un collecteur identique au collecteur gramme.

Pour effectuer commodément le bobinage, on sépare d'habitude, à l'aide de cales en bois, les extrémités du noyau en intervalles destinés à recevoir chacun une section. Une section occupant deux intervalles, le tambour est entièrement recouvert de fils quand la moitié seulement du collecteur est recouverte de lames. Afin de terminer l'induit, on superpose donc une deuxième série de sections à la première, et ces nouvelles sections sont raccor-

dées aux lames encore disponibles sur la seconde moitié du collecteur.

71. — Cas de l'induit élémentaire perpendiculaire à son axe de rotation. — Les machines de ce type sont dites machines à disque. La plus élémentaire qui se puisse imaginer est représentée figure 58. Pour permettre au conducteur d'effectuer sa rotation autour de l'axe, en rencontrant deux fois de suite en sens inverse les lignes du champ, il est nécessaire de couper, comme le montre cette figure, l'électro-aimant producteur de ce champ. Les machines à disque sont donc en réalité des machines multipolaires.

Comme dans les induits précédemment étudiés, on a été conduit, pour accroître la force électromotrice des machines à disque, à relier entre eux, pour constituer des sections, les conducteurs disposés radialement aux extrémités d'un même diamètre et qui sont le siège de forces électromotrices égales, mais de sens opposés. Cette liaison s'effectue (fig. 70) à l'aide d'un fil ab suivant la périphérie du disque qui supporte l'induit et ne coupant par suite aucune ligne de force.

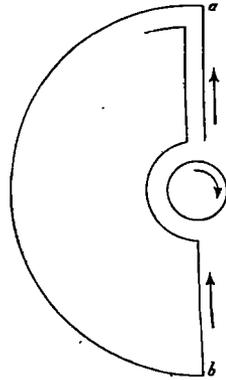


Fig. 70.

Un tel mode de formation des sections est identique à celui qui est usité dans les induits à tambour. Il n'y a pas lieu dès lors de s'étonner s'il n'existe pas de différence théorique entre les bobinages de ces deux types de machines.

Il convient d'appliquer à l'un tout ce qui a été dit pour l'autre. On y parviendra aisément en considérant l'enroulement à disque comme un enroulement à tambour épanoui radialement, la périphérie extérieure du disque correspondant à la face arrière du tambour.

72. — Calage des balais. — On a supposé, dans ce qui

précède, que les points de contact des balais avec le collecteur étaient dans la zone neutre, et que la zone neutre se trouvait exactement perpendiculaire à la direction des lignes de force du champ produit par les inducteurs. En réalité, il n'en est ainsi que lorsque l'induit est à circuit ouvert et qu'aucun courant n'y circule.

Lorsqu'une machine dynamo est en marche normale, on constate, en laissant les balais dans cette position théorique, la production de violentes étincelles au collecteur. Il est nécessaire, pour supprimer ces dernières, de déplacer le point de contact des balais d'un certain angle, variable avec les machines, et qui augmente généralement avec l'intensité du courant circulant dans l'induit. Cet angle est désigné sous le nom de *décalage*.

Le décalage des balais est dû à deux causes : le déplacement de la zone neutre sous l'action de l'aimantation du noyau de l'induit et la self-induction des circuits.

1° *Réaction de l'induit*. — Examinons en particulier le cas simple d'un induit gramme. Tant qu'aucun courant ne circule dans les deux moitiés de l'anneau, la répartition des lignes de force du champ est celle qui a été représentée figure 65. Elle est symétrique par rapport à la ligne qui joint les pôles des inducteurs.

Au contraire, dès qu'un courant passe dans l'anneau, chacune de ses moitiés devient un véritable solénoïde. Ces deux solénoïdes ont des effets concordants et tendent à développer un double pôle nord par exemple en N et un double pôle sud en S (fig. 71 [a]). Le champ dans lequel se meut l'induit n'est plus, par suite, le champ dû aux inducteurs seuls, mais un champ différent, résultant de la superposition de deux autres, celui dû aux inducteurs et celui dû à l'induit lui-même. La figure 71 [b] en montre la disposition. Elle est telle que la zone neutre se trouve légèrement avancée dans le sens de la rotation de l'induit.

La superposition des deux champs dus à l'inducteur et à l'induit a pour résultat non seulement d'entraîner un premier déca-

lage des balais, mais encore d'affaiblir dans une certaine mesure la force électromotrice de la machine. L'aimantation transversale

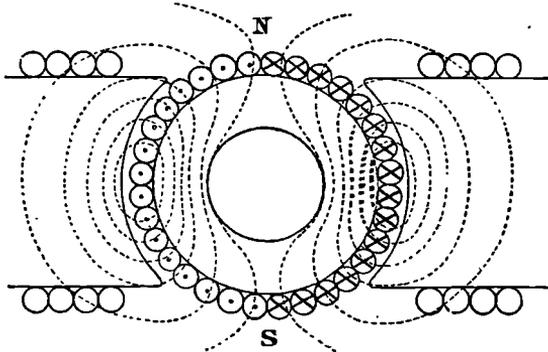


Fig. 71 [a].

du noyau de l'induit tend, en effet, à détruire en partie celle que prendrait l'anneau sous l'action des inducteurs seuls. Cela équivaut

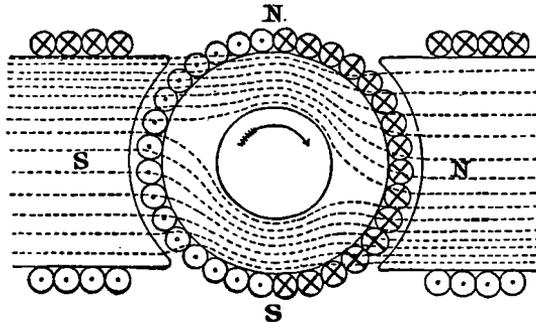


Fig. 71 [b].

à un affaiblissement des inducteurs. On appelle souvent *réaction d'induit* cette différence entre les forces électromotrices de la machine à circuit ouvert et à circuit fermé.

2° *Self-induction des spires.* — Il ne suffirait pas, pour supprimer les étincelles, de placer le contact des balais exactement sur la nouvelle ligne neutre qui vient d'être déterminée : un deuxième décalage est encore nécessaire.

Au moment où le balai passe, sur le collecteur, d'une lame à la suivante, il existe une période très courte durant laquelle ces deux lames voisines sont touchées simultanément. A cet instant, la section qui y aboutit est mise en court circuit.

Cette section, passant dans le voisinage de la zone neutre, est, il est vrai, le siège d'une force électromotrice d'induction très faible, mais elle est aussi parcourue par le courant de circulation de l'induit. La brusque suppression de celui-ci y provoque par suite la production d'un extra-courant de même sens. D'autre part, dès que la section est abandonnée par le balai, elle pénètre dans la seconde moitié de l'anneau. Le courant, de sens inverse aux précédents, qui parcourt cette moitié, tend à s'établir brusquement dans la section. Il y rencontre donc une résistance apparente d'autant plus élevée que la vitesse de la machine est plus grande et la self-induction de la section plus considérable. Cette résistance est suffisante pour amener le jaillissement d'une étincelle entre le balai et la lame quittée par lui.

Il est assez facile de remédier à cet inconvénient. Il suffit de profiter de l'instant de la mise en court circuit de la section pour que, sous l'action du champ, l'extra-courant qui traverse celle-ci, soit détruit, et qu'un nouveau courant de même sens que celui qui parcourt la seconde moitié de l'induit et de même intensité y soit induit. On y parvient en n'effectuant plus la commutation dans la zone neutre, mais dans une partie voisine où l'intensité du champ est suffisante pour produire les inductions désirées. Le décalage est ainsi augmenté d'une quantité variable, dépendant précisément de l'intensité du courant de l'induit.

Cette intensité varie avec la résistance extérieure du circuit de la machine. Aussi doit-on changer assez fréquemment la valeur du décalage. Pratiquement, les balais sont montés de telle sorte

qu'on puisse à tout instant les déplacer simultanément, et on cherche par tâtonnements la position pour laquelle les étincelles sont réduites au minimum.

Nous avons examiné le cas d'un induit gramme. Les mêmes raisonnements, quoiqu'un peu plus complexes, conduisent à des conclusions semblables pour les induits à tambour et à disque.

73. — Courants de Foucault. — Toutes les masses métalliques, constituant un circuit fermé susceptible d'intercepter un flux de force pendant la rotation de l'induit, sont le siège de forces électromotrices à l'égal de l'armature elle-même. Des courants, dits *courants de Foucault*, s'y développent, absorbant une partie notable de l'énergie dépensée dans la machine, et produisant des échauffements de nature à compromettre l'isolation des fils.

Deux parties de l'armature sont principalement le siège de ce phénomène : le noyau de l'induit et les fils de l'armature, dans le cas où ceux-ci sont massifs (induits à barres).

La direction des courants de Foucault dans le noyau est évidemment parallèle à celle du flux électrique parcourant les fils de l'induit. Le moyen le plus naturel d'éviter leur production est, par conséquent, de diviser les masses à préserver à l'aide de parties isolantes, orientées perpendiculairement à cette direction. On y parvient, soit, s'il s'agit d'un anneau, en constituant celui-ci à l'aide d'un faisceau de fils de fer isolés ou de disques annulaires empilés dans le sens de l'axe de rotation et séparés par du papier, soit, s'il s'agit d'un tambour, en empilant sur l'axe des disques pleins isolés les uns des autres.

Nous venons de dire que les courants de Foucault se produisaient également dans les fils de l'induit. Si, en effet, la section de ces fils est considérable et si le champ varie très rapidement dans la portion de l'espace où se déplace cette section, les portions élémentaires de celle-ci coupent à chaque instant un nombre de lignes de force très inégal, et sont par suite le siège de forces électromotrices différentes. Un courant orienté transversalement s'éta-

blit sous l'action de cette différence de potentiels. On l'atténue en accroissant la résistance du conducteur dans le sens transversal : au lieu de barres massives, il convient donc d'employer, soit un faisceau de fils tordus ensemble, soit des lamelles superposées.

74. — **Hystérésis.** — Durant une révolution de l'induit, le noyau de celui-ci parcourt un cycle magnétique fermé. Il en résulte une perte d'hystérésis, se traduisant sous forme d'élévation de température. Elle est sensiblement proportionnelle à la vitesse de l'induit et au nombre des pôles inducteurs.

L'échauffement dû, soit à l'hystérésis, soit aux courants de Foucault, est loin d'être négligeable : il est de même ordre que celui qui serait dû au seul passage du courant de la machine dans les fils de l'induit.

75. — **Calcul de la force électromotrice d'une machine bipolaire.** — Supposons qu'il s'agisse d'un induit à anneau, et cherchons à évaluer la force électromotrice induite dans une spire pendant une révolution de durée T .

Durant chaque quart de révolution, cette spire rencontre $\frac{N}{2}$ lignes de force, N étant le flux total issu d'un des pôles de l'inducteur. La force électromotrice induite demandée sera donc (§ 58) en volts :

$$\frac{4 \times \frac{N}{2}}{T} 10^{-8}.$$

Soit n le nombre total des spires enroulées sur l'anneau. La moitié de ces spires sont accouplées en tension. La force électromotrice totale de la machine E est donc $\frac{n}{2}$ fois plus grande :

$$[1] \quad E = \frac{n}{2} \frac{4 \frac{N}{2}}{T} 10^{-8} = \frac{Nn}{T} 10^{-8}.$$

Si \mathcal{N} désigne le nombre de tours de l'induit par seconde, on a d'autre part :

$$\mathcal{N}T = 1.$$

Remplaçant $\frac{1}{T}$ dans l'expression [1] par sa valeur \mathcal{N} , l'expression cherchée prend la forme facile à retenir :

$$E = \mathcal{N}Nn10^{-8}.$$

Un calcul identique conduit à la même expression dans le cas des machines à tambour, à condition toutefois de désigner par n , non plus le nombre des spires, mais celui des fils simples actifs recouvrant le tambour.

Cette expression permet de se rendre compte des moyens divers qui peuvent être employés pour accroître la force électromotrice d'une machine. On peut, en effet, augmenter, soit le nombre de tours de l'induit \mathcal{N} , soit le nombre des spires induites n , soit la force du champ, et pour suite le nombre N des lignes de force qui le caractérisent.

On ne saurait évidemment faire dépasser certaines limites à ce dernier. Il en est de même pour le nombre des spires. Son accroissement exagéré entraînerait en effet une augmentation de l'entre-fer et une diminution notable de l'intensité du champ. Reste la vitesse des conducteurs.

On ne peut donner sans danger à cette vitesse des valeurs considérables qu'en accroissant les dimensions de l'induit; on est alors amené naturellement à répartir autour de celui-ci un grand nombre de pôles inducteurs. Les machines ainsi construites sont les machines multipolaires.

76. — **Induits multipolaires.** — Imaginons que l'induit d'une machine bipolaire à anneau, à tambour ou à disque (fig. 72 et 72 bis), soit divisé le long de la ligne ox et ouvert de manière à former une partie d'un large cylindre : on obtient alors les

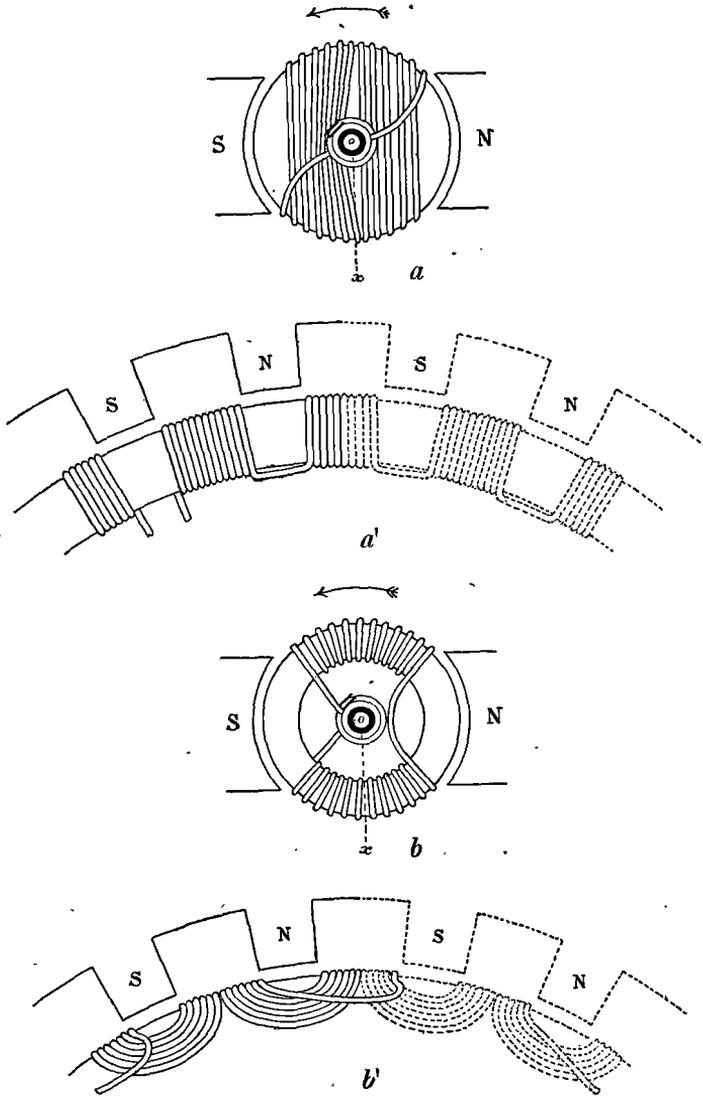


Fig. 72.

figures représentées en *a' b' c'* (fig. 72 et 72 bis). Tout ce qui a été dit précédemment pour les machines bipolaires reste vrai pour celles-ci.

On peut, d'autre part, juxtaposer à une des machines de cette nouvelle forme une série d'autres identiques (on en a figuré une

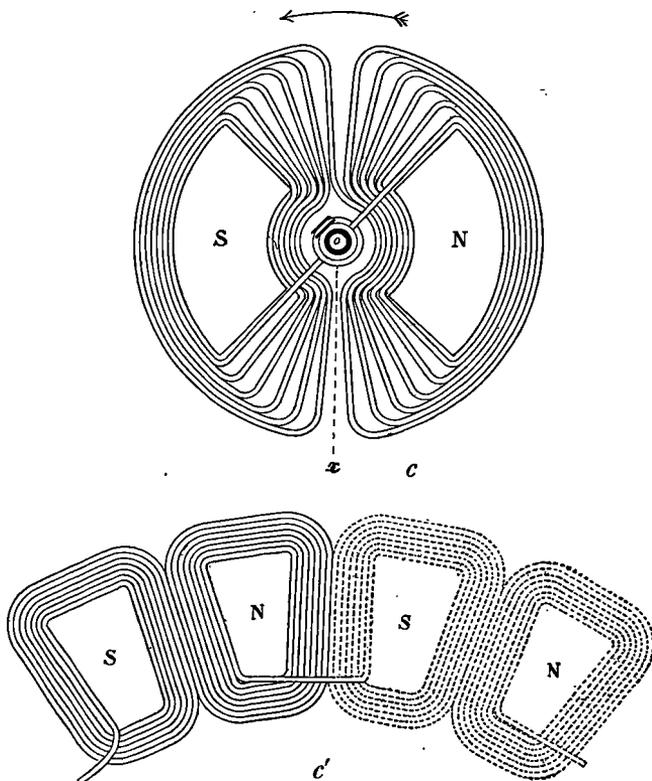


Fig. 72 bis.

en pointillé). Chacune d'elles demeurant munie de ses deux balais, rien n'empêche d'associer ces machines comme des piles, soit en quantité, soit en série. On réalise ainsi, quel que soit le cas, un induit multipolaire.

77. — Enroulement en quantité. — L'enroulement en quantité s'obtient en réunissant entre eux ceux des balais de ces diverses machines qui sont à un même potentiel.

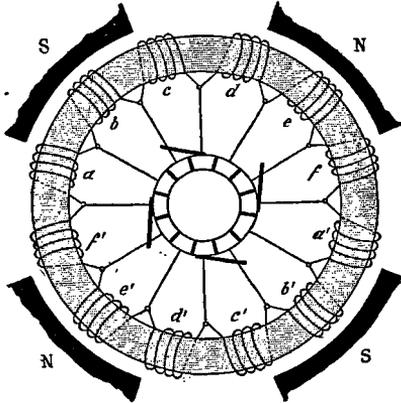


Fig. 73.

Dans le cas particulier d'une machine Gramme à quatre pôles, ces balais se trouvent aux extrémités d'un même diamètre, à condition toutefois que le nombre total des spires également réparties sur l'anneau soit un multiple exact du nombre des pôles (fig. 73).

Une telle disposition a l'inconvénient de nécessiter l'emploi d'un nombre de balais considérable (autant que de pôles). M. Mordey a proposé (fig. 74) de les réduire à deux, en réunissant à demeure par des conducteurs les différentes touches du commutateur qui devraient passer simultanément sous les balais au même potentiel. La conjonction a ainsi lieu non plus entre les balais, mais, ce qui revient au même, entre les touches. L'idée est ingénieuse; elle entraîne cependant une complication sérieuse dans l'enroulement de l'induit et des croisements de fils à des potentiels très différents, ce qui expose à une rupture des isolants en cas de brusque élévation de ces potentiels.

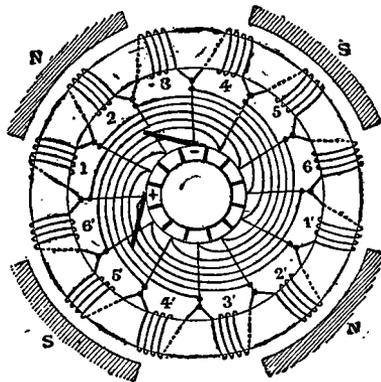


Fig. 74.

78. — **Enroulement en série.** — Lorsqu'on veut réaliser l'enroulement en série, il y a lieu de distinguer deux cas, suivant que le nombre des sections est un multiple du nombre des pôles ou un multiple de ce nombre, augmenté ou diminué d'une unité.

Dans le premier cas, on réunit en série toutes les sections semblablement placées par rapport aux pôles inducteurs de même nature. On associe ensuite ces nouveaux groupes à la façon des sections d'une machine bipolaire ordinaire. Il résulte d'une pareille disposition que le passage des balais d'une touche à l'autre ne met plus seulement une section en court circuit, mais autant de sections qu'il en est entré dans la composition d'un groupe.

Dans le second cas, toutes les sections sont réunies entre elles dans l'ordre d'un polygone étoilé. Le nombre des sections étant impair, si l'on considère dans l'espace une des deux moitiés de l'induit associées en quantité, elle comporte alternativement une section de plus et une section de moins que l'autre moitié. Tandis que, dans les enroulements ordinaires, deux sections opposées étaient mises en court circuit par les deux balais, il n'y en a plus jamais ici qu'une seule.

Cet enroulement a été employé par M. Desroziers. La figure 75 en représente un diagramme établi pour une machine tétrapolaire à neuf sections. On remarquera qu'il a été nécessaire de recouvrir le collecteur de dix-huit lames réunies deux à deux; dans une machine à six pôles, il en aurait fallu vingt-sept, et ainsi de suite.

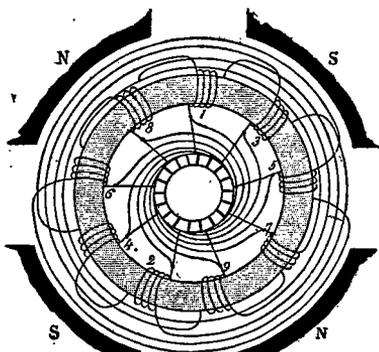


Fig. 75.

Inducteurs.

79. — Divers modes de production du champ. — Il n'a été fait aucune hypothèse, dans ce qui précède, sur la façon dont est produit le champ magnétique dans une machine dynamo-électrique.

Trois procédés existent pour créer ce champ.

On peut utiliser, soit des aimants permanents, soit des électro-aimants excités par un courant indépendant de celui de la machine (fourni, par exemple, par une autre machine), soit enfin des électro-aimants excités par le courant de la machine elle-même. Suivant le cas, la dynamo est dite alors magnéto-électrique, à excitation indépendante ou auto-excitatrice.

80. — Machines magnéto-électriques. — Les aimants permanents ne sont guère employés que dans les machines de laboratoire.

A égalité de volume, le champ créé par les aimants permanents est en effet moitié moindre que celui qui serait produit par un électro-aimant à noyau de fer doux. Pour une même puissance, le volume d'une machine magnéto-électrique est donc beaucoup plus grand que celui d'une dynamo munie d'électro-aimants. L'acier coûtant plus cher que le fer, l'économie d'excitation réalisée dans le premier cas est par suite illusoire.

81. — Machines à excitation indépendante. — Lorsque la machine comporte des électro-aimants, on peut exciter ces derniers à l'aide d'un courant étranger, emprunté généralement à une petite dynamo spéciale qui porte le nom d'*excitatrice*.

L'avantage de ce système réside dans l'indépendance complète qu'il réalise entre le circuit d'excitation et le circuit de l'induit. En admettant, en particulier, que le courant d'excitation demeure constant et que la réaction d'induit de la machine soit négligeable, la force électromotrice de celle-ci demeure très sensiblement pro-

portionnelle à sa vitesse (§ 75). A vitesse constante, une machine à excitation indépendante fonctionne donc comme une pile imposable.

82. — **Machines auto-excitatrices.** — On peut enfin se servir du courant fourni par la dynamo elle-même, pour exciter ses inducteurs.

A priori, il semble nécessaire, dans ce procédé, d'emprunter un instant, au début de la mise en marche, le secours d'un courant étranger, chargé de produire l'excitation initiale des électros, et par suite l'*amorçage* de la machine.

Il n'en est pas ainsi en réalité. Après une première aimantation, les noyaux des inducteurs conservent toujours une certaine aimantation rémanente. Si l'on fait tourner la machine, la rotation de l'induit dans le champ d'intensité très faible produit par cette aimantation rémanente provoque le passage d'un courant dans le circuit extérieur. Supposons qu'on envoie, en totalité ou en partie, ce courant dans les électros à exciter. Il suffira qu'il ait une intensité supérieure à celle du courant qui produirait une aimantation des électros égale à leur aimantation rémanente initiale, pour que le champ soit renforcé. Le courant de l'induit augmentera, avec lui l'excitation ; à la suite d'une série de réactions successives semblables, la machine sera amorcée.

Deux conditions sont nécessaires pour qu'une telle opération soit possible. La première vient d'être dite : l'intensité du courant induit, produit par le champ dû à l'aimantation rémanente, doit avoir une valeur déterminée.

La seconde est évidente : le courant lancé dans le circuit des inducteurs doit être de sens tel que l'aimantation soit renforcée et non diminuée. Les connexions doivent donc être établies en conséquence.

Il existe diverses méthodes pour intercaler le circuit des inducteurs d'une machine auto-excitatrice sur son circuit général. Examinons-les successivement.

83. — **Excitation en série.** — Dans les machines dites *excitées en série*, l'enroulement des électros inducteurs est intercalé directement sur le circuit extérieur (fig. 76). Comme tout le courant fourni par la machine y circule, il y a intérêt à ne pas y dissiper trop de puissance sous forme de chaleur et à le constituer à l'aide d'un fil gros et court.

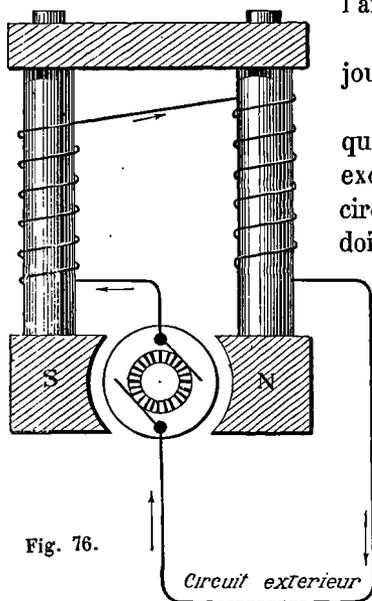


Fig. 76.

Une machine excitée en série jouit de propriétés particulières.

On a vu tout d'abord que, pour que l'amorçage d'une dynamo auto-excitatrice fût possible, le courant de circulation, au début de la rotation, doit avoir une intensité suffisante pour accroître le magnétisme des inducteurs. Dans le cas d'une dynamo en série, cette intensité dépend de la résistance du circuit extérieur. Au début de la mise en marche, la résistance de ce dernier doit donc être très faible. On constate effectivement, si on la diminue progressivement, que l'amorçage s'effectue seulement à partir du

moment où elle devient inférieure à une valeur déterminée, caractéristique de la machine et appelée par suite *résistance critique*.

En second lieu, soient E la force électromotrice totale de la machine, I l'intensité du courant fourni par elle, e la différence de potentiel entre les bornes extérieures de la machine, r la résistance intérieure de la machine : la différence de potentiel e est évidemment égale à la force électromotrice totale E , diminuée de la perte de charge rI dans l'intérieur de la machine :

$$e = E - rI.$$

Supposons que le débit I vienne à s'accroître par suite de modifications apportées dans le circuit extérieur. En se reportant à l'équation précédente, il semblerait que la différence de potentiel e devrait tendre à décroître. Il n'en est pas ainsi cependant, car, l'excitation de la machine ayant augmenté avec l'intensité I , la force électro-motrice totale E s'est accrue.

Une sorte de compensation s'établit donc dans les machines excitées en série, de nature à maintenir sensiblement constante la valeur e de la différence de potentiels aux bornes. Aussi peut-on, dans une certaine mesure, les considérer comme auto-régulatrices à *potentiel constant*. Cette régulation n'est d'ailleurs qu'approximative et serait insuffisante dans la majeure partie des cas.

Les machines excitées en série sont sujettes à d'assez graves inconvénients.

Imaginons, par exemple, qu'on veuille charger des accumulateurs avec l'une d'elles. A mesure que la charge s'opère et que la force contre-électromotrice des accumulateurs augmente, le débit de la machine diminue, avec lui l'excitation, et par suite la force électromotrice de la machine elle-même. Dès que cette dernière devient inférieure à celle des accumulateurs, le courant change de sens dans le circuit général, l'aimantation des inducteurs devient inverse, et la machine décharge les éléments au lieu de les charger. Il est dès lors nécessaire d'employer des précautions spéciales dans une opération de ce genre. On ne doit mettre une machine excitée en série sur des accumulateurs qu'après avoir soigneusement vérifié que sa force électromotrice est supérieure à la leur ; il faut, en outre, interposer sur le circuit un appareil qui coupe automatiquement les connections, au moment où l'inversion de courant riquerait de se produire. Cet appareil porte le nom de *disjoncteur automatique*.

Il n'est pas possible non plus de mettre en court circuit une dynamo excitée en série, car tout accroissement considérable du courant, résultant par exemple d'une brusque diminution de la résistance extérieure, amène un surcroît d'excitation susceptible de provoquer la brûlure ou même la rupture de l'induit. On a soin, pour éviter un

accident de ce genre, d'introduire dans le circuit un fil, dit *coupe-circuit*, qui fond dès que le courant atteint une limite dangereuse.

La brusque rupture du circuit extérieur est à éviter pour les mêmes raisons, car elle entraîne la production d'un extra-courant de rupture d'intensité élevée. Il est d'usage d'intercaler dans le circuit, avant de l'ouvrir, une série de résistances croissantes chargées de réduire progressivement l'intensité du courant de circulation.

84. — **Excitation en dérivation.** — Les inconvénients signalés plus haut disparaissent si, au lieu de placer directement

le circuit des inducteurs sur celui de la machine, on se contente de le mettre en dérivation (fig. 77). Dans ce cas, il y a intérêt à ce que la fraction du courant principal, empruntée pour la dérivation, soit assez faible. L'enroulement des inducteurs est donc constitué, à l'inverse de l'enroulement en série, par un fil long et fin.

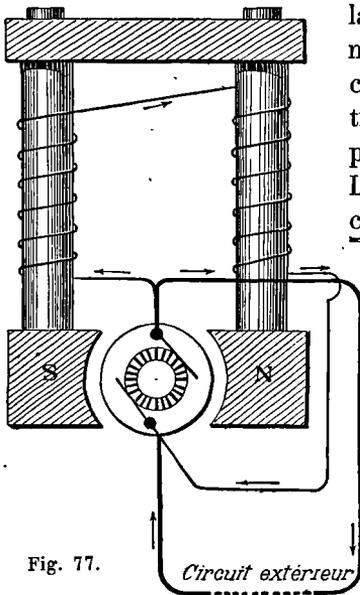


Fig. 77.

Les dynamos excitées en dérivation présentent des propriétés inverses des dynamos excitées en série.

Lorsqu'à la suite d'une diminution de la résistance du circuit extérieur, le débit augmente dans ce circuit, le courant dérivé diminue, avec lui l'excitation et la force électromotrice. Aussi, peut-on mettre en court circuit, sans danger, une machine en dérivation. La totalité du courant passant alors dans ce court circuit, les électros cessent simplement d'être excités et la machine se désamorce.

De même, quelle que soit la résistance du circuit extérieur, une machine excitée en dérivation peut toujours s'amorcer ; il suffit que cet amorçage puisse avoir lieu lorsque le circuit extérieur est ouvert. Dans ce cas limite, en effet, la dynamo en dérivation devient identique à une machine en série, et il est alors nécessaire que la résistance de ses inducteurs soit inférieure à sa résistance critique.

Si l'on se reporte enfin au schéma de l'enroulement en dérivation, on constatera que, même en inversant le sens du courant dans le circuit extérieur, ce sens reste identique dans la dérivation. La machine est donc à l'abri des renversements de polarité et son emploi est tout indiqué lorsqu'on agit sur des circuits extérieurs comprenant des forces contre-électromotrices.

85. — Excitation Compound. — L'énergie électrique dépend de deux facteurs différents (§ 11), la force électromotrice et l'intensité du courant. On est généralement amené en pratique à maintenir constant, soit l'un, soit l'autre de ces deux termes.

Dans le cas d'une installation d'éclairage électrique avec lampes à arc, par exemple, le montage de ces lampes est fait en série, de telle sorte que le courant total passe dans chacune d'elles.

Supposons que le type choisi exige pour fonctionner 50 volts et 13 ampères : l'intercalation d'une lampe dans le circuit général, au moment de son allumage, exigera donc un accroissement de différence de potentiel, aux extrémités de ce circuit, égal à 50 volts, mais l'intensité du courant de circulation devra rester constante et égale à 13 ampères. La distribution est à intensité constante.

L'installation eût-elle été faite, au contraire, avec des lampes à incandescence, celles-ci sont toutes placées en dérivation sur deux conducteurs issus de chacun des pôles de la machine. Il est nécessaire, dans ce cas, que l'introduction d'une lampe n'entraîne pas d'abaissement de la différence de potentiel entre les deux conducteurs d'alimentation, tandis que le débit de la machine doit augmenter, afin que l'intensité du courant demeure identique dans

les lampes déjà allumées. La distribution est, cette fois, à potentiel constant.

Aucun des modes d'excitation précédemment décrits ne permet d'obtenir des machines marchant rigoureusement à intensité ou à potentiel constants. Si l'on imagine, par exemple, qu'on utilise une machine excitée en dérivation pour alimenter une installation d'éclairage par lampes à incandescence, chaque fois que le courant dans le circuit extérieur augmentera d'intensité, l'excitation et, par suite, la différence de potentiel aux bornes diminueront. Toutefois, les propriétés des deux enroulements en dérivation et en série étant inverses,

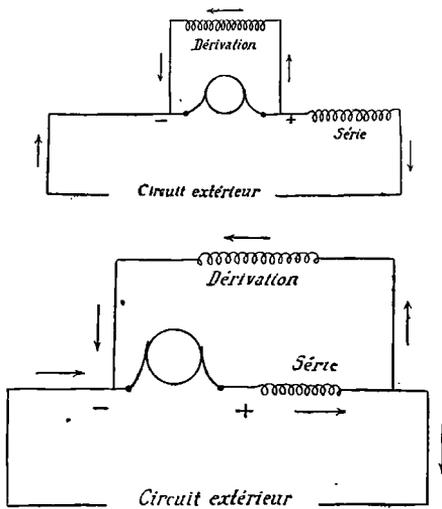


Fig. 78.

on conçoit qu'il soit possible de superposer à l'enroulement en dérivation un second enroulement en série, et de calculer la résistance de ce dernier de telle sorte que son action magnétisante, qui croît avec l'intensité, compense

la perte d'excitation produite dans le premier. Une telle machine serait alors bien réellement à potentiel constant.

Les enroulements mixtes ainsi combinés sont appelés *compound*. On en connaît deux variétés, suivant que la dérivation à fil fin est prise avant ou après le circuit d'excitation en série. On les a représentées l'une et l'autre figure 78.

86. — Méthodes de régulation. — Si séduisante que paraisse la solution précédente, elle n'est pas encore satisfaisante.

Elle n'est entièrement efficace, en effet, qu'autant que le circuit extérieur se trouve précisément dans les conditions en vue desquelles l'enroulement compound a été calculé; tandis qu'en pratique, les conditions électriques de ce circuit varient sans cesse.

On préfère le plus souvent recourir à des procédés de régulation plus rudimentaires, mais s'adaptant mieux aux circonstances.

Le voltage d'une dynamo dépend (§ 75) de la vitesse de l'induit, du nombre des fils de celui-ci et du flux magnétique. On peut donc agir, à volonté, sur l'un de ces trois éléments pour effectuer le réglage.

Des dispositions mécaniques faciles à concevoir permettent de modifier la vitesse. On peut aussi faire varier le nombre des fils utiles de l'induit en déplaçant les balais. Mais, généralement, on agit sur le flux magnétique en introduisant, soit à la main, soit automatiquement, des résistances convenables dans le circuit d'excitation.

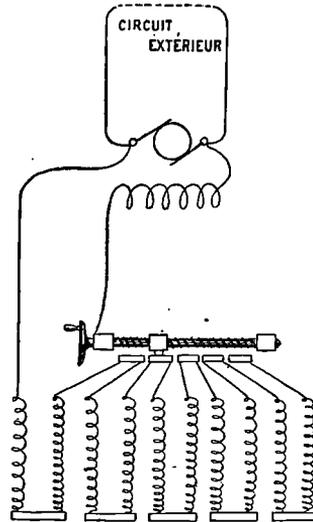


Fig. 79.

87. — Régulation à la main. —

La figure 79 montre une disposition fréquente de rhéostat variable, servant à la régulation. En supposant que l'ouvrier qui surveille la machine à l'usine ait sous les yeux un appareil lui indiquant à tout instant la différence de potentiel entre les deux points où cette différence doit être maintenue constante, il lui suffit de manœuvrer la manette pour introduire ou retirer des résistances sur le circuit d'excitation et maintenir, par suite, la constance désirée.

88. — Régulation automatique. — Il est aussi possible de

substituer à l'ouvrier un appareil électrique, enregistrant, soit les différences de potentiel, soit les intensités, suivant l'élément dont on cherche à assurer la constance. Le jeu de cet enregistreur provoque, dans ce cas, l'introduction ou le retrait des résistances convenables dans le circuit d'excitation.

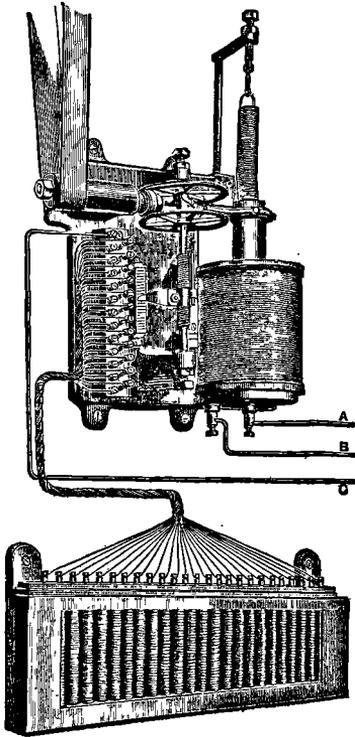


Fig. 80:

Un grand nombre de régulateurs automatiques ont été imaginés. Nous en citerons seulement deux, à titre d'exemple.

Dans le régulateur Golden, l'enregistreur est une bobine creuse (fig. 80), garnie de fils dans lesquels passe le courant dont on veut maintenir l'intensité constante. Un noyau de fer plonge à l'intérieur de la bobine et y avance plus ou moins, étant plus ou moins attiré suivant la valeur de cette intensité. Chaque fois que l'attraction a une valeur différente de celle qui correspond à l'intensité choisie, le déplacement du noyau provoque l'embrayage, dans un sens ou dans l'autre, d'une vis verticale avec un double volant actionné par le moteur mécanique. En tournant, la vis fait glisser un contact sur une série

de touches auxquelles aboutissent les extrémités de résistances représentées en bas de la figure. Lorsque le contact monte, par exemple, il introduit dans le circuit d'excitation autant de résistances élémentaires qu'il a rencontré de touches.

Dans le régulateur de la machine Brush, qui est une dynamo

excitée en série, le moteur mécanique n'a plus à intervenir (fig. 81). Une armature A tient lieu du noyau de fer doux précédent et comprime plus ou moins, suivant qu'elle est elle-même plus ou moins attirée; une pile de disques de charbon C intercalés sur une dérivation prise sur les inducteurs F. M. La résistance des disques

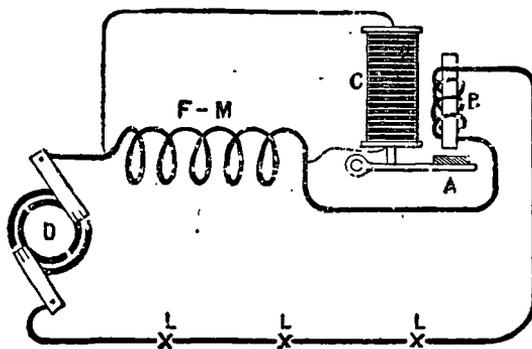


Fig. 81.

variant en raison inverse de la compression, leur ensemble joue le même rôle que les résistances variables du régulateur Goolden.

89. — **Accouplement des dynamos.** — Les dynamos à courant continu de même que les piles peuvent être accouplées en quantité ou en tension.

Le couplage en série de deux dynamos n'offre aucune difficulté; il n'en est pas de même du couplage en quantité. Deux dynamos sont toujours, en effet, plus ou moins différentes l'une de l'autre : elles ont donc rarement la même force électromotrice à la même vitesse. Au moment de leur accouplement en quantité, il se passe un phénomène analogue à celui qui a lieu lorsqu'on oppose l'une à l'autre deux piles de forces électromotrices inégales. Le courant de la dynamo la plus énergique passe dans la dynamo la plus faible.

Si les deux dynamos associées sont excitées en dérivation, il n'en résulte qu'un affaiblissement du débit total. Si, au contraire, elles sont excitées en série (fig. 82 *a*), et si la force électromotrice de la machine B est légèrement inférieure à celle de la machine A, de telle sorte que ce soit une partie du courant de A qui passe dans B, en sens inverse du courant normal, l'excitation de la

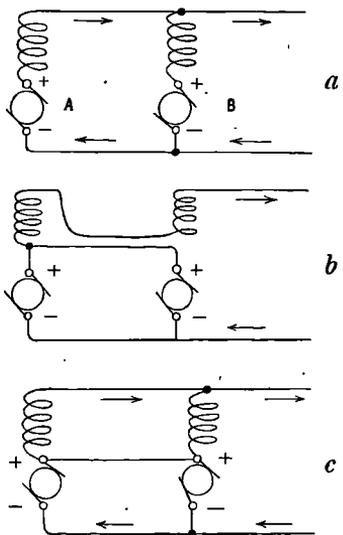


Fig. 82.

machine B diminuera, et avec elle sa force électromotrice. Les réactions mutuelles des deux machines ont alors pour résultat d'accroître sans cesse la différence de leurs forces électromotrices. Il arrive enfin un moment où le courant de circulation change de sens dans B, les pôles de celle-ci s'inversent et les deux dynamos marchent en opposition.

On connaît deux procédés permettant d'éviter cet accident. Le premier (fig. 82 *b*) consiste à n'associer en quantité que les inducts des deux machines, de façon que le sens du courant ne puisse jamais être inversé dans les inducteurs.

Le second, dû à Gramme (fig. 82 *c*), consiste à réunir les deux balais d'où partent les circuits inducteurs, à l'aide d'un fil d'équilibre qui les maintient au même potentiel. La différence de potentiel aux extrémités des armatures est ainsi toujours égale dans les deux machines.

Des artifices identiques permettent le couplage en quantité des dynamos compound.

90. — Rendement industriel des machines. — On appelle rendement industriel d'une machine dynamo-électrique le rapport

entre la puissance électrique recueillie à l'extérieur de cette machine et la puissance mécanique qu'elle absorbe.

Si e est la différence de potentiel aux bornes de la machine, I l'intensité du courant dans le circuit extérieur, le rendement industriel sera donc le rapport du produit eI à la puissance mécanique employée à faire tourner la dynamo et exprimée en watts (§ 11).

Ce rendement est très élevé et varie de 0,80 à 0,85 ; les 15 ou 20 pour 100 de puissance dissipée proviennent de l'échauffement des conducteurs, des courants de Foucault, de l'hystérésis, des frottements, etc.

91. — Rendement électrique des machines. — On appelle rendement électrique d'une machine dynamo-électrique le rapport qui existe entre la puissance électrique utilisable à l'extérieur d'une machine et la puissance électrique totale de cette machine.

En conservant les notations du paragraphe précédent, si E est la force électromotrice de celle-ci, i l'intensité du courant dans l'induit, ce rendement sera exprimé par le rapport $\frac{Ei}{eI}$. Il varie de 0,95 à 0,97 dans les bonnes machines. C'est celui qui est généralement indiqué sur les catalogues par les constructeurs,

92. — Caractéristique des machines. — On peut, comme on l'a dit déjà plusieurs fois, assimiler une dynamo à courant continu à une véritable pile. Toutefois, c'est une pile dont la force électromotrice varie avec le débit. Il est désirable, pour pouvoir en faire un bon usage, de connaître très exactement ce mode de variation. On le détermine expérimentalement.

S'il s'agit, par exemple, d'une dynamo excitée en série, on fermera le circuit de la machine sur une résistance élevée, que l'on fera varier, et l'on mesurera chaque fois la différence de potentiel aux balais et l'intensité du courant correspondante.

On a l'habitude de traduire graphiquement ces résultats à l'aide

d'une courbe tracée en prenant pour ordonnées les valeurs des différences de potentiel mesurées en volts et pour abscisses celles des intensités mesurées en ampères. Cette courbe, qui résume en quelque sorte la personnalité de la machine, porte le nom de *caractéristique*.

Détails de construction des machines dynamo-électriques.

93. — Connaissant maintenant les principes du fonctionnement des dynamos, nous sommes en mesure de définir les qualités que doivent réunir leurs organes et d'en comprendre mieux la réalisation pratique.

94. — *Induit.* — 1° *Résistance des fils de l'induit.* — La résistance des fils de l'induit doit être aussi faible que possible en vue de diminuer les pertes de puissance à l'intérieur de la machine. On cherche donc à réduire au minimum la longueur des fils servant à n'établir que des liaisons, et qui ne sont le siège d'aucune force électromotrice utile. On n'emploie également que du cuivre de haute conductibilité et d'assez forte section ; quelquefois même il est fait usage de véritables barres.

La production des courants de Foucault dans les fils de l'induit conduit à préférer à un conducteur unique un faisceau de brins de cuivre tordus ensemble, ou des lames minces superposées. (§ 73).

Dans certains induits à tambour, on fait passer les fils induits à l'intérieur de trous longitudinaux creusés près de la surface du noyau (induit Brown). Cette disposition a l'avantage de donner une grande solidité à l'induit et de supprimer presque entièrement la production des courants de Foucault.

2° *Vitesse de l'induit.* — La force électromotrice d'une machine croissant avec la vitesse de l'induit, il y a un intérêt considérable à pouvoir accroître cette vitesse.

La vitesse linéaire des fils extérieurs de l'induit est généralement de 15 mètres à la seconde. On l'élève quelquefois jusqu'à 40 mètres. Elle dépend des dimensions de l'induit, la vitesse angulaire de celui-ci ne pouvant guère dépasser 1,500 à 2,000 tours à la minute.

Les machines à vitesse relativement faible jouissent d'une faveur marquée, car il est possible de les attaquer directement par l'arbre du moteur.

3° *Chaleur développée dans l'induit.* — Il est essentiel que la température de l'induit ne s'élève jamais au delà d'une limite déterminée (généralement 75°). La densité du courant circulant dans les conducteurs induits n'est donc pas arbitraire. On admet qu'elle doit être comprise entre 3,5 et 5 ampères par millimètre carré de section. On combat, en outre, l'échauffement en ménageant des vides autour des fils et en provoquant une bonne ventilation.

Dans les machines à disques, où il n'existe pas de noyau de fer et où, par suite, les courants de Foucault et les phénomènes d'hystérésis sont supprimés, la densité de courant peut être considérablement accrue et monter jusqu'à 7 ampères par millimètre carré.

4° *Isolants des fils.* — Les isolants employés sont choisis de manière à ne pas se détériorer sous l'action de la chaleur. On emploie fréquemment le mica ou l'amiante.

5° *Forme de l'induit.* — Les trois formes générales d'induit, — induit à anneau, induit à tambour, induit à disque, — jouissent chacune de propriétés particulières qui en motivent l'emploi suivant les cas.

Dans l'induit à anneau, les bobines sont juxtaposées. L'enroulement et le remplacement éventuel de l'une d'elles sont donc faciles. La forme d'anneau permet aussi de construire des induits de

grand diamètre et d'obtenir ainsi des vitesses tangentielles considérables avec une assez faible vitesse angulaire. Enfin les potentiels croissent progressivement le long de l'anneau : la différence de potentiel entre deux spires voisines n'est dès lors jamais considérable, et l'on peut obtenir des forces électromotrices très élevées, sans danger pour l'isolement des fils.

En revanche, les conducteurs logés à l'intérieur de l'anneau sont inactifs ou même nuisibles, si la totalité des lignes de force ne passe pas par le noyau de l'induit ; leur résistance, qui est assez considérable, provoque des pertes de puissance relativement élevées.

Dans l'induit en tambour, la longueur des fils inactifs est très réduite. Toutefois, le bobinage est très difficile à réaliser, se prête mal au remplacement des sections, et entraîne le voisinage de fils à des potentiels très différents. L'action de la force centrifuge s'exerce aussi très violemment sur les fils, par suite de leur grand développement et de la vitesse angulaire considérable qu'on est obligé de donner à l'induit, toujours de dimensions assez faibles.

Les induits à disque, enfin, peuvent être construits avec de grands diamètres. Leur forme aplatie permet de supprimer le noyau de fer, sans cependant donner à l'entrefer une valeur trop grande. Cette suppression entraîne, du même coup, celle des pertes d'hystérésis ou provenant des courants de Foucault. En revanche, les machines à disque ont l'inconvénient d'exiger un coût plus élevé d'excitation et d'avoir de grandes longueurs de fils inactifs. Il est également difficile de bien assurer la rigidité du disque.

6° *Constitution du noyau.* — Les noyaux sont généralement formés de disques de tôle mince (4 à 6 dixièmes de millimètre d'épaisseur), séparés par du papier afin de diminuer la production des courants de Foucault dont ils sont le siège. Ces disques sont serrés les uns contre les autres à l'aide de boulons isolés d'eux par un carton ou de la fibre. L'ensemble est fixé sur l'axe de la machine, soit par l'intermédiaire de croisillons en métal non

magnétique portés par un moyeu claveté sur l'arbre, soit par simple serrage entre deux plateaux métalliques vissés sur l'arbre et percés de trous pour la ventilation.

On donne parfois aux disques une forme dentée. Les dents, en effet, constituent un excellent mode d'entraînement pour les fils, qui sont retenus par elles. Elles diminuent aussi l'épaisseur de l'entrefer, car leurs sommets peuvent être très rapprochés des pièces polaires.

Dans les induits à anneau, on peut former le noyau à l'aide d'un faisceau de fils de fer isolés. Cette disposition, mise en faveur par Gramme, a l'inconvénient d'offrir, pour un volume donné, une moindre section de fer, par suite de la forme ronde des conducteurs, et de présenter une discontinuité qui constitue une résistance appréciable au passage du flux de force. On préfère aujourd'hui faire usage de disques annulaires superposés et séparés les uns des autres par du papier ou tout autre isolant.

Il est nécessaire d'isoler le noyau des fils qu'il supporte. On l'enduit, à cet effet, d'une ou deux couches de vernis, puis on le recouvre de papier ou de canevas, enduits à leur tour de vernis.

7° *Fixation de l'armature sur le noyau.* — On fixe sur le noyau les fils du bobinage de telle sorte qu'ils puissent résister à l'action d'arrachement due à la force centrifuge et aux forces diverses du champ. Cette fixation est réalisée à l'aide d'un certain nombre de liens extérieurs appelés *frettes*, en fil de laiton, de bronze phosphoreux ou d'acier.

8° *Dimensions des induits.* — Les dimensions des induits sont calculées de manière à ce que l'induction magnétique y atteigne une valeur comprenant 10,000 à 15,000 unités C. G. S. Elles sont diverses suivant les types de machines. On peut admettre comme pratique usuelle que, dans les induits à anneaux, la longueur de la génératrice est égale au diamètre de l'anneau, tandis que dans les induits à tambour, elle est une fois et demie ce diamètre.

95. — **Collecteurs.** — Les collecteurs sont constitués par des lames trapézoïdales en cuivre ou en laiton, disposées de manière à former un cylindre concentrique à l'arbre et isolées à la fois entre elles et de cet arbre. Il y a autant de ces lames que de sections dans l'induit. Le nombre des sections est calculé d'autre part de telle sorte que la différence de potentiel entre deux lames consécutives ne dépasse pas 5 volts.

On réalise l'isolation des lames entre elles en les séparant par du mica, de l'amiante, ou quelquefois par un simple intervalle d'air.

Les lames d'un collecteur doivent pouvoir être visitées et remplacées aisément. On apporte également le plus grand soin aux connexions qui les réunissent aux extrémités des sections.

96. — **Balais.** — Les balais employés sont formés, soit avec des lames ou fils de cuivre, soit avec des toiles métalliques, soit avec du charbon.

Dans le premier cas, les fils de cuivre sont serrés ensemble, soudés à une de leurs extrémités et maintenus dans une gaine convenable. Cette disposition a pour but de multiplier les points de contact avec le collecteur et d'accroître la résistance transversale du balai. Le nombre des étincelles est ainsi diminué.

Les balais en toile métallique sont obtenus en roulant celle-ci sur elle-même un certain nombre de fois. Ils sont présentés obliquement au collecteur, de manière à uniformiser leur usure.

Les balais en charbon, enfin, sont très en faveur aujourd'hui. Ils sont formés par une simple tablette de charbon appuyée verticalement sur le collecteur. La machine peut, par suite, tourner dans un sens ou dans l'autre, sans qu'il soit nécessaire d'y toucher.

On a vu que le calage des balais devait être modifié assez souvent en cours de marche. Il est d'usage, pour faciliter cette opération, de monter les balais sur des porte-balais qui permettent de changer simultanément l'orientation des deux balais et, au besoin, leur inclinaison sur le collecteur.

Chaque contact sur le collecteur est toujours pris avec deux balais au moins ; on peut ainsi retirer l'un d'eux sans couper nécessairement le circuit.

97. — Inducteurs. — 1° *Forme des inducteurs.* — Les formes adoptées pour les inducteurs sont fort nombreuses. On cherche toujours, en les déterminant, à donner au circuit magnétique une résistance aussi faible que possible. En particulier, il convient de réduire au minimum les dimensions de l'entrefer. On

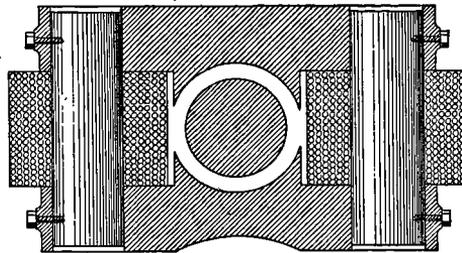


Fig. 83.

sait (§ 66) qu'on y parvient en munissant les pôles d'épanouissements de forme convenable. Ces épanouissements présentent aussi l'avantage de diriger les lignes de force ; on doit éviter, cependant, de les rapprocher trop l'un de l'autre, de peur de créer entre eux des dérivations magnétiques qui seraient nuisibles au rendement de la machine.

Le champ créé par les inducteurs doit être symétrique. Cette symétrie est essentielle si l'on veut que deux conducteurs de l'induit, symétriquement placés par rapport aux inducteurs, soient le siège d'inductions identiques, et que, par suite, l'angle de calage de chacun des balais soit le même.

La symétrie du champ a également pour résultat d'assurer la stabilité de la machine ; car alors les diverses attractions mécaniques produites sur l'induit s'équilibrent. On a constaté que, dans

une machine Gramme de 60 kilowatts, à champ symétrique, l'effort résultant de ces attractions atteignait 700 kilogrammes. Ces effets sont donc fort importants.

On réalise d'une façon très sûre la symétrie d'un champ en employant des électro-aimants conjugués, formant des circuits magnétiques distincts. Tel est le cas dans l'inducteur du type Manchester (fig. 83).

2° *Noyau des inducteurs.* — Le noyau des inducteurs est en fonte, en fer ou en acier doux.

La fonte est d'un prix peu élevé et permet de mouler directement les carcasses, mais elle a une perméabilité très inférieure à celle du fer.

On lui préfère fréquemment un acier doux, contenant une faible proportion de ferro-aluminium, et qui peut aussi se mouler, tout en conservant une perméabilité voisine de celle du fer.

Quelquefois, enfin, on se sert de fer pour le noyau proprement dit, et on réserve la fonte pour les épanouissements polaires et la culasse, mais le contact des deux métaux est difficile à réaliser et il risque d'introduire dans le circuit magnétique une résistance anormale.

Certaines machines sont pourvues de noyaux d'inducteurs feuilletés, composés d'une série de lames de tôle isolées les unes des autres. Cette disposition a pour but de diminuer la production des courants de Foucault.

3° *Fils de l'inducteur.* — Les fils de l'inducteur doivent présenter une grande surface de refroidissement. On admet que la température de l'inducteur ne doit pas dépasser 30°.

En général, la densité de courant dans les conducteurs de l'inducteur est de 2 ampères environ.

Description de quelques machines usuelles.

98. — Pour terminer cette étude, signalons enfin les particularités de construction, spéciales à quelques-unes des machines le plus en usage.

99. — **Machine Gramme.** — La machine Gramme est l'une des premières en date et demeure encore fort répandue. La figure 84

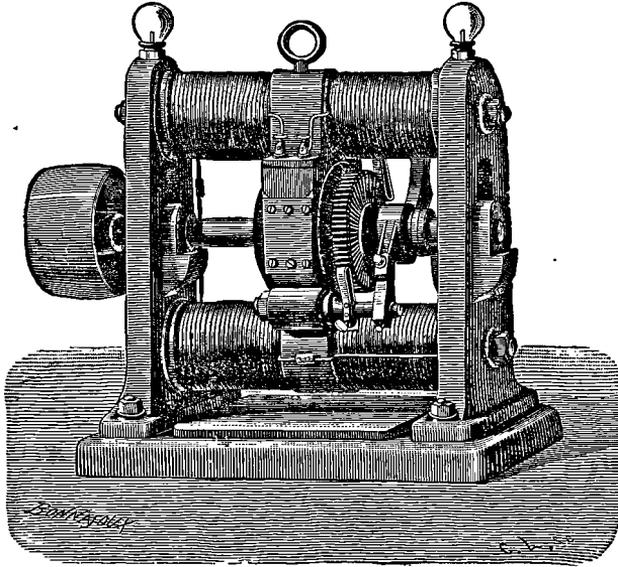


Fig. 84.

représente un de ses modèles les plus connus. Les inducteurs y sont à double circuit magnétique et ont leurs noyaux en fer. Les pièces polaires et les culasses, qui servent en même temps de flasques au bâti, sont en fonte. Les porte-balais sont fixes.

Dans un deuxième modèle, dit « type supérieur » (fig. 85),

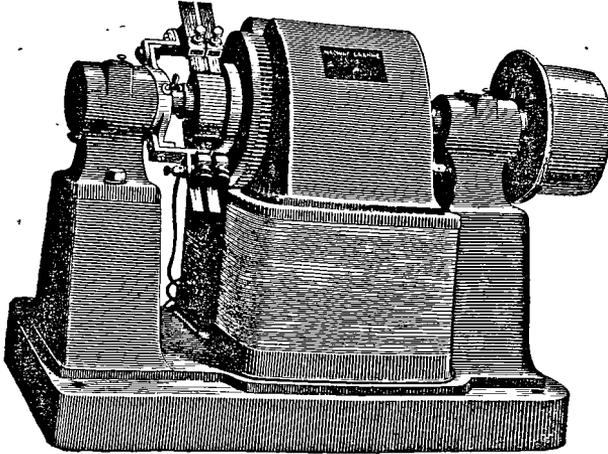


Fig. 85.

la construction est beaucoup simplifiée. Les inducteurs, cette fois,

sont à circuit magnétique unique, mais le flux est rendu symétrique, grâce à la forme particulière des épanouissements polaires. Des croissons métalliques, appliqués sur le noyau en fer, rattachent l'induit à l'axe.

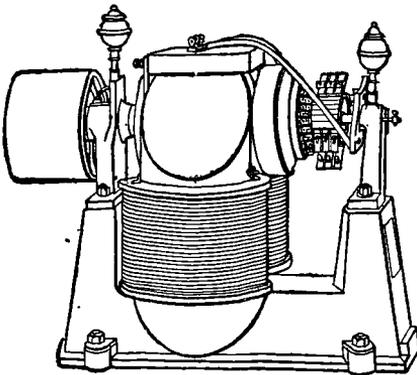


Fig. 86.

100. — Machine Siemens. — De même que la machine Gramme sert de type aux dynamos à induit en anneau, les machines

Siemens servent de type aux dynamos à induit en tambour.

L'inducteur de la machine Siemens type supérieur (fig. 86) est formé d'une seule masse de fonte sur laquelle sont glissées les bobines servant à l'excitation. Le collecteur, très robuste, comporte des touches en fer isolées les unes des autres par des inter-

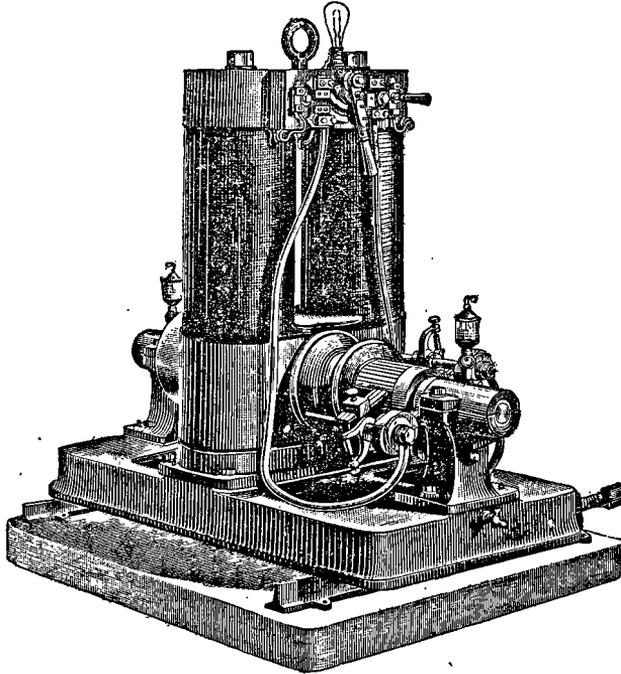


Fig. 87.

valles d'air. Le porte-balais est d'une remarquable simplicité et très solide. Des bornes spéciales permettent de modifier assez commodément les connexions des circuits de la machine.

101. — Machine Edison. — La machine Edison (fig. 87) est caractérisée par un induit à tambour placé à la partie inférieure d'inducteurs assez élevés. L'attraction magnétique qui s'exerce sur

l'induit, par suite de cette disposition, tend à détruire le poids de celui-ci et aide à assurer la stabilité de la machine. Les pièces polaires reposent sur un support évidé en zinc, de manière à éviter les dérivations magnétiques.

L'enroulement de l'induit diffère de l'enroulement Siemens en ce sens que le nombre total des sections est impair. On a vu (§ 78) que le résultat d'une pareille disposition est de ne laisser jamais, pendant la rotation, qu'une seule section en court circuit au lieu de deux, comme cela a lieu dans l'enroulement en tambour ordinaire.

102. — **Machine Rechniewski.** — La machine Rechniewski est caractérisée par un induit à tambour denté et par un inducteur dont le noyau est formé d'une série de tôles juxtaposées. Le résultat de ces deux dispositions est de donner à la machine une très grande légèreté spécifique pour une puissance donnée, et de réduire considérablement les courants de Foucault.

103. — **Machine Siemens à induit extérieur.** — Les phénomènes d'induction résultant simplement du déplacement *relatif* d'un conducteur et d'un champ, il importe peu, pour les produire, de déplacer les conducteurs dans le champ ou le champ lui-même par rapport aux conducteurs. On peut donc, dans une dynamo, rendre l'inducteur mobile et laisser l'induit fixe.

Une des machines à courant continu de ce genre les plus connues est la dynamo multipolaire Siemens (fig. 88).

L'induit de cette dynamo est un anneau fixe, peu large et d'un diamètre pouvant atteindre trois mètres. Il porte, en guise d'armature, une série de barreaux de cuivre placés sur champ et servant en même temps de lames au collecteur.

L'inducteur, mobile au centre de l'anneau, est de forme étoilée. Chacune des branches de l'étoile a une section rectangulaire et est montée sur un prisme central de fonte, fixé sur l'armature. Des

bras isolés partant d'une autre étoile centrale soutiennent l'anneau en porte à faux.

Les balais collecteurs sont montés sur un collier, également en

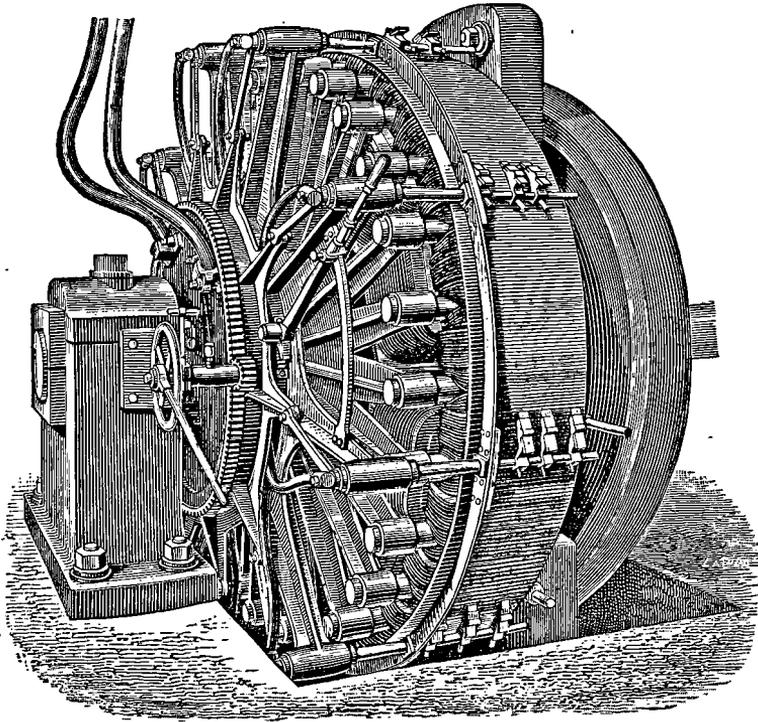


Fig. 88.

étoile, qui permet de les déplacer tous simultanément, à l'aide d'une vis sans fin engrenant avec une roue dentée.

L'avantage d'une telle machine réside dans la très grande surface de refroidissement de son induit et dans sa faible vitesse de rotation. En revanche, le prix en est élevé et la réparation difficile.

104. — Machine Desrozières. — La machine Desrozières possède un induit à disque. Chaque spire élémentaire de cet induit comporte deux éléments radiaux reliés par un élément courbe en forme de développante de cercle. La figure 89 représente une section composée de trois de ces spires. L'inducteur comprenant douze noyaux opposés deux par deux (fig. 90), trois sections sont à tout instant soumises à des inductions de même nature ; ces trois sections sont réunies en tension.

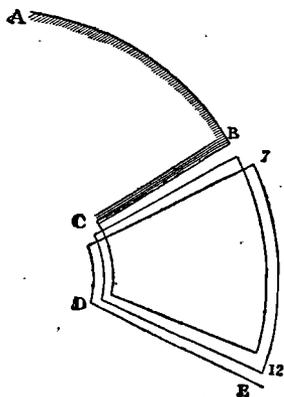


Fig. 89.

L'ossature de l'induit se compose de deux plateaux en carton, percés de trous correspondant aux extrémités des éléments radiaux des

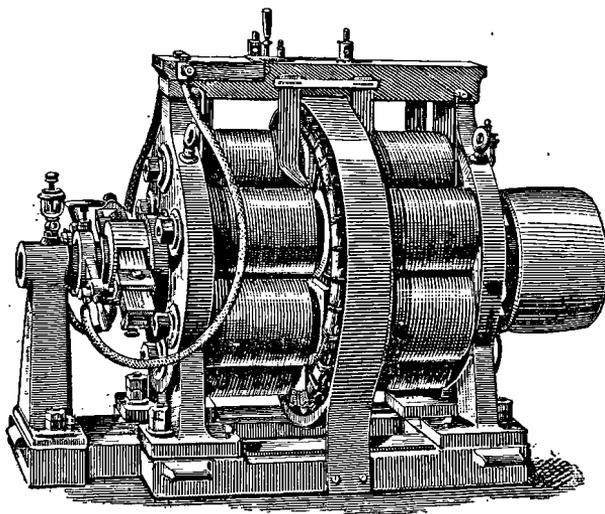


Fig. 90.

spires. L'une des faces de ces plateaux porte les éléments radiaux,

l'autre les éléments curvilignes de la spire. On accole les plateaux dos à dos, de façon que les spires se succèdent alternativement sur l'un et sur l'autre. Un disque de maillechort, de 3 millimètres d'épaisseur et convenablement coupé pour éviter les courants de Foucault, est placé entre eux et assure la rigidité de l'ensemble.

Les pôles de l'inducteur sont répartis sur deux flasques circulaires. Les pôles placés en regard sont de noms contraires.

La machine Desroziers est légère, marche à faible vitesse et possède un grand rendement spécifique. Comme la ventilation y est excellente, on peut donner une densité considérable au courant circulant dans l'induit. Ces avantages sont compensés par le coût de l'excitation, fort élevé par suite de la largeur de l'entrefer et par la complexité de construction de l'induit.

105. — Machine Brush. — L'induit de la machine Brush est à circuit ouvert. Le principe en a été donné § 68. En réalité, il ne comporte pas seulement quatre sections, mais huit ou douze; chaque ensemble des quatre sections placées aux extrémités de deux diamètres perpendiculaires entre eux doit, dans ce cas encore, être considéré comme constituant une machine séparée; un collecteur et deux balais lui correspondent.

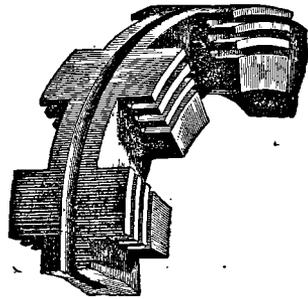


Fig. 91.

L'induit Brush a pour noyau un anneau de fer denté (fig. 91). Les inducteurs sont excités en série. Quelquefois les commutateurs et les bobines de l'induit sont groupés de telle sorte que le courant engendré par une bobine traverse d'abord le circuit inducteur seul, avant de pouvoir s'écouler dans le circuit général.

Les machines Brush sont un des types les plus connus de machines à très haute tension. On en a construit également à très

grand débit, en vue des applications métallurgiques. Elles sont le siège de réactions d'induit considérables et donnent un rendement assez faible (67 pour 100).

106. — Machine Thomson-Houston. — Les machines précédentes rentraient toutes dans l'une des catégories générales d'in-

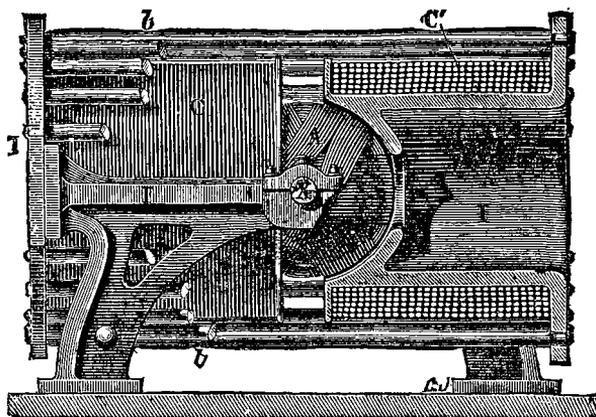


Fig. 92.

duits étudiées auparavant. Au contraire, la dynamo Thomson-Houston s'en écarte notablement et mérite pour cela une étude plus détaillée.

L'inducteur de cette machine (fig. 92) se compose de deux cylindres terminés par une calotte sphérique, à la surface desquels est enroulé le circuit d'excitation. Les bases de ces cylindres sont réunies par des tiges de fer équidistantes, servant à la fois de culasses et d'entretoises.

L'induit est de forme sphérique. Son noyau est formé par deux plateaux de fonte, arrondis et reliés par des barrettes de fer plat qui constituent la carcasse. L'ensemble est recouvert de papier laqué. On enroule sur lui trois bobines comportant une grande

longueur de fil, orientées à 120° et disposées de telle sorte que la distance moyenne de chacune au centre du noyau soit identique.

Quand l'induit tourne, des courants alternatifs sont engendrés dans ces bobines. Voyons comment ils sont redressés et recueillis par le collecteur.

Tout d'abord les trois bouts intérieurs des bobines sont reliés entre eux, et les trois bouts extérieurs à chacun des trois segments d'un collecteur circulaire. Supposons les balais de ce collecteur réduits à deux et leurs points de contact placés dans la ligne

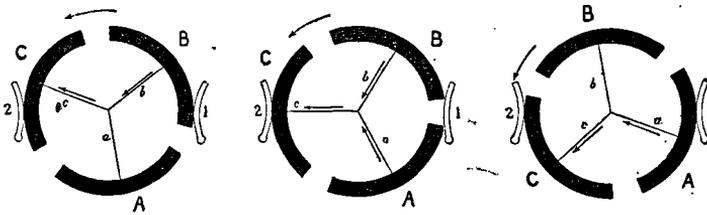


Fig. 93).

neutre. Trois positions successives et typiques peuvent être occupées par une bobine, pendant que la touche du collecteur qui lui correspond est en contact avec un balai (fig. 93).

Dans la première, la bobine A qui passe dans la zone neutre est isolée et retirée du circuit; les deux autres B et C sont groupées en tension.

Au moment où A approche du balai 1, il se produit un instant durant lequel le balai est en contact avec deux touches voisines du collecteur : A et B sont alors réunies en quantité et C en tension.

Enfin, le collecteur continuant à tourner, B pénètre à son tour dans la zone neutre, A et C sont associées en série.

En réalité, il y a deux balais positifs et deux balais négatifs réunis entre eux. Les balais ainsi associés sont, à débit normal, calés à un angle de 40° l'un de l'autre et placés symétriquement par rapport à la ligne neutre. Le but de ce dispositif est de dimi-

nuer la durée de l'isolement de la bobine traversant la zone neutre.

Lorsque le débit varie, il est nécessaire de modifier l'écartement des balais associés. Un relais intercalé sur le circuit principal commande ce déplacement.

Le courant obtenu dans la machine Thomson-Houston est continu, mais très variable. D'autre part, des étincelles nombreuses devraient se produire au collecteur par suite du petit nombre de ses lames. On évite cette production, grâce à un jet d'air qui est lancé par un petit ventilateur au moment précis où devrait partir l'étincelle, et qui souffle cette dernière.

Malgré l'originalité de sa construction, la machine Thomson-Houston doit être considérée comme une des bonnes machines à haute tension qui soient en usage.

V. — ALTERNATEURS.

Notions générales sur les courants alternatifs.

107. — Courants alternatifs. — On appelle courants alternatifs des courants variables et dont le sens est périodiquement renversé. Ils sont, en outre, dits périodiques lorsque leurs intensités successives se reproduisent à des intervalles de temps égaux.

Un moyen commode de représenter la variation de ces courants consiste à construire une courbe ayant pour ordonnées les intensités et pour abscisses les valeurs du temps correspondant à ces intensités. On convient, pour plus de commodité, de compter les intensités du courant comme positives, lorsque celui-ci est d'un certain sens, comme négatives, lorsqu'il est de sens inverse.

La figure 94 *a* représente les variations d'un courant périodique. La courbe est telle qu'une partie comprise entre deux points semblablement placés se reproduit indéfiniment. On désigne cette

partie sous le nom de *période*. Le nombre de périodes par seconde est appelé la *fréquence*.

On réserve plus particulièrement le nom de courants alternatifs à des courants dont la période se compose de deux demi-périodes égales et de sens contraires (fig. 94 *b*) ; si, de plus, la courbe représentative de la période est de forme sinusoïdale, le courant est dit sinusoïdal.

Nous avons vu (§ 66) qu'un induit élémentaire tournant dans le champ magnétique produit par deux pôles placés en regard est le siège d'une force électromotrice et fournit un courant dont les variations peuvent être représentées par une sinusoïde. Une machine dynamo-électrique dépourvue de commutateur est donc, à proprement parler, une génératrice de courants alternatifs sinusoïdaux.

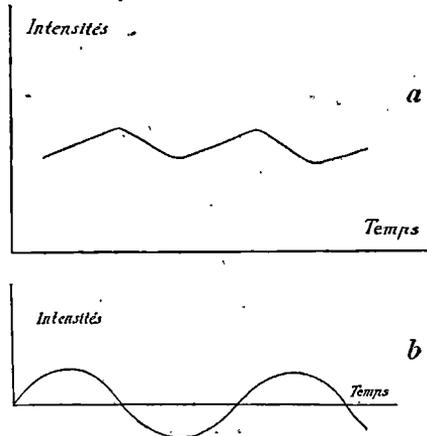


Fig. 94.

108. — *Intensité efficace*. — La variation continue de l'intensité et de la force électromotrice, dans le cas des courants alternatifs, fait que les définitions générales relatives à ces éléments présentent une complexité plus grande que dans le cas des courants continus.

Lorsqu'un courant alternatif parcourt un conducteur, on constate que celui-ci s'échauffe, comme s'il était traversé par un courant continu. On désigne sous le nom d'*intensité efficace* du courant alternatif l'intensité du courant continu qui, passant dans le même conducteur, y produirait le même échauffement.

Cette intensité efficace est, par suite, définie par la relation :

$$[1] \quad W = RI_{ef}^2,$$

ou W est la puissance thermique manifestée dans le conducteur, R la résistance du conducteur et I_{ef} l'intensité efficace cherchée (§ 10).

109. — **Potentiel efficace.** — Il est nécessaire, pour définir le potentiel efficace correspondant à cette intensité, de distinguer deux cas, suivant que le conducteur parcouru possède ou non une self-induction appréciable.

1° *Cas d'un conducteur sans self-induction.* — On appelle différence de potentiel efficace, dans le cas où un courant alternatif parcourt un conducteur sans self-induction, la différence de potentiel qui provoquerait le long de ce conducteur un courant continu d'intensité égale à l'intensité efficace du courant alternatif. Cette différence de potentiel efficace E_{ef} est, par suite, définie par la relation :

$$E_{ef} = RI_{ef},$$

ou R représente la résistance du conducteur et I_{ef} l'intensité efficace. Il résulte de cette relation que la loi d'Ohm est applicable, dans ce cas, aux éléments ainsi définis du courant alternatif.

En reportant dans l'équation [1] la valeur de RI_{ef} , on voit que la puissance thermique manifestée dans le conducteur peut alors s'écrire sous la forme :

$$[2] \quad W = E_{ef}I_{ef}.$$

2° *Cas d'un conducteur avec self-induction.* — Lorsque la résistance R est douée de self-induction, on constate que la puissance thermique manifestée est différente de celle qui résulterait des valeurs calculées d'après la relation précédente. Tout se passe comme si la résistance *apparente* du conducteur était devenue

supérieure à sa résistance ohmique, et la relation qui définit le potentiel efficace est alors :

$$E_{ef} = R' I_{ef},$$

R' désignant une valeur plus grande que R.

Un conducteur doué de self-induction présente donc au passage des courants alternatifs une résistance plus grande que s'il s'agissait de courants continus; cette augmentation de résistance est d'ailleurs d'autant plus considérable que la self-induction du conducteur et la fréquence du courant alternatif ont des valeurs plus élevées.

Une analogie permet d'analyser, d'une manière quantitative tout au moins, ce phénomène.

Nous avons vu déjà que la self-induction peut être considérée comme une véritable inertie électrique.

Imaginons un volant tournant de droite à gauche, par exemple; supposons que la force qui entraîne ce volant diminue progressivement, s'annule et, croissant de nouveau en sens inverse, tende à ramener le volant de gauche à droite. Celui-ci n'obéira pas instantanément aux impulsions reçues et continuera d'abord pendant un certain temps à tourner dans sa direction primitive. Sa vitesse s'affaiblira progressivement, et ne deviendra nulle, pour changer de sens à son tour, qu'après que la force agissante aura déjà passé par un certain nombre de nouvelles valeurs croissantes. En d'autres termes, la vitesse du volant présente les mêmes inversions que la force agissante, mais avec un certain retard. De même, quand une force électromotrice alternative agit sur un circuit doué de self-induction, les courants produits présentent des alternances correspondant à celles de la force électromotrice, mais toujours avec *un certain retard*.

Remarquons, en second lieu, que la vitesse la plus grande du volant sera moindre que celle qui correspondrait à une force constante égale à la valeur maxima de la force agissante, car, grâce au retard indiqué plus haut, avant que le volant ne puisse

atteindre cette vitesse, la force a déjà commencé de décroître. De même, le courant efficace circulant dans un conducteur doué de self-induction est toujours inférieur à celui qui correspondrait à la force électromotrice efficace réelle, ou, ce qui revient au même, les phénomènes se passent comme si la résistance électrique du conducteur s'était accrue.

Généralités sur les alternateurs.

110. — Notions générales. — On a vu qu'en dehors des machines unipolaires, toutes les machines à courant continu sont en réalité des machines à courants redressés. Il suffit donc de retrancher, dans celles-ci, le commutateur chargé d'opérer ce redressement, pour qu'elles deviennent des alternateurs.

Tout ce qui a été dit pour les machines à courants redressés peut dès lors être étendu aux alternateurs, sous cette réserve que les organes de commutation auront disparu et que les connexions des sections seront modifiées en conséquence.

Il en résulte en particulier qu'un alternateur se compose toujours d'un inducteur et d'un induit en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre, qu'il peut être bipolaire ou multipolaire, que son induit peut affecter enfin l'une des trois formes typiques : anneau, tambour ou disque.

111. — Alternateurs multipolaires. — Sauf le cas d'applications d'ordre spécial, on n'emploie pas en pratique les alternateurs bipolaires. On sait, en effet, que, dans une machine bipolaire, le courant induit garde le même sens pendant chaque demi-révolution. Le nombre des périodes à la seconde de ce courant est par suite égal au nombre de tours de l'induit dans le même temps. Il faudrait donc donner à ce dernier des vitesses excessives pour atteindre les fréquences usitées industriellement, vitesses qui varient entre 40 et 100 périodes à la seconde.

Il n'en est pas de même avec les alternateurs multipolaires. La figure 95, relative à un alternateur à anneau, montre, par exemple, que chaque section passe successivement dans des champs orientés en sens inverse; en appliquant la règle de Fleming, on trouve que le sens de la force électromotrice induite dans une section change deux fois, pendant que celle-ci passe d'un pôle nord au pôle nord suivant. Le nombre des périodes par tour n'est plus seulement l'unité, comme dans le cas des alternateurs bipolaires, mais le nombre même des paires de pôles disposées autour de l'anneau.

112. — Groupement des sections dans les alternateurs multipolaires. — Supposons qu'on dispose, par exemple sur un induit à anneau d'alternateur multipolaire, autant de sections qu'il y a de pôles inducteurs. Il est possible, comme dans le cas des induits des dynamos à courant continu, d'associer ces sections entre elles, soit en série, soit en quantité.

La règle de Fleming permet de se rendre compte que deux sections consécutives, dans un induit ainsi constitué, sont le siège de forces électromotrices orientées en sens inverse. On devra tenir compte de ce fait, en opérant les connexions.

En particulier, s'il s'agit d'associer deux sections consécutives en série, il sera nécessaire, soit d'enrouler ces sections en sens inverse (fig. 95), soit encore, si on a laissé les enroulements de même sens, de réunir les extrémités des bobines, comme l'indique la figure 96.

Dans un assez grand nombre de machines, on est conduit à

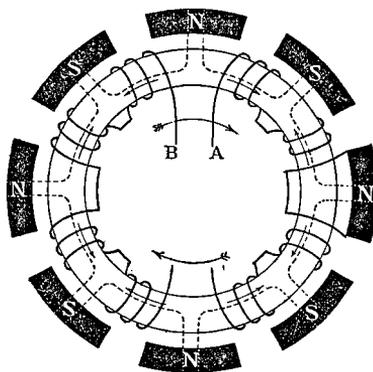


Fig. 95.

grouper en série les sections placées sur une même moitié de l'induit et à réunir en quantité les deux groupes ainsi formés. La figure 107 en donne un exemple (alternateur Ferranti).

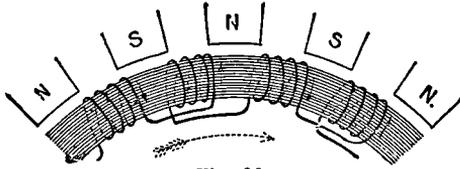


Fig. 96.

413. — Alternateurs polyphasés. — Supposons que l'on répartisse également, sur un induit d'alternateur multipolaire, non plus un nombre de sections égal à celui des pôles, mais un nombre trois fois plus grand.

Dès lors, deux pôles consécutifs comprennent toujours entre eux trois sections de l'induit (fig. 97), que nous désignerons pour plus de commodité sous le nom de section A, section B, section C. Il est clair que l'on peut associer ensemble toutes les sections A comme dans le cas d'un alternateur ordinaire et faire aboutir les extrémités de ce premier circuit à un collecteur spécial. De même pour les sections B et les sections C. La machine ainsi constituée est en réalité formée de trois alternateurs distincts, tournant dans le même champ, et dont les induits, semblables et montés sur le même arbre, sont décalés les uns par rapport aux autres du tiers de l'angle séparant deux bobines du même système.

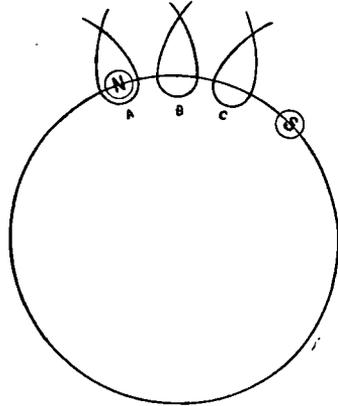


Fig. 97.

Les trois courants fournis par les circuits A, B, et C jouissent de propriétés particulières.

Il est évident, tout d'abord, que leurs formes seront les mêmes et qu'ils auront même période.

Remarquons, en second lieu, qu'une des sections B ne vient prendre, par rapport aux pôles inducteurs, la position occupée par la section A, qui la précède immédiatement, qu'après un temps toujours le même et égal précisément à celui que met l'arbre de l'induit à tourner de l'angle séparant les deux sections A et B. Les courants B passent donc par les mêmes valeurs que les courants A, mais avec un certain retard constant; ce retard est appelé *retard de phase*, et l'on dit que les courants B sont décalés par rapport aux courants A. De même les courants C sont décalés par rapport aux courants A et B.

Les deux bobines A qui comprennent les bobines B et C considérées, étant le siège de forces électromotrices identiques et différant par suite d'une période entière, on en conclut aisément par raison de symétrie que les trois courants sont décalés d'un tiers de période les uns par rapport aux autres; le courbes représentatives de ces courants seraient celles représentées figure 98.

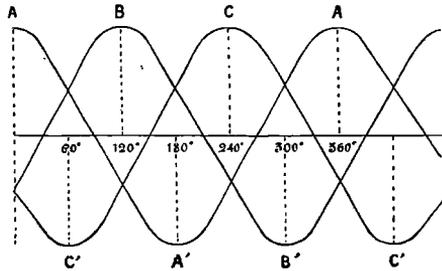


Fig. 98.

Les alternateurs ainsi constitués sont dits à *courants polyphasés*.

Rien n'empêcherait de disposer seulement deux sections ou quatre, au lieu de trois, entre les pôles consécutifs. On obtient alors deux ou quatre courants décalés d'une demi-période ou d'un quart de période.

Il est utile de bien se représenter ce que sont ces courants alternatifs décalés les uns par rapport aux autres. Une comparaison classique permet de s'en faire une idée assez exacte. Imaginons deux pendules identiques et également écartés de leur position d'équilibre. Abandonnons l'un de ces pendules seul,

puis le second pendule au moment où le premier, après une demi-oscillation, repasse par la verticale. Les deux pendules présenteront alors une différence de phase d'un quart de période.

114. — Captation des courants. — La captation du courant est extrêmement simple dans les alternateurs. Il suffit de relier chacune des extrémités du circuit de l'induit à une bague montée sur l'axe de rotation et isolée de cet axe. Deux balais frottant sur ces bagues recueilleront le courant (fig. 61).

Lorsqu'il est fait usage de machines à très haut voltage, il est essentiel que les ouvriers ne puissent en aucun cas approcher des balais ; il est d'usage d'enfermer alors le collecteur dans une cage de verre.

115. — Excitation des inducteurs. — De même que dans les dynamos à courant continu, les inducteurs des alternateurs sont le plus souvent constitués par des électro-aimants. On peut recourir, pour exciter ces électros, au courant continu fourni par une petite dynamo spéciale qui est parfois montée sur le même axe que l'alternateur. Ce mode d'excitation indépendante est très employé.

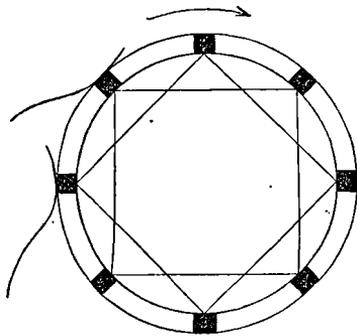


Fig. 99.

On peut aussi faire usage de l'auto-excitation, en captant une partie du courant de l'alternateur et en l'envoyant dans les électros après l'avoir préalablement redressé à l'aide d'un commutateur facile à imaginer.

En supposant, par exemple, qu'il s'agisse d'une machine à huit pôles, ce commutateur comportera huit lames montées comme celles d'un collecteur de dynamo à courant continu ; quatre de ces lames, espacées de deux en deux,

sont reliées entre elles et à une extrémité du circuit inducteur. Les quatre autres, réunies de même, communiquent avec l'autre extrémité du circuit inducteur. On voit sans peine (fig. 99) que les courants envoyés dans l'inducteur à travers cet appareil sont toujours redressés.

La force électromotrice des alternateurs se règle en agissant sur l'excitation à l'aide de résistances variables, introduites dans le circuit de celle-ci.

On peut aussi régler le débit des alternateurs en mettant sur le circuit extérieur une résistance à self-induction variable.

Lorsque l'excitation de l'alternateur s'obtient à l'aide d'une machine auxiliaire, il est économique d'opérer ces réglages en agissant directement sur l'excitation de cette dernière.

116. — Pertes dans les alternateurs. — Les principales pertes dans les alternateurs proviennent des courants de Foucault, de l'hystérésis et des réactions d'induit. Les deux dernières sont surtout considérables et très supérieures à celles qui se produisent dans les machines à courant continu.

117. — Couplage des alternateurs. — Le couplage des alternateurs est à priori une opération délicate. On peut en effet considérer les alternateurs comme des piles dont les pôles seraient inversés un grand nombre de fois à la seconde. Ils possèdent à chaque instant, il est vrai, des pôles bien déterminés, mais encore faut-il choisir le moment de l'accouplement, de telle sorte que ces pôles bien déterminés soient précisément ceux dont on a besoin. En second lieu, il est évident que, pendant toute la durée de l'accouplement, l'inversion des pôles dans les machines accouplées devra avoir lieu simultanément et suivant la même loi. Deux conditions distinctes doivent donc être réalisées, relatives, l'une au choix du moment où s'opère la liaison, c'est-à-dire à la mise en marche; l'autre, à la concordance des machines en marche.

Pratiquement, on n'accouple pas en tension les alternateurs

On constate en effet, dans ce cas, que s'il existe entre eux la plus légère différence de phase (différence de phase qui peut provenir de différences de vitesses, etc.), cette différence va toujours en s'accroissant. Le phénomène se poursuit jusqu'à ce que les deux machines se soient mises exactement en opposition. La condition relative à la concordance de marche n'est donc pas réalisable, à moins toutefois que les machines couplées ne soient montées sur un même axe.

S'il s'agit d'un accouplement en quantité, la condition de mise en marche est naturellement la suivante : on ne doit réunir, deux à deux, les pôles des alternateurs qu'au moment où ces pôles seront de même nom, sinon les machines accouplées travailleraient en court circuit.

Divers moyens permettent de connaître ce moment.

L'un des plus fréquemment employés est le suivant :

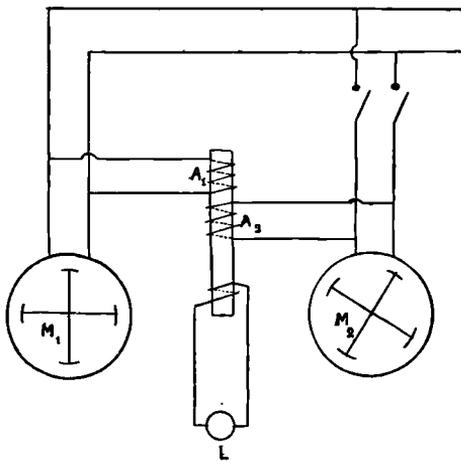


Fig. 100.

Sur les bornes de chacun des alternateurs M_1 et M_2 à accoupler sont prises deux dérivations (fig. 100), aboutissant à deux circuits distincts A_1 et A_2 d'une bobine d'induction à noyau de fer. Un troisième circuit induit enroulé sur la même bobine est fermé sur une lampe L . Supposons que l'alternateur M_1 soit déjà sur le circuit général. La lampe L se met à briller d'une façon continue,

sous l'action des courants induits, produits par le passage dans A_1 du courant dérivé de M_1 . Mettons en marche l'alternateur M_2 . S'il n'est pas en concordance avec M_1 , les courants induits par lui dans

Le circuit de la lampe L contrarieront en partie les précédents ; la lampe s'éteint dès lors des fluctuations lumineuses périodiques, de plus en plus lentes, analogues aux battements de deux diapasons qui ne seraient pas à l'unisson. Lorsque les alternateurs sont exactement en opposition, elle s'éteint complètement. On choisit cet instant pour relier M_2 au circuit général.

Une autre méthode ingénieuse et pratique est due à MM. Ayrton et Mather.

Le premier alternateur M_1 étant comme précédemment relié au circuit général, on relie l'une de ses bornes A à l'une des bornes a de l'alternateur M_2 à coupler avec lui, par l'intermédiaire d'une résistance. Les autres bornes B et b des alternateurs sont mises en communication avec un électroscope à feuille d'étain ou tout autre instrument capable d'indiquer électrostatiquement des différences de potentiel élevées. En particulier, s'il s'agit d'un électroscope, la divergence de ses feuilles manifestera dans ces conditions la différence de potentiel entre les bornes qui lui sont reliées, et, par suite, la différence de phase des alternateurs. Au début, les feuilles s'ouvrent et se ferment avec rapidité, puis finalement restent collées. A cet instant, les deux machines sont en concordance, et l'on peut effectuer le couplage.

La première condition de mise en marche étant réalisée, il reste à obtenir la seconde, c'est-à-dire la concordance de marche. Tous les alternateurs ne sont pas propres à fonctionner ensemble. Le plus généralement, la concordance s'obtient d'elle-même, grâce au jeu des réactions électriques des machines associées. L'étude de ces réactions a été faite par M. Blondel ; elle est trop complexe pour pouvoir être abordée dans cet ouvrage.

Description des principaux alternateurs.

118. — **Alternateurs à induit en anneau.** — Parmi les alternateurs à induit en anneau, nous citerons seulement l'alternateur Gramme et l'alternateur Kapp.

L'alternateur Gramme, qui est d'invention ancienne, comporte un induit fixe et un inducteur mobile. L'induit fixe (fig. 101), en forme d'anneau, contient un certain nombre de sections (deux ou trois fois autant qu'il y a de pôles inducteurs). Ces sections sont réunies entre elles à la façon

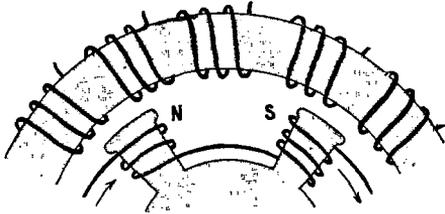


Fig. 101

a été décrite au § 113, de manière à constituer deux ou trois

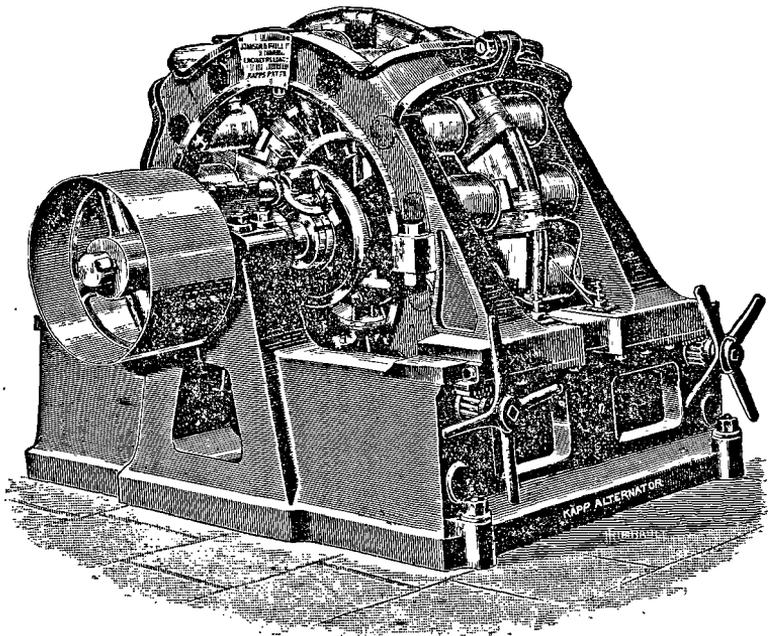


Fig. 102.

circuits distincts, fournissant séparément des courants alternatifs

décclés les uns par rapport aux autres. L'inducteur mobile est analogue à un pignon ; chacune de ses saillies porte un enroulement parcouru par un courant continu qui est amené par l'intermédiaire de balais pressant sur deux bagues fixées sur l'axe de rotation.

Dans l'alternateur Kapp, au contraire (fig. 102), l'induit est mobile et l'inducteur est fixe. Ce dernier est formé par deux couronnes portant chacune douze pôles alternativement nord et sud. Les pôles opposés sont de même nature, et les lignes de force vont par suite d'un pôle au pôle voisin, en étant déviées latéralement à travers le noyau de l'induit.

119. — Alternateurs à induit en tambour. — La figure 103 donne le schéma théorique de l'alternateur Westinghouse, très employé aux États-Unis. L'inducteur fixe, en forme de couronne circulaire, porte une série de projections intérieures sur lesquelles sont enroulées les bobines excitatrices. L'induit mobile se compose d'un tambour obtenu en empilant des disques isolés les uns des autres et serrés entre deux butées. Il porte autant de sections que de pôles. Les extrémités de celles-ci sont rabattues et fixées sur les bases du tambour.

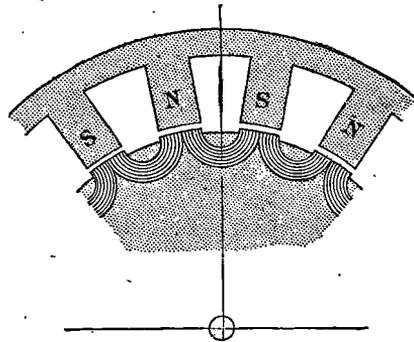


Fig. 103.

Dans l'alternateur Ganz Zipernowski (fig. 104), l'induit en tambour est fixe et l'inducteur mobile. Ce dernier est d'une forme assez voisine de celle de l'inducteur de l'alternateur Gramme. Les bobines de l'induit sont glissées sur une série de projections intérieures au tambour. On remarquera la forme particulièrement découpée des pièces, forme qui a été combinée de manière à diminuer

autant que possible la production des courants de Foucault.

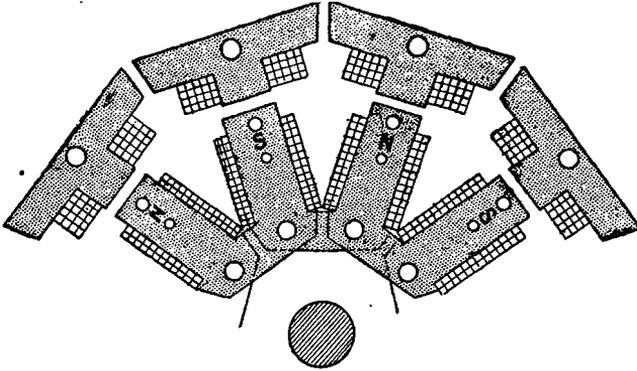
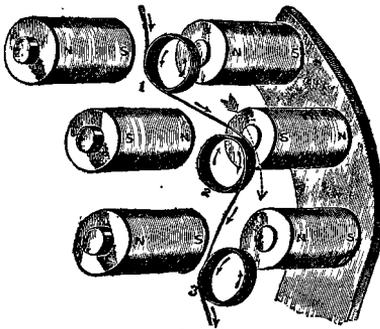


Fig. 104.

Cet alternateur est auto-exciteur, et muni dans ce but d'un commutateur redresseur semblable à celui qui a été décrit au § 115.

120. — Alternateurs à disque. — Le type d'alternateur à disque est l'un des plus fréquemment employés. La figure 105 en



[Fig. 105.

montre la disposition théorique. Une série d'électro-aimants inducteurs sont disposés sur des couronnes circulaires et excités par un courant continu, de telle sorte que les pôles en regard soient alternativement de noms contraires. L'induit porte autant de bobines qu'il y a de paires de pôles inducteurs. Ces bobines sont réparties sur une couronne circulaire mobile.

On se rendra compte aisément que, lorsque l'induit tourne, la force électromotrice induite

dans chacune de ses bobines change de sens au moment où ces bobines passent devant les pôles inducteurs. Elle est donc de sens contraire dans deux bobines consécutives.

On peut relier ces bobines, soit en série, soit en quantité. Rien n'empêche non plus d'intercaler sur l'induit deux ou trois fois autant de bobines qu'il y a de paires de pôles inducteurs et de les associer de manière à fournir des courants polyphasés.

Il est utile de remarquer qu'à l'inverse de ce qui se passe

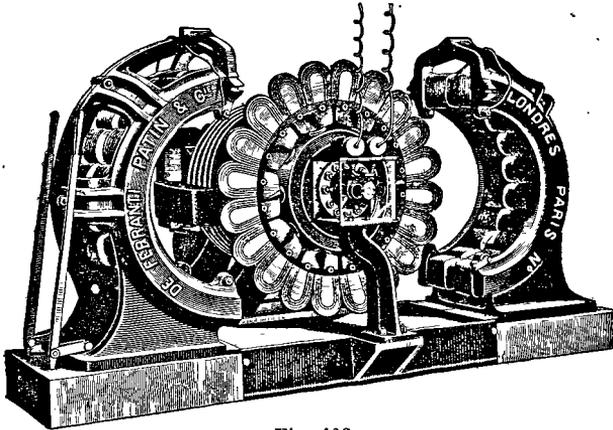


Fig. 106.

pour les machines à disque à courant continu, les noyaux des bobines de l'induit sont fréquemment en fer doux.

L'alternateur Wilde-Siemens reproduit identiquement les dispositions précédentes. Il est donc inutile d'insister sur sa description. Il n'en est pas de même de l'alternateur Ferranti, actuellement en usage dans un grand nombre d'installations d'éclairage.

Dans cet alternateur (fig. 106), l'inducteur est formé de quatre demi-couronnes réunies deux à deux et qui peuvent s'écarter, de manière à laisser l'induit à découvert, si l'on veut procéder, soit à un nettoyage, soit à des réparations. La distance entre les pôles en regard est d'ailleurs très faible, deux centimètres environ.

Les bobines de l'induit (fig. 108), sont au nombre de vingt. Chacune est formée d'un ruban de cuivre légèrement plissé et enroulé autour d'un noyau en laiton, avec interposition de fibre vulcanisée entre les spires. Le bout intérieur de la bobine est en communication avec ce noyau. Deux bobines consécutives sont associées sur un même porte-bobine qui met électriquement en communication

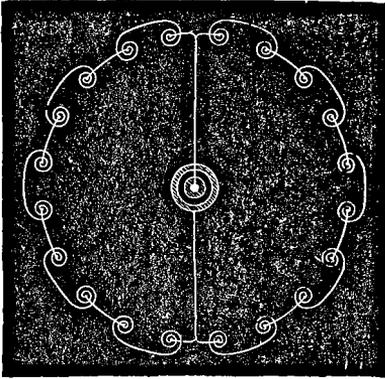


Fig. 107.

leurs bouts intérieurs. Un morceau de fibre isole l'un de l'autre leurs rubans extérieurs. Ces rubans extérieurs sont au contraire en communication avec ceux des bobines portées par le porte-bobine immédiatement voisin. L'ensemble des communications est représenté figure 107. On voit que dix bobines sont associées de chaque côté en tension et que ces deux groupes sont réunis en quantité. La dynamo Ferranti étant

destinée à la production de potentiels très élevés, le collecteur est revêtu d'une cage de verre.

On doit rapprocher de cet alternateur la dynamo-volant, système Patin, qui comporte des éléments semblables, mais qui en diffère par ce fait que l'induit est fixe et l'inducteur mobile.

Il y a grand intérêt à supprimer les courroies de transmission dans les installations électriques. On gagne ainsi une place considérable dans l'usine et l'on évite des échauffements de palier, des glissements, etc., accidents qui, tous, se répercutent plus ou moins sur la régularité de la marche et le prix de revient.

M. Patin a imaginé de disposer à la surface d'un cylindre une série de bobines à peu près identiques aux bobines Ferranti. Deux anneaux concentriques et pourvus d'inducteurs rayonnants embrassent ce cylindre et sont montés sur l'axe de la machine à

vapeur de manière à lui servir de volant. Ils enferment les bobines du cylindre dans un entrefer très étroit. Des manivelles permettent, d'autre part, de sortir l'induit du système inducteur et de le visiter commodément.

Il convient de citer enfin l'alternateur Mordey. La forme de son inducteur et les conditions de son fonctionnement méritent en effet une mention particulière.

Il est formé par une bobine unique (fig. 109), portant un certain nombre de pôles recourbés en opposition les uns avec les autres et ne laissant entre eux qu'un entrefer de 17 millimètres environ. Grâce à ce dispositif et à l'inverse de ce qui se passe dans les autres alternateurs à disque, les deux pôles en regard sont toujours de nom contraire. Il n'y a plus renversement du champ magnétique à travers les bobines

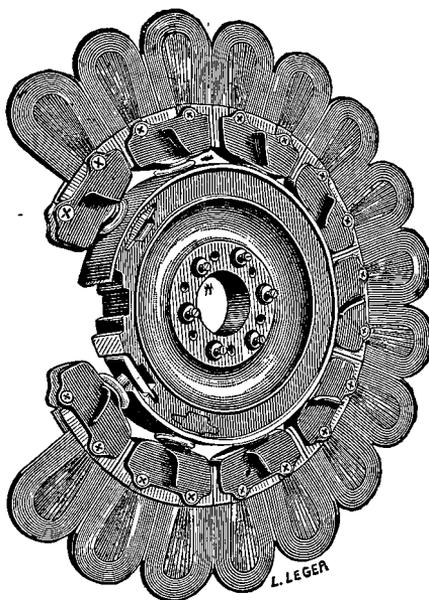


Fig. 108.

induites, mais le flux de force qui traverse l'une d'elles varie simplement de zéro à un certain maximum et inversement.

L'induit, qui est fixe, se compose d'une série de bobines enroulées sur des noyaux en métal non magnétique et supportées par deux carcasses circulaires rigides. Sa résistance est de 2 ohms seulement. Contrairement à la plupart des alternateurs, l'alternateur Mordey ne donne lieu qu'à une très faible réaction d'induit.

Les inducteurs à bobine unique, tels que celui de l'alternateur Mordey, tendent à s'introduire aujourd'hui dans la pratique,

par suite de la grande économie d'excitation qu'ils permettent de réaliser.

Ils présentent, en outre, un autre avantage précieux. On peut,

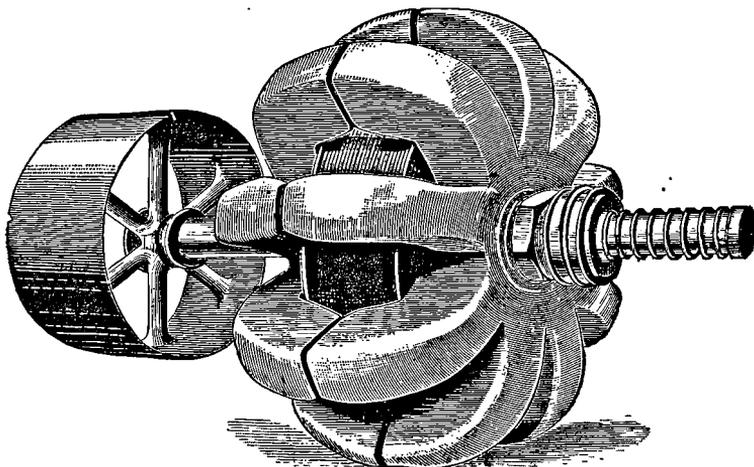


Fig. 109.

en effet, laisser fixe la bobine unique servant à l'excitation de l'inducteur et se contenter de faire tourner le noyau magnétique

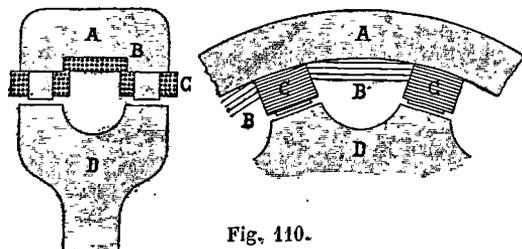


Fig. 110.

avec ses projections polaires. On réalise ainsi des alternateurs dont tous les circuits électriques sont immobiles.

Tel est le cas, par exemple, dans l'alternateur construit

par l'*Allgemeine Elektrizität Gesellschaft*, dont on a représenté figure 110 un croquis schématique.

Cet alternateur comprend une poulie creuse A à l'intérieur

de laquelle est enroulé le circuit inducteur B. Les joues de cette poulie sont dentées. Chacune de ses dents porte l'une des bobines induites C. Une couronne intérieure D, armée également de deux séries de dents, constitue la seule partie mobile de la machine et ferme le circuit magnétique.

Les variations du flux sont dès lors produites par la variation de la perméabilité de ce circuit magnétique, résultant elle-même du mouvement de la couronne.

QUATRIÈME PARTIE

SOURCES PHYSIOLOGIQUES D'ÉLECTRICITÉ

121. — Les êtres vivants sont des producteurs d'électricité.

On connaît l'expérience de Galvani, qui mit pour la première fois ce fait en évidence, en même temps qu'elle ouvrit la voie à l'étude de l'électricité dynamique. Recherchant l'action de l'électricité sur les êtres vivants, Galvani avait attaché une grenouille à la rampe d'un balcon. Cette grenouille avait été dépouillée et un fil de cuivre passé sous les nerfs qui émergent de la moelle épinière pour se rendre aux muscles des deux jambes. La grenouille était suspendue par deux fils de cuivre passés sous les nerfs lombaires. Chaque fois que la patte de l'animal venait en contact avec le fer du balcon, ses membres se raidissaient. Galvani en conclut que les muscles étaient une source d'électricité.

Cette conclusion, très discutée en son temps, a été reconnue exacte.

On vérifie aisément que la fibre musculaire possède une force électromotrice sensiblement égale à 0^v,4.

La tension électrique est répartie d'une façon particulière à la surface d'un muscle ; la partie extérieure fait fonction de surface positive, la partie interne de surface négative. Étant donné, de plus, un muscle déterminé, si l'on relie à l'une des bornes d'un galvanomètre le centre de la section de ce muscle, et à l'autre borne un point de sa surface latérale, on constate que le courant produit

est d'autant plus intense que la prise de contact sur la surface latérale est plus éloignée de l'autre prise.

Des phénomènes de même nature, quoique moins intenses, se produisent dans les filets nerveux.

Matteucci a enfin constaté dans les êtres vivants la présence de courants instantanés manifestés chaque fois qu'un nerf ou un muscle entre en fonction.

L'origine de ces phénomènes demeure obscure. On allègue aujourd'hui, et sans qu'on puisse d'ailleurs considérer cette explication comme suffisante, que les différentes substances entrant dans la composition du muscle s'oxydent sous l'influence des modifications nutritives et que ces oxydations sont accompagnées de phénomènes électriques.

En dehors de ces manifestations indépendantes de la volonté des êtres qui en sont le siège, il en est d'autres extrêmement intenses, spéciales à certains individus, et faisant, en quelque sorte, partie des fonctions conscientes.

C'est ainsi que les poissons du genre torpille ou *moringrus*, les gymnotes et les silures sont pourvus d'organes volumineux, susceptibles de fournir à volonté de violentes décharges électriques. M. Lippmann a montré expérimentalement que ces décharges étaient dues à une déformation volontaire de la matière protoplasmique et résultaient d'une transformation directe de mouvement mécanique en mouvement électrique.

CINQUIÈME PARTIE

TRANSFORMATEURS

122. — Définition des transformateurs. — Nous avons passé successivement en revue les principales sources d'électricité dont l'origine peut être déterminée. Il en existe d'autres encore, et non des moindres, qu'on ne saurait faire rentrer avec certitude dans l'une quelconque des catégories précédentes. Telle est, par exemple, l'électricité atmosphérique. Nous ne nous y arrêterons pas, cette étude ne présentant pas actuellement d'intérêt au point de vue des applications industrielles de l'électricité.

On sait que la puissance électrique dépend de deux facteurs, la tension e et l'intensité i du courant (§ 41).

$$P = ei.$$

Il importe maintenant de modifier à volonté les deux termes e et i , de manière à pouvoir toujours utiliser cette puissance dans les conditions les plus avantageuses.

S'agit-il, par exemple, de transporter de l'énergie électrique à une certaine distance, on doit évidemment chercher à diminuer autant que possible les pertes résultant du transport lui-même. La principale de ces pertes, sous forme de chaleur, est évaluée par le produit Ri^2 , i étant l'intensité du courant de circulation et R la résistance du circuit de transport (§ 10). On doit donc s'attacher à réduire, soit la résistance R en accroissant le poids du cuivre, ce qui est un procédé coûteux, soit l'intensité du courant; et, dans ce

dernier cas, pour disposer d'une puissance suffisante, il est nécessaire d'accroître considérablement la tension.

S'agit-il, au contraire, d'actionner un récepteur à l'extrémité du circuit de transport, il n'est pas utile et il peut même être dangereux de faire usage de courants à tension élevée. On a intérêt, cette fois, à employer des courants de grande intensité et de faible tension.

On appelle *transformateur* tout appareil susceptible de modifier en sens inverse les deux facteurs de la puissance électrique, c'est-à-dire de transformer un courant de haute tension et de faible intensité en un autre de faible tension et de grande intensité, ou inversement, la tension e' et l'intensité i' du second courant étant d'ailleurs reliées à celles e et i du premier, par cette condition que la puissance électrique demeure identique :

$$P = ei = e'i'.$$

Les transformateurs sont très différents suivant qu'il s'agit de transformer des courants alternatifs ou des courants continus. Étudions donc successivement ces deux cas.

123. — Transformateurs à courants alternatifs. — Un transformateur à courants alternatifs se compose d'un noyau de fer sur lequel sont enroulés deux circuits distincts, l'un appelé *circuit primaire* ou *inducteur*, l'autre, *circuit secondaire* ou *induit*.

Supposons que l'on fasse passer dans le circuit primaire d'un appareil de ce genre un courant variable.

Au passage de ce courant correspond la production, dans le noyau, d'un flux d'induction variable lui aussi et proportionnel au nombre des tours du circuit primaire (§ 54). Inversement, ce flux d'induction réagit sur le circuit secondaire, pour y provoquer la production d'une force électromotrice d'induction proportionnelle au nombre des tours de ce circuit, et, si celui-ci est fermé, le passage d'un courant induit de sens inverse à celui du courant inducteur.

Il résulte, en premier lieu, de cette disposition qu'en faisant

varier le nombre des tours de chacun des circuits primaire et secondaire, on fait également varier dans le même sens les forces électromotrices induites dans chacun d'eux. En particulier, la tension sera plus ou moins grande dans le circuit secondaire, suivant que le nombre des tours y sera plus ou moins considérable.

En second lieu, chaque fois que le courant primaire change d'intensité ou de direction, il se développe dans le secondaire un courant dont l'intensité et le sens dépendent de ces variations. Si le circuit primaire est mis en communication avec un circuit à courants alternatifs, le circuit secondaire est aussi le siège de courants alternatifs de même période.

Il convient de remarquer qu'à son tour le courant induit dans le circuit secondaire réagit sur le noyau et donne naissance à un flux d'induction tendant à détruire en partie celui qui est dû au circuit primaire. Le flux résultant est donc moindre que si le circuit secondaire demeurait ouvert. Comme on a tout intérêt à donner à ce flux la valeur la plus grande possible, il convient, par suite, de donner au circuit magnétique la résistance la plus faible possible. On y parvient le plus souvent en faisant usage de noyaux fermés sur eux-mêmes.

La diminution du flux, lorsque le circuit secondaire est fermé, a pour conséquence de donner aux deux circuits, dans ce cas, une self-induction apparente moindre. Ce résultat, très important, permet d'expliquer comment un transformateur règle, suivant les besoins et pour ainsi dire de lui-même, l'intensité du courant primaire qui lui est fourni. Sans entrer dans les détails de cette explication, on voit, par exemple, que dans le cas limite où le circuit secondaire est ouvert et où par suite le transformateur n'a pas de travail à fournir, la self-induction du primaire possède sa valeur normale et oppose au passage du courant une résistance suffisante pour en diminuer très notablement l'intensité.

124. — Bobine de Rhumkorff. — Le transformateur à courants alternatifs le plus anciennement connu est la bobine de

Rhumkorff; il a pour but de transformer les courants de pile à faible tension en courants à haute tension.

La bobine de Rhumkorff comporte, comme on le sait, un noyau ouvert et constitué par un faisceau de fils de fer. La bobine primaire est enroulée la première sur ce noyau; elle ne comprend qu'une ou un très petit nombre de couches de gros fil. La bobine secondaire, formée au contraire d'un très grand nombre de spires à fil fin, est enroulée sur la précédente. Comme elle est le siège de forces électromotrices élevées, il est d'usage de séparer les spires qui sont à des potentiels très différents, de manière à éviter les ruptures accidentelles d'isolants. On y parvient en divisant la bobine secondaire en une série de bobines plates juxtaposées et séparées les unes des autres par des cloisons en substance isolante. On peut aussi la plonger dans un bain d'huile qui constitue un milieu beaucoup plus résistant que l'air.

Lorsque la bobine de Rhumkorff est alimentée par le courant d'une pile, il est nécessaire de produire mécaniquement dans celui-ci les variations de nature à faire naître dans le secondaire des courants induits. On utilise dans ce but les alternatives d'aimantation et de désaimantation du noyau, qui attire et abandonne tour à tour un ressort placé vis-à-vis de lui. Chaque attraction du ressort entraîne la rupture du circuit primaire. Les étincelles produites au moment de cette rupture sont d'ailleurs atténuées en interposant, entre le contact et l'interrupteur, un condensateur de capacité convenablement choisie.

Dans un tel mode d'excitation, la fermeture et l'ouverture du circuit primaire donnent lieu, chacune, à un courant induit de sens différent. La fréquence des courants induits est donc double de celle du courant inducteur. On a utilisé, depuis, cette propriété pour la production de courants de très haute fréquence.

La bobine de Rhumkorff est encore souvent usitée dans les applications médicales. Afin de graduer les résultats obtenus, on rend mobile la bobine induite; le nombre des spires soumises à l'action inductrice peut ainsi varier à volonté.

125. — Transformateurs industriels à courants alternatifs. — Dans la plupart des applications industrielles, on se propose de résoudre le problème inverse du précédent, c'est-à-dire de transformer un courant à haute tension et faible intensité en un courant de faible tension et grande intensité. C'est alors le circuit primaire qui possède un grand nombre de spires à fil fin.

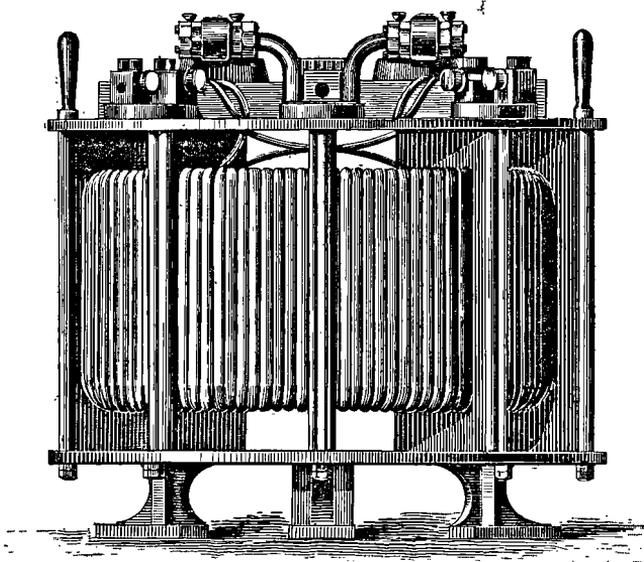


Fig. 111.

La majeure partie des transformateurs courants est à circuit magnétique fermé. Nous ne décrivons que les plus connus.

Le transformateur Zipernowski (ancien modèle) est d'une construction analogue à celle d'un anneau Gramme (fig. 111). Il se compose d'un noyau en fils de fer vernis, sur lequel sont enroulées et juxtaposées des bobines de fil de cuivre. Ces sections sont alternativement reliées de deux en deux et constituent deux circuits indépendants dont l'un joue le rôle de primaire et l'autre de secondaire.

Dans le transformateur Westinghouse et dans le transformateur Ferranti, le circuit magnétique est non seulement fermé, mais se compose de deux circuits juxtaposés.

La figure 112 donne la représentation schématique du premier de ces appareils. Les deux bobines A_1 et A_2 forment deux enroulements distincts placés à côté l'un de l'autre. Le noyau est construit avec des tôles minces dont l'une a été représentée séparément sur la

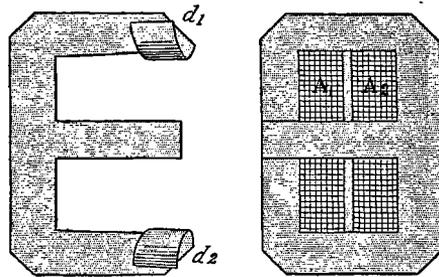


Fig. 112.

figure 112. Les ailes d_1 et d_2 peuvent être relevées pour permettre l'introduction des bobines enroulées préalablement; ces ailes sont ensuite abaissées et leurs joints alternés de manière à assurer une bonne conductibilité magnétique. Du papier verni sépare; les tôles voisines l'ensemble est d'ailleurs maintenu par des plaques de fonte reliées entre elles à l'aide de boulons.

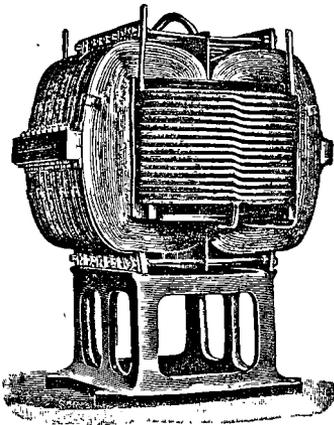


Fig. 113.

Dans le transformateur Ferranti (fig. 113), les deux bobines sont enroulées sur un faisceau de lames de fer isolées les unes des autres. Après le bobinage, ces lames sont repliées comme l'indique la figure, et l'ensemble est enfermé dans une armature de fonte.

126. — Rendement des transformateurs à courants alternatifs. — D'une façon générale, on désigne sous le nom de

rendement d'un transformateur le rapport de la puissance utile recueillie aux bornes du secondaire à la puissance totale fournie aux bornes du primaire.

Diverses causes de pertes peuvent influencer sur le rendement : ce sont l'échauffement des circuits, la production des courants de Foucault et l'hystérésis. Dans les transformateurs à courants alternatifs, il atteint couramment 0,96.

127. — Transformateurs à courant continu. — Les transformateurs à courant continu ont pour objet la transformation d'un courant continu en un autre courant, soit continu, soit alternatif, ou *vice versa*.

Une méthode générale permettant de réaliser des transformateurs à courant continu a été indiquée par Gramme dès 1874. Elle consiste à se servir du courant primaire pour actionner un moteur, commandant une dynamo génératrice, qui fournit à son tour le courant secondaire dans les conditions voulues. Les appareils ainsi constitués sont, à proprement parler, des dynamo-moteurs.

Il convient, en outre, de signaler deux autres solutions, ayant un caractère original et que la pratique a consacrées.

L'appareil qui réalise la première, dû à M. Cabanellas, est connu sous le nom de *robinet électrique*.

Soient deux anneaux Gramme concentriques A et B, immobiles et bobinés chacun à l'aide de fils de diamètres différents. Supposons que les balais de l'anneau A étant reliés au circuit primaire et ceux de l'anneau B au circuit secondaire, on fasse tourner ces balais à la même vitesse.

Les balais A en tournant modifient à chaque instant la position des points d'entrée et de sortie du courant dans l'anneau A, et, par suite la position des pôles dans celui-ci. L'effet est le même que si l'on faisait tourner ces pôles autour de l'anneau B. Il se produit dès lors à l'intérieur de celui-ci des courants alternatifs comme dans l'induit d'une dynamo ordinaire, et l'on conçoit que ces courants, convenablement recueillis par les balais B, puissent fournir

dans le circuit secondaire un courant continu. Ce courant dépendra de la nature de l'enroulement dans l'anneau B, de l'induction due à l'anneau A et de la vitesse des balais. On peut donc toujours réaliser une transformation déterminée, et cela en dépensant uniquement l'énergie mécanique nécessaire pour obtenir la rotation des balais.

Rien n'exige d'ailleurs que les deux anneaux soient distincts, et en réalité les deux enroulements primaire et secondaire sont placés sur le même anneau.

Le robinet électrique est actuellement assez employé en Angleterre.

La seconde des solutions dont nous avons parlé a été imaginée récemment par MM. Hutin et Leblanc, qui ont donné à leur appareil le nom fantaisiste de *panchahuteur*. Elle permet d'obtenir la transformation d'un courant continu en courant alternatif, ou inversement. Nous nous contenterons d'indiquer seulement le principe sur lequel elle repose.

Soit un circuit magnétique fermé, sur lequel est enroulé un circuit de N spires, parcouru par un courant alternatif dont l'intensité I variant sinusoïdalement peut être représentée par :

$$I = a \sin \alpha,$$

ou α est une fonction périodique du temps.

L'induction produite sur le noyau est proportionnelle au nombre des ampères-tours $N a \sin \alpha$ (§ 54).

Rien ne sera changé dans ce système si, au lieu de faire varier l'intensité, on la laisse constante et égale à a , et si l'on fait varier à tout instant le nombre des spires actives, de telle sorte que leur nombre à un instant donné soit toujours représenté par $N \sin \alpha$. Le nombre des ampères-tours est en effet identique dans les deux cas.

Il suffit dès lors que, dans un transformateur ordinaire à courants alternatifs, on fasse varier le nombre des spires actives du circuit secondaire suivant une loi sinusoïdale, pour que le courant

induit recueilli ait une intensité constante et soit par conséquent continu.

128. — Rendement des transformateurs à courant continu. — Les transformateurs à courant continu ont un rendement sensiblement inférieur à celui des transformateurs à courants alternatifs; il ne dépasse guère 0,80. De plus, ces appareils, étant à rotation, exigent une surveillance et des soins nécessairement coûteux.

Autant qu'on peut en juger d'après les expériences d'essai exécutées récemment à Paris, il convient cependant de faire exception pour le panchahuteur, dont le rendement atteindrait 0,95.

SIXIÈME PARTIE

MESURES

CHAPITRE PREMIER

Généralités sur les mesures.

129. — Définitions. — On mesure une quantité physique en la comparant à une quantité de même espèce prise pour unité.

Le rapport numérique exprimant le résultat de cette comparaison est la grandeur de la quantité physique mesurée.

Deux procédés généraux permettent d'effectuer une mesure.

On peut, en premier lieu, comparer directement entre elles deux quantités de même espèce dont l'une est de grandeur connue : cette méthode est appelée *méthode directe*.

On peut aussi déduire une grandeur des grandeurs de plusieurs autres quantités avec lesquelles la première est dans un rapport défini. La mesure cherchée résulte alors, par voie de calcul, d'une série de mesures généralement plus simples et effectuées séparément : c'est la *méthode indirecte*.

130. — Méthodes de mesure directe. — Le moyen le plus simple de comparer directement entre elles deux quantités physiques de même nature consiste à faire agir celles-ci *dans des conditions identiques* et à comparer les effets qu'elles produisent. Du rapport de ces effets se déduit celui des quantités comparées.

En mettant, par exemple, un manomètre à air libre successivement en relation avec deux milieux à des pressions dont l'une est inconnue et l'autre choisie pour unité, le rapport des différences de niveau observées dans chacun des cas fournit la mesure de la pression inconnue.

L'emploi de la méthode de comparaison suppose que l'opérateur dispose d'appareils de mesure donnant des indications exactement proportionnelles aux grandeurs qui agissent sur eux. Comme il en est rarement ainsi, on tourne la difficulté en faisant usage de graduations.

La graduation d'un appareil s'effectue en le mettant successivement en relation avec des grandeurs égales à l'unité, à deux fois l'unité, etc., et en notant chaque fois, en regard des indications obtenues expérimentalement, la valeur de la grandeur qui les a fournies.

Toute mesure par la méthode de comparaison comporte dès lors deux opérations distinctes : l'une, — c'est la graduation, — faite une fois pour toutes et généralement par le constructeur ; l'autre, consistant simplement en une lecture, faite sur la graduation, de la valeur indiquée par l'appareil, lorsque la grandeur à mesurer agit sur lui.

On remarquera qu'un tel procédé ne saurait être valable que si ces deux opérations sont faites dans des conditions physiques identiques. De plus, comme des causes physiques interviennent souvent pour modifier à la longue le mode de fonctionnement des appareils, la graduation doit être assez souvent vérifiée et au besoin corrigée.

La méthode de comparaison est d'application aisée et permet une grande rapidité dans les mesures. Elle est presque exclusivement employée dans l'industrie.

Un deuxième procédé de mesure directe est connu sous le nom de *méthode de réduction à zéro*.

Il consiste à opposer une grandeur connue à la grandeur

inconnue, de même nature, qu'il s'agit de mesurer, et à compenser les effets de cette dernière en donnant à la première une valeur convenable, qui est précisément l'expression de la mesure cherchée.

La pesée ordinaire est une des applications les plus usuelles de cette méthode.

La méthode de réduction à zéro présente sur la méthode de comparaison des avantages qui la font rechercher de préférence dans les opérations de laboratoire. Elle est, en effet, indépendante de la loi suivant laquelle l'appareil de mesure enregistre l'action des grandeurs mises en relation avec lui; il suffit que ce dernier soit doué de sensibilité, et c'est cette sensibilité même, presque toujours facile à obtenir très grande, qui règle la précision des résultats.

131. — Méthodes de mesure indirecte. — On peut enfin déduire la mesure d'une quantité physique de celles d'autres quantités dont elle est une fonction bien déterminée : c'est la méthode indirecte.

On sait, par exemple, que la puissance électrique est égale au produit de l'intensité par la force électromotrice (§ 11). On peut se contenter dès lors de mesurer séparément ces deux éléments. Le produit des grandeurs ainsi trouvées est, à condition d'employer des unités correspondantes, la mesure de la puissance cherchée.

Les méthodes indirectes permettent fréquemment de mesurer des quantités qu'il serait impossible de déterminer autrement. Elles ont aussi l'avantage de substituer parfois des opérations fort simples à une détermination directe compliquée. En revanche, elles ont l'inconvénient de multiplier les erreurs d'observation.

132. — Quantités électriques à mesurer. — Les quantités électriques dont on a le plus souvent l'occasion d'opérer industriellement la mesure peuvent se diviser en deux groupes, suivant qu'il s'agit de courants continus ou alternatifs.

Dans le premier cas, ce sont l'intensité i , la force électromotrice e , la résistance r et la puissance électrique W ; ces quan-

tités sont d'ailleurs liées entre elles par les relations suivantes (§ 10 et 11) :

$$i = \frac{e}{r},$$

$$W = ei.$$

Dans le second cas, ce sont l'intensité efficace, la force électromotrice efficace et la puissance efficace (§§ 108 et 109).

133. — Étalons. — Quelle que soit la méthode choisie pour mesurer ces quantités, il est nécessaire de posséder au préalable des grandeurs-unités de même nature et parfaitement connues. Ces grandeurs sont dites *étalons*.

Les phénomènes dus aux courants étant éminemment temporaires, il n'est pas possible de constituer des étalons permanents d'intensité; on a vu toutefois qu'un courant d'un ampère traversant pendant une seconde un électrolyte est susceptible de déposer $0^{\text{sr}},001118$ d'argent ou $0^{\text{sr}},0003287$ de cuivre (§ 13). Cette indication fournit une base commode permettant de représenter physiquement l'ampère.

Rien n'empêche, au contraire, de réaliser des étalons de force électromotrice et de résistance.

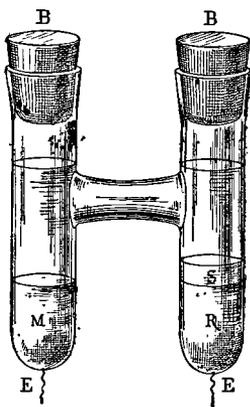


Fig. 114.

134. — Étalon de force électromotrice. — Un certain nombre d'éléments de pile possèdent une force électromotrice assez constante pour pouvoir servir d'étalons. Tel est le cas de l'élément Latimer Clark.

Une disposition commode de celui-ci a été représentée figure 114. L'ensemble de l'élément présente une forme d'H. Dans l'une des jambes de cet H est un amalgame

de zinc M obtenu en mettant du zinc pur dans du mercure distillé dans le vide. L'autre jambe contient du mercure également distillé R, recouvert d'une couche de sulfate mercurieux S. Une solution saturée de sulfate de zinc pur remplit le reste des vases. Des bouchons B paraffinés empêchent l'évaporation. Les électrodes sont prises sur l'amalgame de zinc, d'une part, et sur le mercure, d'autre part, à l'aide de fils de platine E soudés dans le verre.

Après quelques semaines de repos, l'étalon Latimer Clark donne une force électromotrice très constante, qui peut être représentée par la formule :

$$E = 1,438 [1 - 0,0077 (\theta - 15)]^{\text{volt}}$$

où θ est la température de l'élément, évaluée en degrés centigrades.

On fait également usage, en Angleterre, d'un élément étalon du type Daniell, qui a sur le précédent l'avantage d'être insensible aux variations de la température.

135. — Étalon de résistance. — On a vu que l'ohm est défini : la résistance offerte à un courant invariable par une colonne de mercure de section constante, ayant à la température de la glace fondante une masse de $14^{\text{gr}},4521$ et une longueur de $106^{\text{cm}},3$ (§ 13).

L'étalon prototype de l'ohm a été réalisé à l'aide d'un tube de verre cylindrique et rectiligne parfaitement calibré, rempli de mercure et aboutissant à deux godets dans lesquels plongent des électrodes servant à la liaison avec le circuit extérieur. La figure 115 représente une copie de ce prototype, connue sous le nom d'*étalon secondaire* et qui a l'avantage d'être à la fois plus commode à manier et moins fragile.

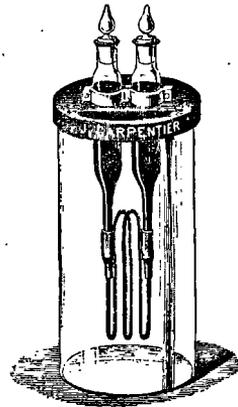


Fig. 115.

Il est nécessaire, quand on fait usage de ces étalons, de tenir compte des variations de résistance du mercure dues à la variation de température.

Elles sont représentées par la formule :

$$R_t = R_0 (1 + 0,0008649 t + 0,00000112 t^2),$$

où R_t et R_0 sont les valeurs de la résistance à 0° et t° , et t la température en degrés centigrades à laquelle a été faite l'observation.

Les besoins de l'industrie ont amené les constructeurs à établir des étalons encore plus maniables et sans mercure ; on les désigne parfois sous le nom d'*étalons pratiques*.

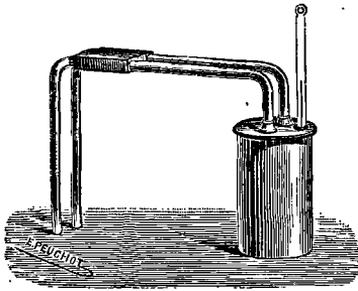


Fig. 116.

L'un des modèles les plus connus est dû à M. J. Carpentier (fig. 116). Il est constitué par une bobine de gros fil en maillechort, suspendue à l'intérieur d'une boîte métallique dont les parois intérieures sont revêtues d'une couche de paraffine. Le couvercle de cette boîte laisse passer deux

électrodes en cuivre et un thermomètre, mesurant la température du fil au moment de l'expérience. On choisit le maillechort pour le fil, en raison de son faible coefficient de variation de résistance avec la température. Ce coefficient est de 0,00036 seulement par degré centigrade, tandis que celui du cuivre atteint 0,0036. L'enroulement de la bobine est formé de deux parties identiques enroulées en sens inverse, de manière à en neutraliser les effets magnétiques.

Quelquefois le fil est recuit après enroulement ; il atteint ainsi plus rapidement un état d'équilibre moléculaire stable, et l'on évite par suite les variations de résistance qui pourraient provenir de lentes modifications dans la texture du métal.

136. — Boîtes de résistances. — L'échelle des résistances

à mesurer est très grande. Un seul étalon représentant l'ohm, serait insuffisant dans la plupart des cas, et l'on a besoin de disposer de fractions ou de multiples décimaux de cet étalon.

On les réunit dans une boîte, désignée sous le nom de *boîte de résistances*, qui joue le même rôle, dans la mesure de celles-ci, que la boîte des poids marqués dans la mesure des poids.

La constitution des résistances entrant dans la composition d'une boîte est à peu près semblable à celle de l'étalon pratique. Une bobine à double enroulement en fil de maillechort soigneusement isolé

sert à former chacune d'elles. Cette bobine est noyée dans la paraffine de manière à garantir son isolement et à éviter les dérivations dues à l'humidité. La grosseur du fil servant au bobinage dépend

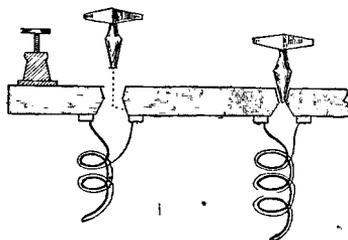


Fig. 117.

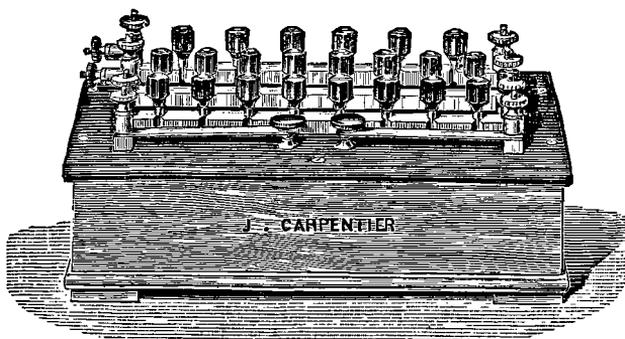


Fig. 118.

de l'intensité maximum des courants qui doivent traverser la boîte. Cette intensité ne dépasse généralement pas 20 ou 25 milliam-pères ; elle est cependant beaucoup plus élevée dans certains appareils industriels.

Les extrémités de chacune des bobines de résistance aboutissent à deux plots placés sur la partie extérieure de la boîte et susceptibles d'être reliés entre eux par une cheville (fig. 117). Le fait de retirer une cheville provoque l'introduction dans le circuit de la bobine correspondante. Si, au contraire, la cheville demeure en place, la bobine est mise en court circuit et sa résistance se trouve par le fait supprimée.

Les boîtes de résistances ordinaires (fig. 118) permettent de réaliser toutes les résistances de 1 à 10,000 ohms avec un nombre de bobines égal à 16. Il en existe également des types combinés spécialement en vue d'appliquer la méthode de mesure connue sous le nom de méthode du pont de Wheastone. On en reparlera à l'occasion de celle-ci (§ 164).

CHAPITRE II

Mesures électriques industrielles.

137. — Nous avons dit quelles quantités électriques faisaient le plus fréquemment l'objet des mesures industrielles, quels étalons servaient à ces mesures : il reste à examiner les appareils et les méthodes qui permettent de réaliser la comparaison de ces quantités avec les étalons correspondants.

I. — MESURE DE L'INTENSITÉ

138. — Méthodes applicables à la mesure des intensités. — On applique industriellement la méthode de comparaison dans la mesure des intensités. Rappelons qu'elle consiste à faire agir successivement le courant à mesurer et un courant d'un

ampère sur un même appareil dit *ampèremètre*, et à comparer entre eux les effets produits.

En pratique, les ampèremètres dont il est fait usage sont toujours gradués ; la seconde opération est donc inutile, une lecture unique suffit pour fournir le résultat cherché.

L'étude des mesures d'intensité revient dans ces conditions à celle des ampèremètres. Nous nous bornerons par suite à décrire ceux-ci.

139. — Principe des ampèremètres. — Le passage d'un courant d'intensité i dans un conducteur produit, on le sait, trois principaux effets :

1° Si le conducteur est un électrolyte, par exemple un sel d'argent ou de cuivre, celui-ci est décomposé et le poids du métal déposé est proportionnel à la quantité d'électricité it qui a traversé l'électrolyte.

2° Si le conducteur est métallique et de résistance r , il s'échauffe, et la chaleur dégagée est proportionnelle au produit ri^2 (§ 10).

3° Si le conducteur est placé dans un champ magnétique, il est soumis à un effort mécanique dont l'expression est donnée par la relation :

$$f = kilB,$$

où f est la valeur de l'effort, B celle de l'induction magnétique du champ, et l la longueur du conducteur (§ 60).

Trois types d'ampèremètres peuvent donc être imaginés, suivant qu'on veut enregistrer la formation d'un dépôt galvanique, la chaleur dégagée par le passage du courant, ou la réaction mutuelle du champ dû au courant et d'un champ magnétique.

Quel que soit, en outre, le type d'ampèremètre construit, son mode d'emploi dépend évidemment de sa résistance électrique.

Si cette résistance est très faible, l'appareil peut être intercalé directement en série dans le circuit, car la valeur de l'intensité à mesurer n'est pas modifiée sensiblement par cette introduction.

Si cette résistance est considérable, il n'en est plus de même. Que l'appareil soit intercalé comme précédemment dans le circuit lui-même, ou mis en dérivation entre deux points de celui-ci, il est nécessaire de tenir compte de son intercalation et de corriger, à l'aide d'un calcul, le résultat observé.

Il est à peu près exclusivement fait usage d'ampèremètres à faible résistance intérieure pour les mesures d'intensité; les ampèremètres à forte résistance sont employés, au contraire, le plus souvent pour la mesure des forces électromotrices, comme on le verra plus loin. Aussi désigne-t-on d'habitude ces derniers sous le nom de voltmètres.

140. — Ampèremètres électrolytiques, électrocalorimétriques. — La pesée d'un dépôt galvanique est une opération délicate; la formation de ce dépôt est lente et s'obtient peu aisément dans des conditions toujours comparables; aussi n'existe-t-il pas d'ampèremètres électrolytiques en usage courant.

De même, l'échauffement d'un conducteur dans l'unité de temps est difficile à mesurer directement par les méthodes calorimétriques, sans le secours d'installations qui se prêteraient mal aux nécessités de l'industrie. Les ampèremètres électrocalorimétriques se contentent donc de donner des indications proportionnelles à cet échauffement.

Pour que de telles indications soient appréciables, on est amené à donner au conducteur traversé par le courant une résistance considérable. Les appareils de ce genre rentrent, par suite, dans la catégorie des voltmètres.

L'un des plus connus est dû à Cardew : une représentation schématique en est donnée figure 119. Un fil de platine fixé en A passe sur deux poulies o et o' et est tendu à son extrémité par un res-

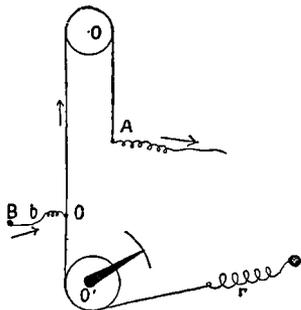


Fig. 119.

sort r . Le courant est amené à ce fil en un point c par l'intermédiaire d'un fil souple b relié à une borne fixe B. Dès que le courant passe dans le fil de platine, ce fil s'échauffe et s'allonge. Obéissant à l'action du ressort r , il fait alors tourner les poulies o et o' de droite à gauche, et une aiguille portée par l'une des poulies se déplace devant une graduation. L'ensemble de l'instrument est d'ailleurs protégé par une enveloppe convenable contre les influences extérieures.

Tout récemment, la maison Hartman et Braun a pu construire des ampèremètres à faible résistance très sensibles, fondés sur le même principe.

141. — **Ampèremètres galvanométriques.** — Si les ampèremètres des types précédents sont peu nombreux, en revanche la presque totalité des appareils courants rentre dans la catégorie des ampèremètres galvanométriques. Ceux-ci peuvent se diviser en deux classes :

1° Les *galvanomètres* proprement dits, dans lesquels on mesure la réaction réciproque du champ produit par un circuit et d'un champ magnétique;

2° Les *électrodynamomètres*, dans lesquels on mesure la réaction réciproque de deux circuits.

Chacune de ces classes mérite une étude spéciale.

1° *Galvanomètres.*

142. — **Généralités sur les galvanomètres.** — Il existe à priori diverses dispositions permettant de mettre en évidence la réaction réciproque d'un circuit et d'un champ magnétique.

Supposons, en premier lieu, que le champ magnétique soit produit par un aimant permanent : on peut, soit laisser la bobine que parcourt le courant, fixe, et l'aimant mobile, soit laisser l'aimant fixe et la bobine mobile ; — dans ces deux cas, c'est le déplacement de celui des éléments qui est mobile qui sert à mesurer

leur réaction mutuelle; — soit enfin laisser immobiles à la fois la bobine et l'aimant, et enregistrer leur réaction mutuelle par le déplacement d'un morceau de fer doux placé dans le voisinage.

On peut, en second lieu, se dispenser de l'emploi d'un aimant permanent. Il suffit de créer le champ magnétique par le courant à étudier lui-même, en excitant un électro-aimant à l'aide de celui-ci et de mesurer directement l'attraction exercée par le champ ainsi produit sur une palette de fer doux.

Il existe donc cinq dispositions possibles, qui toutes ont été également employées sous des formes diverses. Nous allons décrire des appareils se rapportant à chacune d'elles.

Quelles qu'elles soient, un fait général les domine : l'action mutuelle du circuit et du champ en présence y est toujours donnée par la relation $f = k i l B$ (§ 160). Les indications fournies par les galvanomètres proprement dits sont, par suite, proportionnelles à la première puissance de l'intensité cherchée.

143. — Galvanomètres à aimant permanent mobile. — Le galvanomètre le plus simple que l'on puisse imaginer est à aimant permanent mobile.

La figure 120 en représente la disposition schématique.

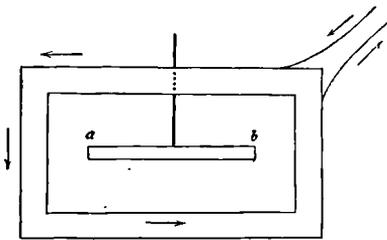


Fig. 120.

L'aimant ab , en forme d'aiguille mobile autour de son centre dans un plan horizontal, est placé au centre d'un cadre sur lequel est enroulé le conducteur fixe. La forme de ce cadre est telle que les actions de toutes les parties du conducteur sur l'aimant soient concordantes.

En multipliant le nombre des tours, on accroît la longueur du conducteur et, par suite, la sensibilité de l'appareil,

Lorsque le courant traverse le circuit, l'aimant se déplace et

prend une nouvelle position d'équilibre, sous l'action des deux couples opposés produits, l'un par le cadre, l'autre par le champ magnétique terrestre.

Il n'existe pas en réalité de différence essentielle entre ce galvanomètre simple et les appareils de laboratoire les plus parfaits. Bien que notre étude se rapporte plus spécialement aux instruments industriels, il est intéressant de décrire ici l'un des galvanomètres de précision les plus usités, car l'emploi en est fréquent dans les mesures de résistance.

Le galvanomètre Thomson se compose (fig. 121) d'une bobine fixe A au centre de laquelle est suspendu un petit barreau aimanté *a*. Ce barreau est supporté par un fil de cocon dont le couple de torsion a une valeur négligeable.

Lorsqu'un courant parcourt la bobine, le barreau est dévié, mais l'influence du courant n'est pas la seule qui s'exerce sur lui ; le magnétisme terrestre agit aussi, comme il le fait sur toute aiguille aimantée et tend à s'opposer à son mouvement. Pour annuler cette action, il suffit d'employer un second barreau *b* parallèle au premier, de polarité égale et de sens contraire : les deux aimants sont reliés par une tige rigide. La terre tendant à les dévier chacun dans un sens opposé et avec la même force n'a plus aucune action sur l'ensemble, qui est dit *astatique*. Ce second barreau *b* est placé au centre d'une deuxième bobine B enroulée de façon à produire une déviation concordant avec celle qui est due à la bobine A. Les bobines A et B sont cir-

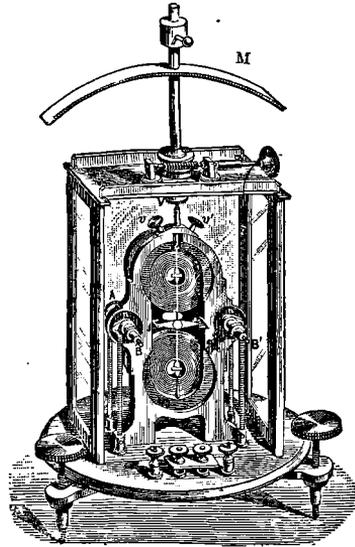


Fig. 121.

culaires et divisées chacune en deux moitiés indépendantes. Les moitiés antérieures ont été enlevées dans la figure, de manière à laisser voir la suspension et le système astatique.

A cause de sa légèreté, l'équipage mobile oscillerait indéfiniment sous le moindre effort, avant de prendre une position d'équilibre; ces oscillations sont amorties par les frottements sur l'air d'une ailette en aluminium L solidaire de l'ensemble.

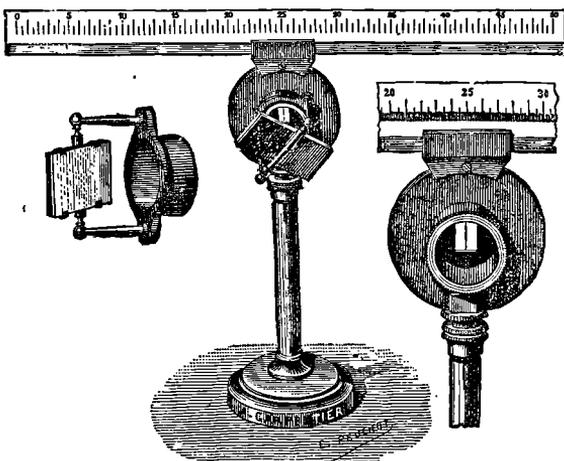


Fig. 122.

On règle la sensibilité de l'appareil en le surmontant d'un aimant recourbé M, dit directeur, dont l'action prédomine sur le plus élevé des petits barreaux; cet aimant peut glisser le long d'une tige verticale, ce qui permet de graduer son influence. Il a aussi pour effet de ramener le système mobile au zéro, c'est-à-dire à une position initiale à partir de laquelle on lit les déviations.

Le dispositif le plus fréquemment employé pour faire les lectures est le suivant.

Un petit miroir est fixé sur la tige qui réunit les barreaux aimantés. En avant du galvanomètre, on place une lame mince et

translucide portée par un support approprié (fig. 122) et sur laquelle sont tracées de fines divisions équidistantes. Au-dessous de l'échelle est une fente rectangulaire traversée par un fil vertical. En avant de cette fente, une glace peut prendre toutes les inclinaisons possibles. On dispose dans un endroit convenable un foyer lumineux et une lentille dont la position est variable à volonté. Les rayons lumineux concentrés par la lentille se réfléchissent sur la glace, traversent la fente rectangulaire et se réfléchissent à nouveau sur le miroir du galvanomètre. En réglant convenablement la position de la lentille et l'inclinaison de la glace, on arrive à obtenir sur l'échelle graduée une image très nette de la fente et du fil, image qui est observée par transparence. Elle joue le rôle d'index, et ses déplacements, pour une valeur donnée de l'intensité, sont d'autant plus grands que l'échelle elle-même est plus éloignée du miroir.

Le galvanomètre Thomson exige, pour être manié, des précautions minutieuses. Son réglage est assez long à établir : son extrême sensibilité rend délicates les opérations de mesure faites avec son aide. Aussi son emploi est-il restreint aux usages de laboratoire.

Pour satisfaire aux besoins de l'industrie, lord Kelvin a imaginé une disposition entièrement différente, bien que basée sur les mêmes principes, et susceptible de donner cependant encore des résultats très précis.

L'appareil, connu sous le nom d'ampèremètre Thomson, se compose de deux parties distinctes : une aiguille aimantée mobile et une bobine fixe traversée par le courant à mesurer (fig. 123).

L'aiguille, formée de quatre petits barreaux d'acier parallèles, ayant un centimètre de longueur, est mobile autour d'un axe vertical et porte un index en aluminium se déplaçant sur un secteur S. L'ensemble du secteur et de l'aiguille peut lui-même se déplacer le long d'une rainure pratiquée dans une planchette horizontale.

La bobine fixe B est en forme de tore et comprend six tours d'une lame de cuivre de forte section, isolés par du papier d'amiante. Elle repose sur la planchette, de telle sorte que son axe soit situé sur le prolongement de la rainure.

Lorsque le courant à mesurer est établi, l'aiguille aimantée qui, au repos, est orientée dans une direction déterminée, sous l'action du magnétisme terrestre, est écartée de sa position d'équilibre et d'autant plus déviée que le champ créé par la bobine est plus intense, et l'action directrice de la terre plus affaiblie.

On voit, dès lors, qu'il existe deux moyens de faire varier la sensibilité de l'appareil. Le premier consiste à écartier plus ou moins de la bobine inductrice le secteur, en le déplaçant le long

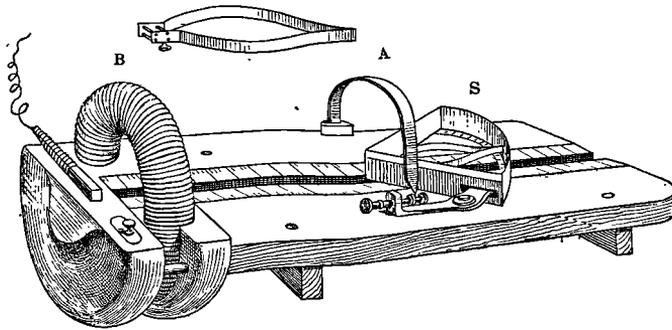


Fig. 123.

de la rainure, — ce qui revient à modifier l'action du champ produit par la bobine. Le second consiste à substituer au champ terrestre un autre champ directeur, de valeur connue, en plaçant un aimant directeur A au-dessus de l'aiguille aimantée.

L'ampèremètre Thomson porte deux graduations. L'une, en tangentes, est tracée sur le secteur mobile. L'autre est tracée le long de la rainure et ses divisions sont déterminées de telle sorte que l'aiguille placée dans un champ magnétique égal à l'unité donne, aux distances numérotées 1, 2, 3..., des déviations respectivement égales à 1, 2, 3..., lorsque l'intensité du courant passant dans la bobine fixe est égale à 1 ampère. Il en résulte que si I est l'intensité d'un courant quelconque passant dans la bobine, la valeur de cette intensité est proportionnelle à la valeur H du champ

magnétique agissant sur l'aiguille, à la lecture d sur la graduation du secteur, et en raison inverse de la lecture n sur l'échelle de la planchette :

$$I = \frac{Hd}{n}.$$

On peut donc calculer I à condition de connaître H . Cette valeur de H est déterminée une fois pour toutes par une expérience préalable, consistant à faire passer dans la bobine un courant d'intensité connue I' et à lire les déviations correspondantes d' et n' . On en déduit comme précédemment :

$$I' = \frac{Hn'}{d'},$$

d'où l'on tire la valeur cherchée :

$$H = \frac{I'd'}{n'}.$$

En dépit de ses grandes qualités de précision, on doit encore reprocher à l'ampèremètre Thomson son maniement délicat. Cet appareil peut en outre donner des résultats erronés, si, au cours d'une expérience, l'état magnétique ambiant vient à varier sans que l'observateur en tienne compte.

144.— Galvanomètres à aimant fixe et à bobine mobile.—

L'appareil qui sert de type aux galvanomètres de cette classe est le galvanomètre D'eprez-d'Arsonval (fig. 124).

Le champ magnétique y est produit par un aimant puissant, en forme de fer à cheval et fixe. Entre les branches de cet aimant est un cadre rectangulaire sur lequel est enroulé le circuit.

Ce cadre est maintenu par deux fils métalliques tendus : le supérieur est attaché à l'extrémité d'une tige susceptible de recevoir, soit un mouvement de rotation, soit un mouvement vertical de translation ; l'inférieur aboutit à une lame élastique dont la tension peut être convenablement réglée.

Ces fils ont un double rôle. Ils servent, d'une part, à amener

le courant dans le cadre; d'autre part, ils déterminent dans l'espace un axe fixe, autour duquel le cadre peut prendre un mouvement de rotation.

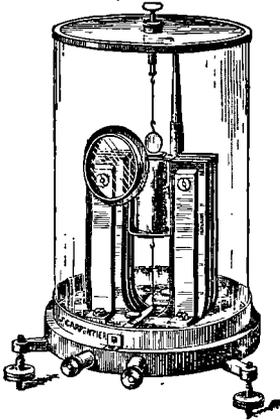


Fig. 124.

La réaction du cadre et du champ magnétique est mesurée par le couple de torsion de ces fils.

Les lectures se font, soit au miroir, comme dans le galvanomètre Thomson, soit à l'aide d'une aiguille légère, perpendiculaire au cadre et se déplaçant devant une graduation.

Le galvanomètre Deprez-d'Arsonval présente un avantage précieux : il est *apériodique*; cela signifie que, lorsque le circuit du cadre est fermé, ce dernier se fixe immédiatement dans sa nouvelle position

d'équilibre, sans décrire autour d'elle une série d'oscillations.

Cet effet est dû à l'intensité du champ magnétique qui est encore renforcé par la présence d'un cylindre creux de fer doux placé au centre du cadre. Sous l'action du champ, le cadre, au moment de son déplacement, est le siège de courants d'induction intenses qui s'opposent à son mouvement.

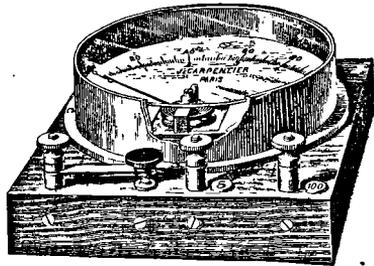


Fig. 125.

Le galvanomètre Deprez-d'Arsonval tel qu'il vient d'être décrit est encore un instrument peu propre aux mesures industrielles ; un grand nombre de constructeurs se sont efforcés d'en construire des modèles à la fois plus robustes et plus maniables.

Parmi ceux-ci, nous citerons l'ampèremètre de précision Carpentier (fig. 125).

Dans cet appareil, la bobine enroulée sur un cadre est montée sur deux pivots et mobile entre les pôles d'un puissant électro-aimant. Un ressort directeur en spirale maintient sa position de la bobine et joue le rôle des fils métalliques du galvanomètre Deprez-d'Arsonval. Des précautions spéciales, apportées dans la fabrication de l'aimant, assurent son invariabilité.

Un ampèremètre à peu près identique et dû à Weston est également fort employé.

145. — Galvanomètres à aimant permanent et bobine fixe. — Si l'on place dans le champ créé par un aimant une palette de fer doux mobile, cette palette s'aimante et prend une orientation déterminée. Toute variation du champ, due par exemple au passage d'un courant dans un conducteur fixe voisin, entraîne d'ailleurs une modification dans l'orientation de la palette. Tel est le principe des galvanomètres à aimant permanent et bobine fixe.

Le nombre de ces appareils est considérable. La loi qui y relie les déplacements de la palette mobile à l'intensité du courant parcourant la bobine étant très complexe, ils sont toujours munis d'une graduation établie par comparaison. L'un des plus répandus en France est dû à Carpentier.

L'ampèremètre Carpentier (fig. 126) comporte deux aimants permanents recourbés AB, A'B' dont les pôles de même nom sont juxtaposés, et une bobine fixe à l'intérieur de laquelle pivote une aiguille en fer doux. L'axe de la bobine est oblique par rapport à la ligne des pôles des aimants. Il faut remarquer, en effet, que si cet axe occupait une position

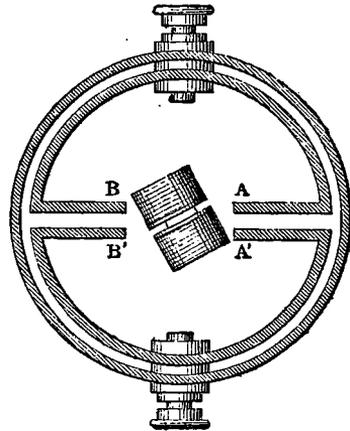


Fig. 126.

exactement perpendiculaire, le couple dû au courant serait d'autant moindre que l'aiguille serait plus déviée. Au contraire, le couple directeur exercé par les aimants permanents va en augmentant avec cette déviation. Dès lors, les divisions de la graduation correspondant à des accroissements identiques de l'intensité iraient toujours en diminuant à mesure que croîtrait la valeur absolue de cette intensité. On atténue encore cet effet, en ayant soin de faire passer le courant dans la bobine de telle sorte qu'il tende toujours à ramener l'aiguille parallèlement aux spires du fil.

On peut citer encore, parmi les appareils de cette catégorie, le galvanomètre Deprez à arête de poisson et l'ampèremètre Ayrton et Perry. Nous n'insisterons pas sur leur description.

146. — Inconvénients des galvanomètres à aimant permanent. — Tous les galvanomètres à aimant permanent ont un défaut commun. Le champ magnétique y est susceptible de varier. L'aimant permanent est, en effet, exposé à subir des modifications notables, soit simplement sous l'action du temps, soit par suite des changements magnétiques qui se produisent dans le voisinage.

Les lectures risquent de ce fait d'être erronées : il est prudent, dans tous les cas, de vérifier fréquemment et de corriger au besoin la graduation.

On remarquera, en outre, que le courant ne doit jamais traverser les galvanomètres à aimant permanent que dans un sens défini à l'avance et qui ne peut être inversé. L'emploi de ces appareils est donc limité strictement aux opérations de mesure faites sur les courants de même sens.

147. — Galvanomètres à électro-aimant. — On parvient à éviter la présence d'un aimant permanent en créant le champ magnétique à l'aide d'un électro-aimant excité par le courant étudié. L'intensité du courant est alors mesurée par les attractions exercées par l'électro-aimant sur une palette de fer doux placée dans son voisinage.

La loi qui lie la valeur de ces attractions et celle de l'intensité est extrêmement complexe. Aussi les galvanomètres à électro-aimant sont-ils toujours gradués par comparaison. Tout l'effort des

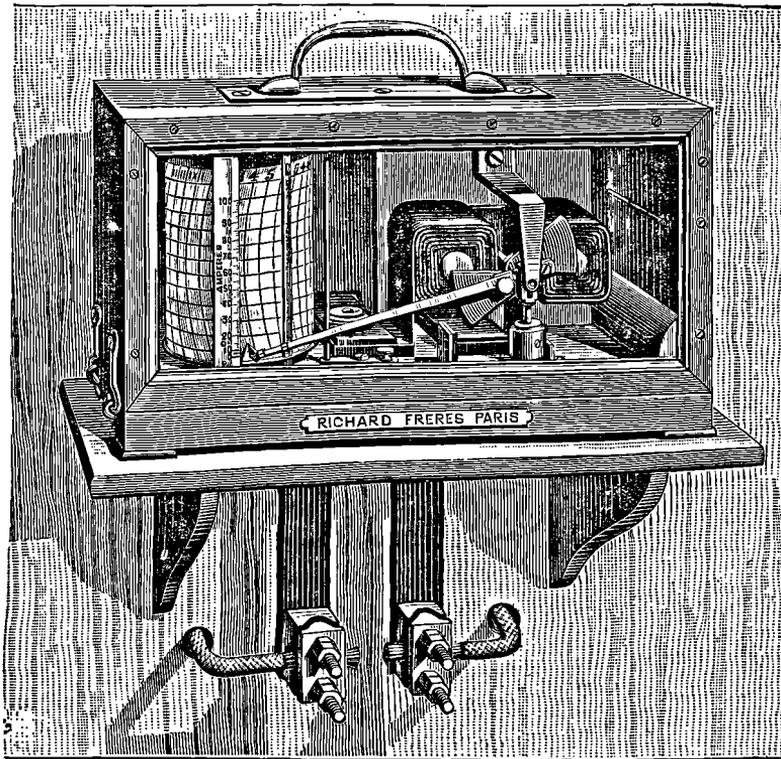


Fig. 127.

constructeurs consiste à rechercher pour la palette attirée une forme telle que la graduation soit aussi régulière que possible.

L'ampèremètre Richard réalise assez bien cette condition. Il se compose essentiellement d'un électro-aimant (fig. 127) excité par le courant à mesurer, et d'une palette de fer doux en forme,

de 8. Cette palette est montée sur un axe parallèle à celui des bobines de l'électro-aimant, et est sollicitée à tourner de gauche à droite par l'attraction des noyaux. Un contrepoids agissant en sens inverse tend à la ramener constamment à une position d'équilibre.

L'ampèremètre Richard est le plus souvent complété par un dispositif enregistreur fort répandu aujourd'hui.

A cet effet, un index léger et long participe à la rotation de la palette. Son extrémité est munie d'une plume recourbée à angle droit, devant laquelle tourne une feuille de papier portée par un tambour. Ce tambour est mû par un mouvement d'horlogerie. La plume trace ainsi sur le papier une courbe dont les ordonnées représentent l'intensité à un instant quelconque, et dont l'aspect rend compte exactement de la marche du courant.

148. — Propriétés des galvanomètres à électro-aimant. —

A l'inverse de ce qui passe pour les galvanomètres à aimant permanent, il est possible d'inverser le sens du courant dans les galvanomètres à électro-aimant. Il semble donc que ces derniers appareils soient également propres aux mesures de courants continus et de courants alternatifs. Cependant les phénomènes magnétiques compliqués dont ils sont le siège en restreignent l'usage aux premières. De plus, en raison de l'hystérésis qu'ils présentent, les indications qu'ils fournissent pour une même intensité de courant peuvent être différentes et dépendent des variations mêmes de cette intensité.

On a cherché à éviter cet inconvénient grave en réduisant l'appareil à une simple bobine sans noyau de fer et placée dans le voisinage d'une palette de fer doux se saturant très rapidement.

Des ampèremètres de ce genre ont été construits par Hummel, Desruelles, Carpentier, etc. Ils échappent à peu près complètement aux effets de l'hystérésis; leur étalonnage reste constant, si le fer de la palette est parfaitement doux. Un certain

nombre d'entre eux, soigneusement étudiés dans ce but, peuvent servir utilement dans les mesures relatives aux courants alternatifs.

149. — Conditions d'expérimentation relatives aux galvanomètres. — Il arrive fréquemment en pratique que l'on ait à étudier, à l'aide d'un galvanomètre, des intensités dont la valeur est très supérieure à celle qui pourrait être mesurée directement par lui.

On y parvient en insérant dans le circuit, en même temps que le galvanomètre, une résistance de valeur connue appelée *shunt* (fig. 128) et mise en dérivation sur lui.

Dans ces conditions, une partie seulement i du courant I à étudier traverse le galvanomètre et est mesurée par lui.

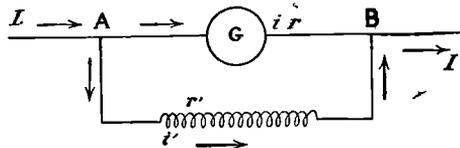


Fig. 128.

Il est ensuite facile de déduire de la valeur de i celle de I , connaissant la résistance r du galvanomètre, et celle r' du shunt.

Soit en effet E la différence du potentiel entre les points A et B . La loi de Ohm donne les égalités suivantes :

$$E = ri = r'i',$$

en désignant par i' l'intensité du courant circulant à travers le shunt.

La somme des deux intensités i et i' est d'ailleurs évidemment égale à l'intensité totale I :

$$I = i + i'.$$

On tire de ces relations :

$$I = i \frac{r + r'}{r'}.$$

Pour faciliter le calcul, le shunt est toujours construit d'avance de

telle sorte que le rapport $\frac{r+r'}{r'}$ soit égal à un nombre simple 10, 100, etc. Le shunt est alors dit au dixième, au centième, etc. Il suffit ensuite de multiplier par 10, 100, etc. la valeur de l'intensité observée au galvanomètre, pour obtenir la valeur de l'intensité totale cherchée.

2° *Électro-dynamomètres.*

150. — **Généralités sur les électro-dynamomètres.** — Les électro-dynamomètres sont des ampèremètres dans lesquels on utilise la réaction mutuelle de deux circuits.

Ils se composent essentiellement de deux bobines, de forme géométrique bien déterminée, et dont l'une est fixe et l'autre mobile.

Chacun des champs dus à ces bobines est proportionnel à l'intensité i ou i' du courant qui les parcourt; leur action mécanique réciproque peut donc être représentée par la relation :

$$[1] \quad f = k i i',$$

où k est une constante dépendant uniquement de la forme des bobines (§ 154).

Si l'on suppose que les bobines soient montées en série et parcourues par le même courant, l'expression [1] devient

$$f = k i^2,$$

et les déviations de la bobine mobile sont proportionnelles *au carré* de l'intensité à mesurer. Les indications des électro-dynamomètres ainsi montés sont par suite indépendantes du sens du courant qui les traverse.

Lorsque les bobines de l'électro-dynamomètre ont une forme géométrique simple, il est possible de calculer directement la valeur du coefficient k . En observant l'effort mécanique f , on voit qu'il est alors possible de mesurer directement en valeur absolue

l'intensité d'un courant. Les électro-dynamomètres de ce genre sont dits pour cette raison *électro-dynamomètres absolus*.

Lorsqu'il s'agit d'appareils industriels, on n'a point le même souci et on se contente de graduer au préalable l'électro-dynamomètre, de telle sorte que la valeur absolue du courant soit obtenue à l'aide d'une simple lecture.

Rappelons que, de même que tous les ampèremètres, l'électro-dynamomètre doit être intercalé en série ou en dérivation sur le circuit suivant que sa résistance est faible ou considérable, et que l'intensité indiquée par lui ne correspond à l'intensité cherchée que dans le premier cas seulement.

151. — *Électro-dynamomètres du type Siemens.* — L'électro-dynamomètre de Siemens (fig. 128) comporte une bobine fixe, à axe horizontal, adossée à une double planchette verticale et portant deux enroulements distincts, l'un en gros fil, utilisé pour les mesures de courants d'intensité élevée, l'autre à fil fin, servant dans les autres cas.

La bobine mobile embrasse la première ; elle est constituée par un seul tour de fil, de forme rectangulaire. La portion antérieure de ce cadre est prolongée par un index qui se déplace le long d'un cercle horizontal gradué. La portion postérieure est prolongée à sa partie supérieure par un ressort à boudin qui peut être plus ou moins tendu à l'aide d'un bouton placé au-dessus du cercle. Ce bouton est en outre muni d'une aiguille.

Lorsque aucun courant ne passe dans l'appareil, l'index du cadre mobile est au zéro de la graduation ; s'il n'y est pas, on l'y ramène en agissant sur le ressort par l'intermédiaire du bouton.

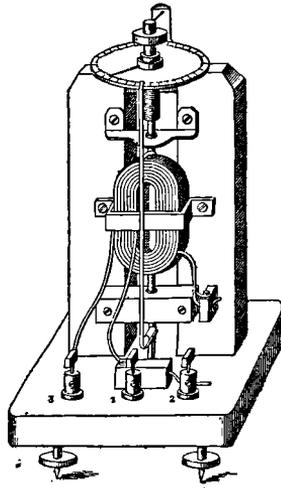


Fig. 129.

Sous l'action du passage du courant, le cadre mobile se déplace pour prendre une nouvelle position d'équilibre, position qui n'est atteinte qu'au moment où l'action mutuelle des deux bobines est exactement contrebalancée par la tension du ressort à boudin. On agit alors sur ce dernier à l'aide du bouton, de manière à ramener l'index du cadre au zéro. L'angle dont on doit tourner

l'aiguille du bouton pour obtenir ce résultat mesure précisément la tension du ressort et par suite l'effort mécanique réciproque des bobines.

L'électro-dynamomètre de Siemens est fort peu apériodique et les lectures en sont difficiles.

Des modèles assez nombreux ont pourtant été construits d'après le même principe. Les plus répandus sont dus à Ganz et à Carpentier. L'électro-dynamomètre Carpentier (fig. 130), par exemple, ne diffère guère de celui de Siemens que par l'agencement des circuits. Tandis que la bobine fixe est à très gros fil et par suite à faible résistance, la bobine mobile est à fil

fin et montée non plus en série, mais en dérivation sur le circuit de la bobine fixe.

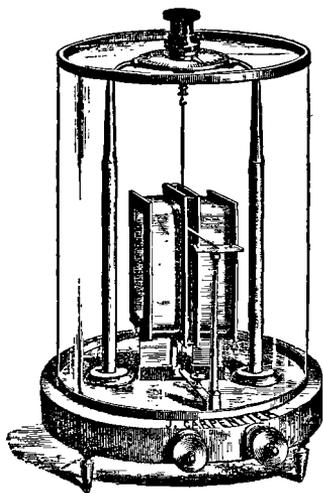


Fig. 130.

152. — Balance électro-dynamique de Thomson. — Une disposition très différente des précédentes et très commode a été imaginée en 1887 par Thomson : elle est connue sous le nom de *balance électro-dynamique*.

La balance électro-dynamique comporte quatre bobines fixes et deux bobines mobiles dont les circuits sont réunis entre eux comme l'indique la figure 131.

Il résulte de ces liaisons que les actions des quatre bobines

fixes sont concordantes et tendent à incliner, soit à droite, soit à gauche, le fléau mobile qui supporte les deux bobines mobiles. Ces dernières, étant en outre parcourues par des courants égaux et de sens contraire, sont soustraites à toute action de la part du champ terrestre.

Lorsque l'appareil est au repos, le fléau occupe une position horizontale. Sous l'action du passage du courant, il s'incline.

On le ramène alors à l'horizontale, en déplaçant un poids sur lui, d'une quantité convenable et le long d'une règle graduée. Il suffit ensuite de lire la valeur de l'intensité cherchée sur la division de la graduation devant laquelle on a dû arrêter le poids.

Un jeu de poids permet de faire varier la sensibilité de l'appareil dans des proportions considérables. Cinq poids suffisent pour mesurer des courants compris entre 0,01 et de 2,500 ampères.

La balance de Thomson est un instrument réellement industriel, et cependant susceptible d'une très grande précision. Parmi

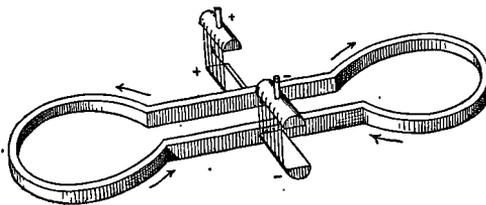


Fig. 132.

les très ingénieuses dispositions de détail qui la caractérisent, il convient de citer le mode de suspension du fléau, servant en même temps de prise de contact pour les bobines mobiles. Il a été représenté figure 132 et comprend deux séries d'un grand nombre de fils fins qui ont l'avantage de permettre le passage des courants d'intensité élevée, tout en maintenant à la suspension une très grande flexibilité.

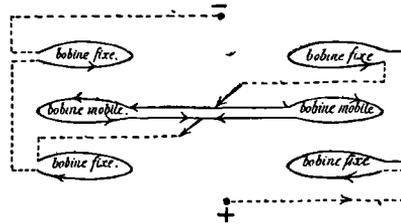


Fig. 131.

153. — Propriétés des électro-dynamomètres. — Les élec-

tro-dynamomètres sont en général moins sensibles que les galvanomètres. En revanche, ils présentent l'avantage d'être dépourvus de pièces en fer doux ou d'aimants permanents, susceptibles de varier avec le temps. Les indications obtenues avec les électrodynamomètres sont donc toujours parfaitement comparables entre elles.

II. — MESURE DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

154. — Méthodes applicables à la mesure des différences de potentiel. — On applique indistinctement aujourd'hui la méthode indirecte et la méthode de comparaison à la mesure des différences de potentiel.

L'un et l'autre de ces procédés méritent un examen spécial.

155. — Méthode indirecte. — La méthode indirecte a été jusqu'à ces années dernières à peu près exclusivement employée dans l'industrie. Son principe est le suivant.

On sait (loi d'Ohm) que la différence de potentiel e entre les extrémités d'un conducteur de résistance r parcouru par un courant d'intensité i est donnée par la relation :

$$e = ri.$$

En mesurant directement ces deux dernières quantités r et i , il est donc possible de calculer la valeur de e .

Soient en particulier A et B, deux points d'un circuit séparés par une résistance r et entre lesquels existe une différence de potentiel inconnue e (fig. 133). Plaçons entre ces points un second fil de résistance R suffisamment élevée pour que la dérivation ainsi constituée ne fasse pas varier sensiblement la valeur e de la différence de potentiel à mesurer. En déterminant à l'aide d'un ampèremètre C l'intensité i du courant qui parcourt cette dérivation, le produit de la résistance R par la valeur i trouvée repré-

sente la différence de potentiel cherchée, En d'autres termes, les indications de l'ampèremètre ainsi placé seront proportionnelles à la différence de potentiel entre A et B.

En pratique, on réunit dans un même appareil la résistance R et l'ampèremètre; on ne fait donc usage pour les opérations de ce genre que d'ampèremètres à très grande résistance, et c'est pour ce motif qu'on désigne plus spécialement ceux-ci sous le nom de voltmètres; mais il importe de bien

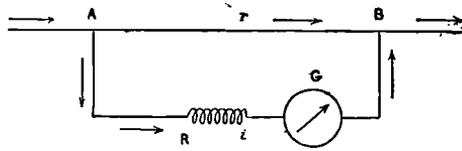


Fig. 133.

remarquer que tout ampèremètre, quel qu'il soit, est susceptible de remplir le rôle de voltmètre, à condition d'intercaler en même temps que lui, sur la dérivation, une résistance connue et suffisamment élevée.

156. — Conditions d'expérimentation relatives aux voltmètres. — Pour faciliter les mesures, on a l'habitude de graduer en volts les voltmètres. Cela revient à dire que le produit Ri y est effectué d'avance et est indiqué seul sur la graduation. Ceci suppose que la résistance R demeure toujours parfaitement constante pendant le cours des opérations.

En réalité, il n'en est pas ainsi. Sous l'influence du passage du courant, les conducteurs s'échauffent et leur résistance est modifiée.

Pour atténuer autant que possible l'erreur résultant de ce chef, on n'emploie dans la construction des voltmètres que des fils en alliages tels que le maillechort, la manganine, etc., dont la résistance varie très peu avec la température. On a également soin de ne laisser passer le courant dans les appareils qu'au moment même de la mesure et seulement pendant le temps strictement nécessaire.

Lorsqu'on désire modifier la sensibilité d'un voltmètre, il

suffit d'intercaler en série avec lui une résistance R' . La différence de potentiel cherchée est alors représentée non plus par le produit $R i$ mais par le produit $(R + R') i'$, i' étant la nouvelle valeur, moindre que i , de l'intensité dans la dérivation. Les indications du voltmètre, dans ces nouvelles conditions, correspondent donc à des différences de potentiel supérieures à celles primitivement marquées sur la graduation.

157. — Description des voltmètres. — Le voltmètre étant un ampèremètre à grande résistance, il n'existe pas de différence fondamentale entre les voltmètres et les ampèremètres qui ont déjà été décrits. En dehors du bobinage du circuit, qui comporte toujours un grand nombre de tours de fil fin, et de la graduation qui est marquée en volts, leur construction est identique.

158. — Méthode de comparaison. — Électromètres. — De même que la mesure des intensités, la mesure des différences de potentiel peut s'effectuer directement par une méthode de comparaison.

Il suffit à cet effet de disposer d'appareils susceptibles d'enregistrer directement la réaction mécanique de deux corps conducteurs portés à des potentiels différents. Ces appareils sont appelés *électromètres*.

Tout électromètre comprend essentiellement :

- 1° Une ou plusieurs parties métalliques, électrisées et fixes;
- 2° Une partie métallique électrisée, mobile.

La mise en regard de ces deux parties provoque entre elles des attractions ou répulsions électrostatiques, mesurées par la déviation de la partie mobile et qui sont une fonction de la différence de potentiel existant entre elles.

Cette fonction peut être calculée dans un grand nombre de cas.

Lorsqu'il s'agit d'instruments industriels, on s'attache à obtenir des mesures à l'aide d'une simple lecture; on gradue donc une fois pour toutes les électromètres, en les comparant avec des

appareils similaires déjà étalonnés ou par toute autre méthode. De plus, les connexions y sont établies de manière que l'action mécanique exercée sur la partie mobile soit proportionnelle au carré de la différence de potentiel mesurée. Le sens des déviations de la partie mobile est alors indépendant du sens de cette différence de potentiel. Les électromètres industriels sont par suite des appareils applicables à la mesure des courants alternatifs.

159. — **Électromètre industriel de Thomson.** — L'un des premiers types d'électromètre industriel a été imaginé par Thomson en 1886.

Dans cet appareil, la partie électrisée fixe se compose de deux quadrants métalliques ou secteurs creux A et B (fig. 134). Ces quadrants sont en communication métallique et reliés à l'un des deux points du circuit entre lesquels on désire mesurer la différence des potentiels.

La partie électrisée mobile, qui est reliée au second de ces points, est constituée par une aiguille en aluminium, affectant sensiblement la forme d'un 8 et mobile autour d'un axe horizontal qui passe par son centre. Cette aiguille porte, à sa partie supérieure, un index léger se déplaçant devant un cadre gradué et, à sa partie inférieure, un contrepoids.

Elle s'incline sous l'action des forces électriques agissant entre elle et les quadrants, jusqu'à ce que cette action soit équilibrée par celle du contrepoids. En changeant la valeur de ce dernier, on modifie donc à volonté la sensibilité de l'appareil.

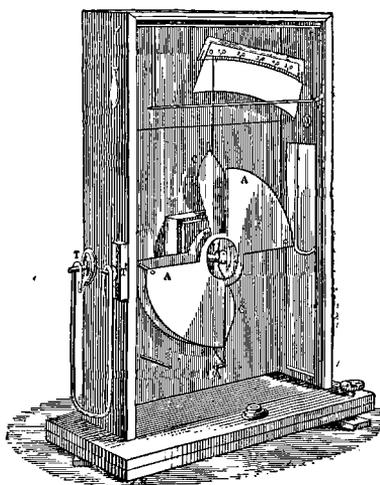


Fig. 134.

En général, trois contrepoids différents sont adjoints à l'électromètre Thomson, et, suivant que l'on se sert des uns ou des autres, les déviations de la graduation correspondent à des différences de potentiel de 50, 100 ou 200 volts.

La manœuvre d'une manette provoque l'application d'un petit trapèze métallique contre l'aiguille et permet d'arrêter les oscillations de celle-ci.

Enfin, pour éviter les contacts accidentels, les communications ne sont établies que par l'intermédiaire de tubes en U dans lesquels est un fil de coton humide de grande résistance.

160. — Électromètre apériodique de Carpentier. — L'appareil précédent a l'inconvénient d'être très peu apériodique. Un modèle d'électromètre, dû à Carpentier, échappe entièrement à ce reproche.

La partie électrisée mobile est formée, dans l'électromètre Carpentier, par un cadre rectangulaire métallique, large de 1 centi-

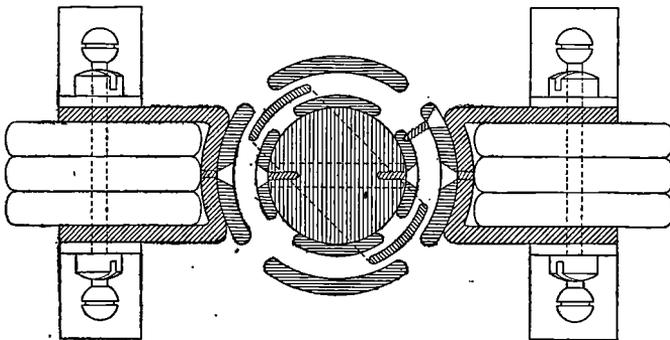


Fig. 135.

mètre environ, et dont les grands côtés ont reçu une courbure telle qu'ils puissent être considérés comme une portion de cylindre (fig. 135 et 136). La partie électrisée fixe est constituée à l'aide de deux cylindres concentriques entre lesquels se déplace la

partie mobile, suspendue elle-même par des fils métalliques très fins.

Ces cylindres sont découpés suivant deux plans rectangulaires en huit secteurs ou armatures. Les quatre secteurs intérieurs sont en fer doux. Deux des secteurs extérieurs sont également en fer doux et servent de prolongement aux pièces polaires d'un puissant aimant amortisseur.

Les quatre armatures comprises dans un même dièdre droit et le cadre mobile sont réunis électriquement. Les quatre autres armatures communiquent aussi électriquement entre elles. Chacun de ces deux groupes est mis en relation avec l'un des deux points entre lesquels on mesure la différence des potentiels.

Les lectures se font, soit au miroir, soit à l'aide d'une aiguille se déplaçant devant une graduation.

Grâce à la forme des armatures et à la présence de l'aimant permanent, il se produit dans cet appareil, comme dans le galvanomètre Deprez-d'Arsonval, un effet de puissant amortissement. Aussi l'électromètre Carpentier est-il remarquablement apériodique. Certains modèles permettent d'ailleurs de mesurer des différences de potentiel pouvant monter à 2,000 volts.

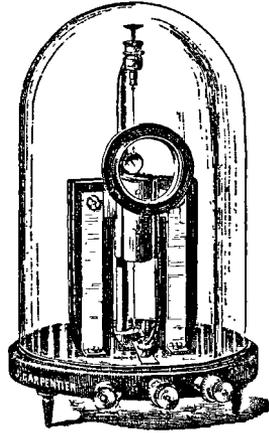


Fig. 136.

161. — Voltmètre multicellulaire de Thomson. — Récemment enfin (1891) lord Kelvin a imaginé un nouveau modèle de voltmètre qui joint à une grande facilité de manipulation l'avantage de fournir des résultats très précis.

La partie électrisée mobile du voltmètre multicellulaire comprend un certain nombre de lames (12 ou 14) parallèles entre elles et ayant une forme de lemniscate. Ces lames sont reliées les unes

aux autres par une tige verticale suspendue par un fil d'argent (fig. 137 et 138).

La tige porte en son milieu une aiguille horizontale légère, se déplaçant sur un cercle gradué, et à sa base, un disque immergé dans l'huile, chargé d'amortir les oscillations.

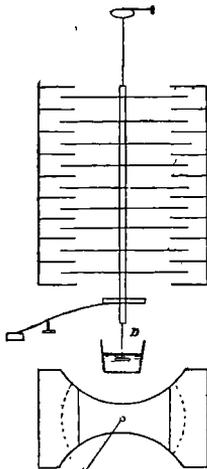


Fig. 137.

On relie l'aiguille et la masse de l'appareil d'une part, l'ensemble des lames fixes, d'autre part, à chacun des points entre lesquels on désire mesurer la différence des potentiels.

162. — Remarque sur l'emploi des électromètres. — L'emploi des électromètres présente des avantages qui justifient la faveur avec laquelle ces appareils sont accueillis aujourd'hui. Les résultats qu'ils fournissent sont très précis et ne sont pas soumis aux corrections de température comme ceux obtenus à l'aide des voltmètres.

Enfin, les électromètres permettent d'opérer la mesure des différences de potentiel, en laissant le circuit ouvert. Cette propriété est particulièrement précieuse dans l'étude de certains générateurs

Chacune des lames parallèles de l'équipage précédent est engagée entre deux paires de lames fixes constituant la partie fixe électrisée. Des dispositifs spéciaux permettent, en outre, de rendre l'appareil transportable et de ramener au zéro la position de l'aiguille mobile.

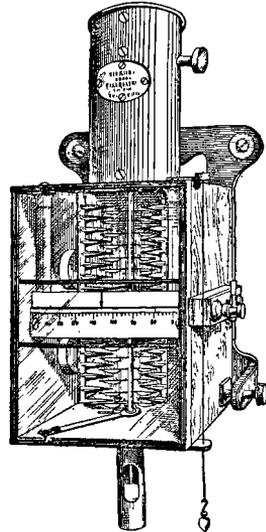


Fig. 138.

tels que les piles, dont la force électromotrice se modifie en circuit fermé (à la suite des phénomènes de polarisation).

III. — MESURES DE RÉSISTANCE

163. — Méthodes applicables à la mesure des résistances. — Un grand nombre de procédés ont été imaginés en vue de mesurer les résistances. Ils varient suivant la nature et l'ordre de grandeur des résistances étudiées.

Il est possible tout d'abord d'appliquer la méthode indirecte, en déterminant séparément l'intensité i du courant parcourant le conducteur étudié et la différence de potentiel e entre les extrémités de ce conducteur. La relation suivante, tirée de la loi de Ohm,

$$r = \frac{e}{i},$$

permet de déduire aisément de ces données, la valeur r de la résistance cherchée.

Le plus souvent toutefois, on préfère recourir à l'emploi soit d'une méthode de réduction à zéro, soit d'une méthode de comparaison. La première, plus connue sous le nom de méthode du *pont de Wheastone*, est surtout employée pour la mesure des résistances moyennes, la seconde pour celle des résistances très élevées.

164. — Méthode du pont de Wheastone. — La méthode dite du pont de Wheastone a été imaginée en 1833 par Christie. Son principe est le suivant.

Soit un quadrilatère A B C D (fig. 139), formé de quatre résistances ou *branches*, a , b , c , x , parmi lesquelles l'une, x par exemple, est la résistance à évaluer.

Deux des sommets du quadrilatère A et B sont reliés aux pôles d'une pile E, les deux autres C et D aux bornes d'un galvanomètre sensible G.

Réglons les valeurs des différentes résistances connues a , b et c , de telle sorte qu'aucun courant ne passe à travers le galvanomètre, et cherchons quelle relation doit alors exister entre ces résistances et la résistance inconnue x .

Tout d'abord, aucun courant ne traversant la dérivation CD, la totalité du courant d'intensité i parcourant la branche AC passe

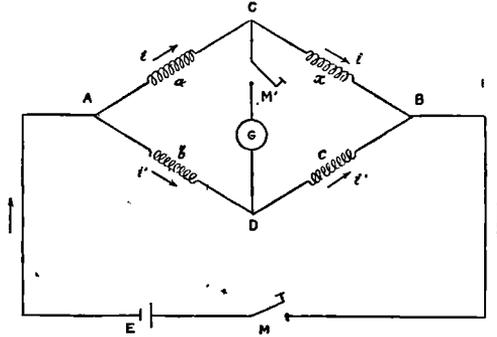


Fig. 139.

dans la branche CB. Pour la même raison, l'intensité i' du courant est la même dans les branches AD et DB.

En second lieu, les potentiels aux points C et D doivent être identiques.

Dès lors, la différence de potentiel entre A et C qui a pour valeur ai (loi de Ohm) est égale à la différence de potentiel bi' entre A et D :

$$ai = bi'.$$

De même, la différence de potentiel xi entre C et B doit être égale à celle ci' existant entre D et B :

$$xi = ci'.$$

Divisons membre à membre ces deux égalités. Il vient :

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

d'où l'on tire :

$$x = \frac{a}{b} \times c,$$

qui est précisément la relation cherchée permettant de calculer x , connaissant les trois résistances a , b et c .

Dans la pratique on dispose d'appareils permettant d'installer commodément le pont de Wheastone.

Ils sont constitués par une boîte de résistances disposée comme l'indique schématiquement la figure 140.

Deux des branches du pont AM et AN jouent le rôle des résistances a et b mentionnées plus haut. Elles comprennent chacune trois bobines ayant respectivement des résistances de 10, 100 et 1000 ohms, et sont appelées *branches de proportion*, car le rapport de leur valeur $\frac{a}{b}$ détermine l'ordre de grandeur de la valeur c à donner à la troisième branche de résistance pour obtenir l'équilibre.

Ce rapport, comme on le voit, ne peut alors avoir que les valeurs simples $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{10}$, 1, 10 et 100.

On choisit arbitrairement une de ces valeurs au moment de la mesure et l'on se contente ensuite de faire varier la troisième branche représentée par la série de bobines MB.

Cette troisième branche peut, jusqu'à ce que l'équilibre cherché ait été obtenu, fournir toutes les résistances comprises entre 1 et 10,000 ohms. Les valeurs extrêmes qui peuvent être mesurées avec un pont de ce genre sont par suite comprises entre 0^m,01 et un meghom.

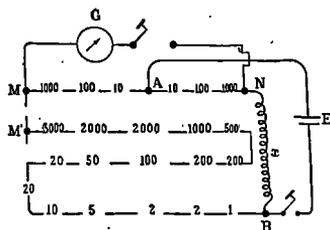


Fig. 140.

165. — Précautions spéciales à l'emploi de la méthode du pont. — Diverses précautions sont nécessaires lorsqu'on opère

une mesure par la méthode du pont, et en raison même de l'extrême précision de celle-ci.

On doit ainsi éviter l'échauffement des bobines de résistances sous l'action du passage du courant. On a soin, à cet effet, de ne laisser circuler le courant dans le pont que durant le temps strictement suffisant pour vérifier si l'équilibre cherché est atteint ou non. Une clé M (fig. 139), intercalée sur la branche de pile et manœuvrée par l'opérateur, permet d'arriver commodément à ce résultat.

Une deuxième clé M' est également placée sur la branche du galvanomètre et ne doit jamais être fermée qu'après la précédente. Il est essentiel, en effet, de n'introduire le galvanomètre que lorsque la période variable correspondant à l'établissement du courant dans le circuit, est terminée. On s'exposerait sans cela à voir le galvanomètre dévier sous l'action des courants dus à la self-induction, alors même que l'équilibre des résistances serait établi.

166. Mesure des grandes résistances. — Lorsqu'il s'agit de mesurer la résistance de corps mauvais conducteurs, l'ordre de

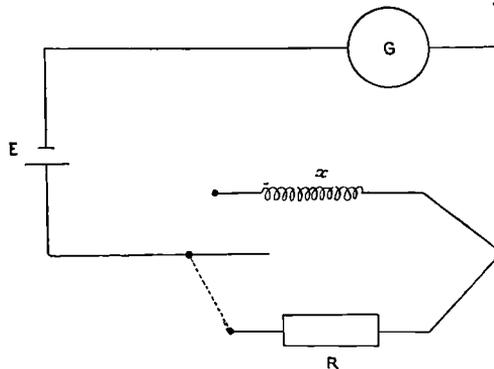


Fig. 144.

grandeur de celle-ci est généralement beaucoup trop élevé pour qu'il soit possible d'employer utilement la méthode du pont. Tel

est le cas, par exemple, lorsqu'on cherche à déterminer l'isolement d'un câble, c'est-à-dire la résistance que sa gaine isolante oppose au passage du courant.

On recourt alors fréquemment à la méthode de comparaison, Soit x la résistance inconnue, R une résistance connue.

Dans un circuit de résistance ρ comprenant une pile de force électromotrice E et un galvanomètre G (fig. 141), on intercale successivement les résistances x et R et l'on observe chaque fois les déviations α et α' du galvanomètre, déviations qui sont proportionnelles aux intensités i et i' des courants circulant dans le circuit,

La loi de Ohm fournit, dans chacun de ces cas, les relations suivantes :

$$i = \frac{E}{x + \rho} = K\alpha$$

$$i' = \frac{E}{R + \rho} = K\alpha'.$$

Divisant ces égalités membre à membre, on en déduit :

$$\frac{x + \rho}{R + \rho} = \frac{\alpha'}{\alpha},$$

équation qui permet de calculer la valeur de x , si on a eu soin de déterminer la résistance ρ à l'aide d'une mesure préliminaire effectuée dans les conditions ordinaires.

IV. — MESURE DE LA PUISSANCE ÉLECTRIQUE

167. — Méthodes applicables à la mesure de la puissance électrique. — La puissance électrique W développée dans un conducteur a pour expression :

$$W = ei,$$

e étant la différence de potentiel entre les extrémités du conducteur et i l'intensité du courant qui le traverse.

On a vu (§ 131) qu'en mesurant chacun de ces termes e et i , on peut déterminer la puissance électrique par voie indirecte.

Il existe toutefois un certain nombre d'appareils permettant d'en obtenir directement la valeur : on les désigne sous le nom de *wattmètres*.

Un wattmètre est un électro-dynamomètre dont une bobine est intercalée en série sur le circuit étudié, et dont l'autre bobine, à forte résistance, est montée en dérivation sur le même circuit.

La réaction mécanique entre les deux bobines d'un électro-dynamomètre est donnée (§ 150) par la relation

$$f = k i i',$$

i et i' étant les intensités des courants circulant dans chacune d'elles.

Dans le cas du wattmètre, l'une de ces intensités, i , est précisément celle du courant passant dans le circuit ; l'autre, i' (§ 155), est proportionnelle à la différence de potentiel e existant entre les deux points servant de prises à la dérivation :

$$i' = k' e.$$

La déviation du wattmètre est donc elle-même proportionnelle au produit $e i$, c'est-à-dire à la puissance cherchée ¹.

V. — MESURES RELATIVES AUX COURANTS ALTERNATIFS

168. — Mesure de l'intensité et du voltage efficaces. — Il résulte de la définition même de l'intensité et du voltage efficaces que ces quantités peuvent se mesurer comme l'intensité et le voltage des courants continus.

1. Les mesureurs de puissance électrique rentrent dans la catégorie des compteurs électriques. Nous renvoyons le lecteur, pour l'étude détaillée de ces appareils, à la description qui en est faite dans le volume *les Transformations de l'énergie électrique*, paru dans la même collection.

On fait usage, pour cette opération, d'ampèremètres et de voltmètres. Les uns et les autres de ces appareils doivent toutefois être tels que le sens de leurs indications ne change pas avec le sens du courant.

Les ampèremètres électro-calorifiques (voltmètre de Cardew), les électro-dynamomètres, les électromètres industriels et les galvanomètres à électro-aimant satisfont à cette condition.

En outre, parmi les appareils à fer doux (galvanomètres à électro-aimant), ceux-là seuls doivent être employés qui échappent sensiblement aux effets de l'hystérésis.

Le procédé opératoire pour la mesure de l'intensité et des différences de potentiel efficaces étant identique à celui qui est employé dans le cas du courant continu, il est inutile d'en donner une description spéciale.

169. — Mesure de la puissance efficace. — La mesure de la puissance efficace est particulièrement délicate dans le cas des courants périodiques.

Deux cas doivent être considérés, suivant que le conducteur dans lequel se développe la puissance à mesurer possède ou non un coefficient de self-induction négligeable.

Dans chacun de ces cas, la mesure de la puissance efficace présente des difficultés dont l'analyse est trop complexe pour être abordée dans cet ouvrage. On dira seulement qu'elle peut être faite soit à l'aide d'électro-dynamomètres d'un type spécial, soit à l'aide des électromètres.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
PRÉFACE.	1
INTRODUCTION	
Les unités électriques.	
1. — Les unités électriques.	3
I. — Unités mécaniques.	
2. — Définitions.	4
3. — Unités mécaniques fondamentales.	5
4. — Unités mécaniques dérivées.	5
5. — Unités mécaniques pratiques.	6
II. — Grandeurs électriques.	
6. — Notions générales sur les grandeurs électriques.	7
7. — Niveau électrique. Force électromotrice.	11
8. — Capacité électrique.	12
9. — Courant électrique.	13
10. — Travail des forces électriques.	16
11. — Puissance électrique.	18
III. — Unités électriques.	
12. — Unités électriques dérivées.	19
13. — Unités électriques pratiques.	22
IV. — Énergie.	
14. — Définition de l'énergie.	24
15. — Mesure de l'énergie.	24

	Pages.
46. — Transformations de l'énergie	25
47. — Équivalence des énergies.	26
<i>V. — Conclusion et plan de l'ouvrage.</i>	
48. — Conclusion et plan de l'ouvrage	27

PREMIÈRE PARTIE

Sources électro-chimiques d'énergie.

CHAPITRE PREMIER

PILES

19. — Piles	29
20. — Principes de la pile	29
21. — Pile de Volta.	30
22. — Piles à dépolarisant.	34
23. — Éléments du type Daniell.	35
24. — Éléments du type Bunsen	41
25. — Éléments du type Poggendorff.	42
26. — Piles à dépolarisant solide.	44
27. — Coût de l'énergie électrique fournie par les piles	47

CHAPITRE II

ACCUMULATEURS.

28. — Principes des accumulateurs.	49
29. — Généralités sur les accumulateurs	50
30. — Accumulateurs au plomb	54
31. — Formation des plaques	53
32. — Charge et décharge des accumulateurs	58
33. — Précautions à prendre dans l'emploi des accumulateurs.	64
34. — Constantes des accumulateurs	62
35. — Utilisation des accumulateurs	63

CHAPITRE III

SOURCES ÉLECTRO-CHIMIQUES DIVERSES

36. — Sources électro-chimiques	65
---	----

DEUXIÈME PARTIE

Sources électro-calorifiques d'énergie.

37. — Piles thermo-électriques.	67
38. — Rendement des piles thermo-électriques	74

TROISIÈME PARTIE

Sources électro-mécaniques d'énergie.

39. — Sources électro-mécaniques.	72
---	----

CHAPITRE PREMIER

MACHINES A FROTTEMENT ET A INFLUENCE

40. — Machines à frottement et à influence.	73
41. — Généralités sur l'électrisation.	73
42. — Électrisation par frottement	76
43. — Électrisation par influence	76
44. — Machines à frottement	78
45. — Machines à influence.	80
46. — Force électromotrice des machines électrostatiques	88

CHAPITRE II

MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

47. — Machines dynamo-électriques	88
---	----

I. — Lois générales de l'induction.

48. — Définitions	88
49. — Champ magnétique.	89
50. — Champ magnétique créé autour d'un fil parcouru par un courant.	93
51. — Cas d'un fil rectiligne et long	93
52. — Cas d'une boucle.	93
53. — Lignes d'induction	95
54. — Perméabilité	95
55. — Circuit magnétique.	97
56. — Saturation magnétique.	99
57. — Hystérésis	100
58. — Lois de l'induction.	100

	Pages.
59. — Application des lois de l'induction à divers cas particuliers.	403
60. — Réactions mécaniques	405
61. — Self-induction	407
62. — Principe des machines dynamo-électriques	409
 II. — <i>Machines à courant continu.</i> 	
63. — Machines à courant continu	410
 III. — <i>Machines unipolaires.</i> 	
64. — Machines unipolaires.	413
 IV. — <i>Machines à courants redressés.</i> 	
65. — Induits.	414
66. — Cas de l'induit élémentaire parallèle à son axe de rotation	414
67. — Induit à anneau.	418
68. — Régularisation du courant dans les induits à anneau	419
69. — Induit à tambour.	423
70. — Régularisation du courant dans les induits à tambour.	424
71. — Cas de l'induit élémentaire perpendiculaire à son axe de rotation.	425
72. — Calage des balais.	425
73. — Courants de Foucault	429
74. — Hystérésis	430
75. — Calcul de la force électromotrice d'une machine bipolaire.	430
76. — Induits multipolaires.	431
77. — Enroulement en quantité.	434
78. — Enroulement en série.	435
79. — Divers modes de production du champ	436
80. — Machines magnéto-électriques.	436
81. — Machines à excitation indépendante	436
82. — Machines auto-excitatrices	437
83. — Excitation en série.	438
84. — Excitation en dérivation	440
85. — Excitation Compound.	441
86. — Méthodes de régulation	442
87. — Régulation à la main.	443
88. — Régulation automatique.	443
89. — Accouplement des dynamos.	445
90. — Rendement industriel des machines.	446
91. — Rendement électrique des machines.	447

TABLE DES MATIÈRES.

341

	Pages.
92. — Caractéristique des machines.	447
93. — Détails de construction des machines dynamo-électriques.	448
94. — Induit.	448
95. — Collecteurs	452
96. — Balais	452
97. — Inducteurs	453
98. — Descriptions de quelques machines usuelles	455
99. — Machine Gramme	455
100. — Machine Siemens	456
101. — Machine Edison.	457
102. — Machine Rechniewski.	458
103. — Machine Siemens à induit extérieur	458
104. — Machine Desroziers	460
105. — Machine Brush.	461
106. — Machine Thomson-Houston.	462

V. — *Alternateurs. — Notions générales
sur les courants alternatifs.*

107. — Courants alternatifs.	464
108. — Intensité efficace	465
109. — Potentiel efficace	466
110. — Notions générales sur les alternateurs	468
111. — Alternateurs multipolaires.	468
112. — Groupement des sections dans les alternateurs multipolaires.	469
113. — Alternateurs polyphasés	470
114. — Captation des courants	472
115. — Excitation des inducteurs.	472
116. — Pertes dans les alternateurs	473
117. — Couplage des alternateurs	473
118. — Alternateurs à induit en anneau	475
119. — Alternateurs à induit en tambour.	477
120. — Alternateurs à disque.	478

QUATRIÈME PARTIE

Sources physiologiques d'électricité.

121. — Sources physiologiques d'électricité	484
---	-----

CINQUIÈME PARTIE

Transformateurs.

422. — Définition des transformateurs	486
423. — Transformateurs à courants alternatifs	487
424. — Bobine de Rhumkorff	488
425. — Transformateurs industriels à courants alternatifs	490
426. — Rendement des transformateurs à courants alternatifs	491
427. — Transformateurs à courant continu	492
428. — Rendement des transformateurs à courant continu	494

SIXIÈME PARTIE

Mesures.

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS SUR LES MESURES

429. — Définitions	495
430. — Méthodes de mesure directe	495
431. — Méthodes de mesure indirecte	497
432. — Quantités électriques à mesurer	497
433. — Étalons	498
434. — Étalon de force électromotrice	498
435. — Étalon de résistance	499
436. — Boîtes de résistance	200

CHAPITRE II

MESURES ÉLECTRIQUES INDUSTRIELLES

437. — Mesures électriques industrielles	202
--	-----

I. — *Mesure de l'intensité.*

438. — Méthodes applicables à la mesure des intensités	202
439. — Principes des ampèremètres	203
440. — Ampèremètres électrolytiques, électro-calorimétriques	204
441. — Ampèremètres galvanométriques	205
442. — Généralités sur les galvanomètres	205
443. — Galvanomètres à aimant permanent mobile	206

TABLE DES MATIÈRES.

343

	Pages.
144. — Galvanomètres à aimant fixe et à bobine mobile	211
145. — Galvanomètres à aimant permanent et bobine fixe	213
146. — Inconvénients des galvanomètres à aimant permanent.	214
147. — Galvanomètres à électro-aimant.	214
148. — Propriétés des galvanomètres à électro-aimant.	216
149. — Conditions d'expérimentation relatives aux galvanomètres . . .	217
150. — Généralités sur les électro-dynamomètres	218
151. — Électro-dynamomètres du type Siemens.	219
152. — Balance électro-dynamique de Thomson.	220
153. — Propriété des électro-dynamomètres.	221

II. — *Mesures des différences de potentiel.*

154. — Méthodes applicables à la mesure des différences	222
155. — Méthode indirecte	222
156. — Conditions d'expérimentation relatives aux voltmètres.	223
157. — Description des voltmètres	224
158. — Méthode de comparaison. — Électromètres	224
159. — Électromètre industriel de Thomson	225
160. — Électromètre apériodique de Carpentier	226
161. — Voltmètre multicellulaire de Thomson.	227
162. — Remarque sur l'emploi des électromètres	228

III. — *Mesures de résistance.*

163. — Méthodes applicables à la mesure des résistances	229
164. — Méthode du pont de Wheatstone	229
165. — Précautions spéciales à l'emploi de la méthode du pont	231
166. — Mesure des grandes résistances.	232

IV. — *Mesure de la puissance électrique.*

167. — Méthodes applicables à la mesure de la puissance électrique. . .	233
---	-----

V. — *Mesures relatives aux courants alternatifs.*

168. — Mesure de l'intensité et du voltage efficaces	234
169. — Mesure de la puissance efficace.	235

9640. — Lib.-Imp. réunies, MAY et MOTTELOZ, Directeurs,
7, rue Saint-Benoît, Paris.
