

P. MÉTRAL

Agrégé des Sciences Physiques,
Directeur de l'École Colbert, Membre des Commissions d'examen du professorat
des Écoles Normales et des Écoles primaires supérieures.

COURS ÉLÉMENTAIRE

d'Électricité

Industrielle

Conforme au programme des sections techniques
des écoles primaires supérieures et des écoles d'industrie.

EN VENTE A LA
Librairie générale LEICH-PUTSAGE
Rue Rogier, 18, MONS

1914

A LA MÊME LIBRAIRIE

COURS de PHYSIQUE et de CHIMIE

A L'USAGE DE L'ENSEIGNEMENT PRIMAIRE SUPÉRIEUR

Conforme aux programmes du 26 juillet 1909

Par P. MÉTRAL

JEUNES GENS

(Couverture marron).

- 1^{re} ANNÉE. 2^e édition. Un vol. in-16, avec 255 figures. . . 2 fr. 50
2^e ANNÉE. 2^e édition. Un vol. in-16, avec 293 figures. . . 3 fr. »
3^e ANNÉE. 2^e édition. Un vol. in-16, avec 314 figures. . . 3 fr. »

Ce cours est également mis en vente sous la forme suivante :

- Cours de Physique** (1^{re}, 2^e et 3^e années). 2^e édition. Un vol.
in-16, avec 612 figures, cart. toile souple 4 fr.
Cours de Chimie (1^{re}, 2^e et 3^e années). 2^e édition. Un vol.
in-16, avec 250 figures, cart. toile souple. 3 fr. 50

JEUNES FILLES

(Couverture grise).

- 1^{re} ANNÉE. 2^e édition. Un vol. in-16, avec 210 fig. 2 fr. 50
2^e ANNÉE. Un vol. in-16, avec 217 fig. 2 fr. 25
3^e ANNÉE. Un vol. in-16, avec 168 fig. 2 fr. 25

Ce cours est également mis en vente sous la forme suivante :

- Cours de Physique** (1^{re}, 2^e et 3^e années). Un vol.
in-16, avec fig., cart. toile souple 50
Cours de Chimie (1^{re}, 2^e et 3^e années). Un vol. in-16,
avec fig., cart. toile souple 3 fr. »

Tous droits de reproduction,
de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

COURS ÉLÉMENTAIRE
d'Électricité Industrielle

UVRAGES POUR L'ENSEIGNEMENT PRIMAIRE SUPÉRIEUR

Rédigés conformément aux programmes du 26 juillet 1909

Cours d'Histoire, par E. SIEURIN et C. CHABERT.

- 1^{re} année. — Histoire de France (xvi^e siècle-1789), 8^e éd. avec 171 fig. 2 fr. »
 2^e année. — Histoire de France (1789-fin du xix^e siècle), 7^e éd. avec 132 fig. 2 fr. »
 3^e année. — Le Monde au xix^e siècle, 8^e édition, avec 95 figures . . . 2 fr. »

Cours de Géographie, par MARCEL DUBOIS et E. SIEURIN.

- 1^{re} année. — Aspects du Globe. La France, 2^e éd. avec 221 fig. . . . 2 fr. 25
 2^e année. — L'Europe (moins la France), 2^e éd. avec 177 figures . . . 2 fr. 25
 3^e année. — Le Monde (moins l'Europe), 2^e éd. avec 239 figures. . . 2 fr. 25

Cartes d'Étude pour servir à l'Enseignement de l'Histoire et de la Géographie, par M. DUBOIS et E. SIEURIN.

- 1^{re} année. — I. Moyen âge et Temps modernes. — II. Principaux aspects du Globe. La France, un atlas in-4^e, avec 56 cartes et 220 cartons, 14^e édition . 2 fr. 25
 2^e année. — I. Époque contemporaine. — II. L'Europe (moins la France), un atlas in-4^e, avec 58 cartes et 220 cartons, 13^e édition . . . 2 fr. 25
 3^e année. — I. Le Monde au xix^e siècle. — II. Le Monde (moins l'Europe), un atlas in-4^e avec 58 cartes et 140 cartons, 14^e édition. 2 fr. 25

Cahiers Sieurin.

- 1^{re} année. — Principaux aspects du globe. La France, 4^e édition . . . 0 fr. 75
 2^e année. — L'Europe (moins la France). 3^e édition 0 fr. 75
 3^e année. — Le Monde (moins l'Europe). 3^e édition 0 fr. 75

Textes français (Lectures et explications) avec introduction, notes et commentaires par CH. WEVER, 3^e édition. 3 fr. »

Cours de langue française (grammaire et exercices), par Ch. WEVER. 2 fr. »

Cours d'Instruction civique, par A. MÉTIN, 3^e éd., revue . 1 fr. 50

Cours de Droit usuel, par A. MÉTIN, 4^e édition, revue. . . . 1 fr. 50

Cours d'Économie politique, par A. MÉTIN, 3^e éd., revue . 1 fr. 50

Cours d'Arithmétique, par H. NEVEU, 6^e édition 3 fr. »

Cours d'Algèbre, par HENRI NEVEU, 6^e édition. 3 fr. »

Cours de Géométrie, par H. NEVEU et H. BELLENGER.

- 1^{re} année. — 3^e édition, avec 326 figures 2 fr. »
 2^e année. — 2^e édition, avec 270 figures. 2 fr. 50
 3^e année. — 2^e édition, avec 363 figures 3 fr. »

Cours de Comptabilité, par G. FAURE, 3^e édition. 3 fr. »

Cours d'Histoire naturelle, par M. BOULE, H. LECOMTE et CH. GRAVIER.

- 1^{re} année. — 4^e édition, avec 363 figures 2 fr. 25
 2^e année. — 3^e édition, avec 476 fig. et 7 planches hors texte en coul. 3 fr. »
 3^e année. — 3^e édition, 1 vol. avec 488 figures. 3 fr. »

Notions de Technologie, par H. GIBERT, avec 362 figures. . 5 fr. »

12 Leçons d'Hygiène, par les D^{rs} WURTZ et H. BOURGES. . . 2 fr. »

Traité pratique de Composition décorative (Jeunes Filles), par H. FRECHON, 2^e édition. 1 vol. in-4 avec planches 3 fr. 50

Traité théorique et pratique de Travaux à l'aiguille, par H. FRECHON. 1 vol. in-4 avec planches 3 fr. 50

PRÉFACE

Ce livre a été écrit en prenant pour guides les programmes des sections industrielles des Écoles primaires supérieures et des Écoles pratiques d'industrie ; il s'adresse donc spécialement aux élèves de ces établissements dont le but est de donner une instruction pratique aux « sous-officiers » de notre industrie nationale.

Il est destiné, également, aux nombreux auditeurs des divers cours techniques et à tous ceux qui, très nombreux aujourd'hui, cherchent à s'élever dans leur profession par une compréhension plus complète du fonctionnement et de la construction des appareils et des machines qu'ils ont à conduire ou à fabriquer.

Les faits théoriques et les lois fondamentales sont exposés d'une manière simple, et cependant assez complète, en utilisant, au point de vue mathématique, les notions élémentaires que l'on enseigne dans les Écoles dont on a parlé plus haut : arithmétique, algèbre (jusqu'au 2^e degré).

L'exposition est fréquemment simplifiée, surtout dans l'étude du courant alternatif, par l'emploi des graphiques.

On a dû, pour ne pas surcharger l'ouvrage, être assez bref sur les descriptions de nombreux petits appareils d'un usage courant ; les schémas que l'on trouvera suffisent, lar-

gement, à faire comprendre les modèles très variés des différents constructeurs.

On a donné, à l'étude du courant alternatif, une importance un peu plus grande que celle indiquée par les programmes; ce développement a paru indispensable à l'heure où le courant alternatif tend à se substituer, dans un grand nombre d'installations, au courant continu, moins économique.

Certaines questions, plus délicates, ou moins importantes, ont été imprimées en petit texte : on pourra les négliger à la première lecture.

Tous ceux qui ont enseigné sont unanimes à reconnaître la nécessité des applications numériques; de nombreux exemples ont été traités dans le texte et des exercices variés ont été proposés à la fin de chaque chapitre. Afin de faciliter le travail à ceux qui étudient seuls, on a résolu sommairement un certain nombre de ces exercices; d'autres sont suivis simplement du résultat; enfin, une troisième catégorie d'énoncés ne comportent aucune indication. Les exercices précédés du signe * sont d'une résolution un peu plus difficile et ne doivent être abordés que par les lecteurs qui ont déjà un certain entraînement.

Notre but sera atteint si ce modeste ouvrage peut faciliter le travail des élèves et leur donner le goût et le désir d'approfondir une science dont les applications ont modifié d'une façon si prodigieuse l'industrie moderne et qui est loin d'avoir épuisé son pouvoir de progrès. M. P.

COURS ÉLÉMENTAIRE

d'Électricité Industrielle

CHAPITRE PRÉLIMINAIRE

MATIÈRE ET ÉNERGIE — UNITÉS CONSERVATION DE L'ÉNERGIE (1)

1. **Matière. — Masse. — Unité de masse.** — Dans toutes les transformations ou *phénomènes* dont nous sommes témoins, il y a lieu de considérer la *matière* et l'*énergie*.

La notion de matière n'a pas besoin d'être définie; on peut cependant dire que la matière est ce qui constitue les corps solides, liquides ou gazeux que nous connaissons.

L'évaluation des quantités de matière se comprend assez simplement pour des corps de même espèce: il est naturel de dire que deux morceaux de plomb, ayant même volume, contiennent la même quantité de matière. Si l'on suspend, successivement, ces deux morceaux de plomb à un dynamomètre ou à une balance, on constate qu'ils ont même poids.

Si l'on considère des morceaux de plomb dont les volumes sont 2, 3, 4... fois plus grands que le précédent, on vérifie que les poids sont aussi 2, 3, 4... fois plus grands que celui du premier bloc de métal: nous aurons 2, 3, 4... fois plus de matière (de plomb).

Mais, à *moins de faire une convention*, nous ne pouvons pas comparer les quantités de matière contenues dans des corps d'espèces différentes; on est convenu d'étendre à ce cas ce qui est évident

1. Ce chapitre forme un résumé des principes fondamentaux de la mécanique; le lecteur qui possède suffisamment ces notions pourra passer de suite au chapitre suivant.

pour des corps de même espèce; on dira donc que deux *corps quelconques* qui ont même poids, *dans un même lieu*, contiennent des quantités de matière égales, ou mieux, qu'ils ont *même masse*. Des corps dont les poids sont 2, 3, 4... fois plus grands ont aussi des masses qui sont 2, 3, 4... fois plus grandes. **Les quantités de matière, ou masses des corps, sont donc proportionnelles à leurs poids, dans un même lieu.**

On prend comme unité de masse (ou unité de quantité de matière) la masse du cm^3 d'eau pure à la température de 4° et on l'appelle le *gramme-masse*¹ (ou simplement *gramme*, quand il ne peut y avoir de confusion avec le *gramme-poids*). On utilise, d'ailleurs, les mêmes multiples et sous-multiples que pour les poids.

2. Différence entre le poids et la masse. — Unités de force. — Tous les corps sont soumis à l'action de la pesanteur, c'est-à-dire qu'ils sont attirés par la Terre : s'ils sont abandonnés à eux-mêmes, à une certaine distance du sol, la force attractive que la Terre exerce sur eux produit leur chute; s'ils sont placés sur un support assez résistant, ils ne tombent pas, mais ils exercent une pression sur leur support.

On appelle poids d'un corps la valeur de la force attractive que la Terre exerce sur lui. Il ne faut donc pas confondre le poids et la masse : un dm^3 d'eau, si la température est 4° , a une masse de 1 kilogramme-masse et la Terre exerce sur lui une force attractive égale à un kilogramme-poids.

La masse d'un corps ne change pas si on le déplace à la surface de la Terre puisqu'il y a toujours la même quantité de matière; il n'en est pas de même du poids. L'action attractive de la Terre n'est pas uniforme sur toute sa surface, elle est plus grande au voisinage du Pôle qu'à l'Équateur; dans un même lieu, elle diminue légèrement quand on s'élève au-dessus du sol.

Unités de force ou de poids. — Dans les applications industrielles, on utilise, ordinairement, comme unité de poids ou de force, le *kilogramme-poids*, c'est-à-dire le poids d'un dm^3 d'eau pure à 4° . Il est aisé de voir, d'après ce qui précède, que cette unité

1. La définition légale (loi du 5 juillet 1903) est un peu différente : le gramme est la $\frac{1}{1000}$ partie d'une masse de platine iridié, déposée au Bureau International des Poids et Mesures; cette masse est appelée le kilogramme. Cette masse est pratiquement égale à la masse du dm^3 d'eau pure à 4° (elle en diffère de quelques milligrammes).

n est pas bien définie, puisqu'elle varie d'un lieu à un autre. — Pour que l'unité de force fût bien définie, il faudrait préciser que l'on prend le kg de Paris, par exemple. — Le kg à l'Équateur vaut $\frac{978}{981}$

de celui de Paris et le kg au Pôle vaut $\frac{983}{981}$ de celui de Paris.

Les physiciens et les électriciens emploient comme unité de force la *dyne* qui vaut $\frac{1}{981}$ du poids du gramme à Paris : cette unité est ainsi parfaitement définie. Le poids du kg à Paris vaut, évidemment, 981 000 dynes. Le poids du kg au Pôle vaut 983 000 dynes, et, à l'Équateur, 978 000 dynes.

3. *Mesure des forces et des masses.* — On sait que l'on mesure les forces à l'aide des *dynamomètres* et que ces instruments sont basés sur la déformation élastique d'un ressort d'acier. Les dynamomètres sont gradués à l'aide de poids, ils portent, ordinairement, une division en kg. L'unité employée dans ce cas, est le poids du kg dans le lieu où l'on a fait la graduation. Un dynamomètre assez sensible permettrait de constater les variations de poids qu'éprouve un corps lorsqu'on se déplace à la surface de la Terre. Les dynamomètres n'ont pas, en général, une sensibilité suffisante pour faire cette vérification.

Les dynamomètres peuvent servir à évaluer le *poids absolu* d'un corps, c'est-à-dire la force attractive que la Terre exerce sur lui. Il n'en est pas de même de la balance; elle mesure le *poids relatif*, c'est-à-dire le rapport du poids d'un corps au poids du gramme dans le lieu où l'on fait la pesée. Si, par exemple, on a trouvé, à la balance 25 g. pour le poids d'un corps, cela veut dire que ce corps pèse 25 fois le poids du gramme dans le lieu où se fait la pesée. D'ailleurs, si l'on répète l'opération dans un autre lieu, on trouve encore 25 g; le poids du corps a bien changé, mais le poids du gramme a varié aussi dans le même rapport et le corps pèse encore 25 fois plus que le gramme.

Il résulte de ce qui a été dit au n° 1 que la *balance mesure les masses des corps*, puisqu'elle donne, en tout point de la Terre, le rapport du poids d'un corps au poids du gramme dans le même lieu. Si le résultat d'une pesée donne 25 g, on devra dire que la masse du corps est 25 grammes-masse. Pour avoir le poids absolu, qui dépend du lieu et qu'on évalue en dynes, il faut connaître le poids du gramme dans le lieu considéré. Si la pesée est faite à Paris, où le poids du gramme est 981 dynes, le poids du corps est $981 \times 25 = 24525$ dynes.

A l'Équateur, où le poids du gramme est 978 dynes, le poids du corps serait $978 \times 25 = 24\,450$ dynes⁽¹⁾.

D'une manière générale, si m^g est la masse d'un corps et si l'on représente par g le poids du gramme en ce lieu, le poids du corps est donné par la formule :

$$P_{\text{dynes}} = m \times g \text{ (}^2\text{)}.$$

Conservation de la matière. — Lavoisier a établi, à l'aide de la balance, que, dans tous les phénomènes physiques ou chimiques, il y a conservation de la matière (ou de la masse).

4. Travail. — Unités. — Système C. G. S. — Lorsqu'une force est employée à vaincre une résistance, on dit qu'elle *travaille* ou qu'elle effectue un *travail*. On prend pour mesure du travail d'une force le produit de son intensité par la longueur du chemin parcouru, pourvu que celui-ci soit dans la direction de la force⁽³⁾.

L'unité de travail dépend du système d'unités que l'on emploie. Nous appellerons, pour abrégé, *système français* ou *système des mécaniciens*, le système d'unité dans lequel on emploie comme unité de force le kg et comme unité de longueur le mètre. Dans le *système C. G. S.* (centimètre, gramme, seconde), on utilise comme unité de force la dyne, comme unité de longueur le cm. — L'unité de masse dans ce cas est le gramme-masse. — Les deux systèmes utilisent la même unité de temps, la seconde.

Dans le système des mécaniciens, l'unité de travail est le travail d'une force de 1 kg qui se déplace de 1 m. dans sa direction; cette unité est appelée *kilogrammètre* (kgm). Dans le système C. G. S. l'unité de travail est le travail de 1 dyne qui se déplace de 1 cm dans sa direction; cette unité, assez petite, est appelée *erg*.

L'erg est trop petit pour être employé dans la pratique industrielle, l'unité pratique des électriciens est un multiple de l'erg appelé *joule* qui vaut 10^7 ergs, $10\,000\,000$ d'ergs.

1. Le poids du g en un lieu est exprimé par le même nombre que l'accélération de la pesanteur en ce lieu : cette accélération, que l'on représente par g , étant évaluée en cm par seconde. A Paris $g = 981$ cm par seconde. La formule $P = mg$ est d'ailleurs un cas particulier de l'équation fondamentale de la mécanique; $F = mj$, dans laquelle m est la masse d'un corps, F la force qui lui est appliquée et j l'accélération du mouvement que prend le corps sous l'action de la force F .

2. Dans le système des mécaniciens, on démontre que la masse d'un corps a pour mesure le quotient du poids exprimé en kilog., par 9,81.

3. Pour les autres cas, voyez *Cours de Physique*, 3^e année.

Rapport du kgm au joule. — 1 kgm est égal au travail d'une force de 1 kg qui se déplace de 1 m dans sa direction; or, 1 kg = 981 000 dynes et 1 m = 100 cm on peut donc écrire :

$$1^{kgm} = 981\,000 \text{ dynes} \times 100 \text{ cm} = 98\,100\,000 \text{ ergs} = 9 \text{ joules}, 81,$$

puisque 1 dyne qui se déplace de 1 cm produit 1 erg et que 1 joule vaut 10^7 ergs.

On voit que le *kgm* vaut un peu moins de 10 joules. Le joule est équivalent au travail que l'on effectue en soulevant 1 kg à une hauteur de $\frac{1^m}{9,81} = 0^m,102$.

5. Puissance. — Unités. -- On appelle puissance d'une machine la quantité de travail qu'elle peut fournir par unité de temps. Dans le système des mécaniciens, l'unité naturelle devrait être la puissance d'un moteur qui produit 1 kgm par seconde, mais on utilise ordinairement le *cheval-vapeur* qui est 75 fois plus grand : le *cheval-vapeur* (souvent représenté par HP) est donc la puissance d'un moteur qui fait 75 kgm par seconde (1).

Dans le système C.G.S., l'unité naturelle de puissance serait l'erg par seconde; cette unité est trop petite pour être utilisée. On emploie le *Watt* (2) qui est la puissance d'un moteur produisant un travail de 1 joule par seconde. Le *kilowatt*, très usité dans l'industrie électrique, vaut 1 000 watts.

Rapport des unités de puissance. — 75 kgm valent $9^j,81 \times 75 = 736$ joules. Si ce travail est effectué en 1 seconde, il correspond à une puissance de 1 cheval-vapeur et, comme 736 joules par seconde représentent une puissance de 736 watts, on a :

$$1 \text{ HP} = 736 \text{ watts.}$$

On a évidemment :

$$1 \text{ kilowatt} = 1\,000 \text{ watts} = \frac{1\,000}{736}, \text{ ou } \frac{4}{3} \text{ de HP environ.}$$

1. Le nombre 75 n'étant pas une puissance de 10, on a proposé de le remplacer par le Poncelet de 100 kgm par seconde; cette unité n'est guère usitée.

2. On remarquera que l'on donne, fréquemment, aux unités le nom de savants illustres : Watt (1736-1819) est un ingénieur anglais qui a rendu pratique la machine à vapeur,

Joule (1818-1889) est un physicien anglais qui est surtout connu pour la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur et par ses travaux sur la chaleur dégagée dans les conducteurs parcourus par le courant électrique.

6. **Remarque.** — **Autres unités pratiques.** — On emploie souvent, dans l'industrie, des unités de travail dont le nom composé est formé du nom d'une unité de puissance et du nom d'une unité de temps.

Le *cheval-heure* est le travail produit par un moteur de 1 cheval-vapeur qui travaille pendant 1 heure ou 3600^s; il vaut donc :

$$75^{\text{kgm}} \times 3\,600 = 270\,000 \text{ kgm.}$$

Le *watt-heure* vaut 5 600 joules.

L'*hectowatt-heure*, vaut 100 fois plus, 560 000 joules.

L'énergie électrique se paie à l'hectowatt-heure (0 fr. 07 à Paris).

7. **Énergie mécanique.** — **Énergie cinétique.** — Le travail est une grandeur très importante, car la notion de travail sert à définir la notion d'*énergie*. On dit qu'un corps ou qu'un système de plusieurs corps possède de l'énergie, lorsqu'il est capable de fournir du travail et l'on prend pour mesure de cette énergie la quantité de travail qui lui correspond. Il résulte de là que l'énergie s'évalue avec les mêmes unités que le travail : kilogrammètre, erg, joule, etc.

Un corps en mouvement, animé d'une certaine vitesse, possède une certaine quantité d'énergie, car il peut vaincre une résistance et lui faire effectuer un certain travail. Exemple : un marteau, animé d'une certaine vitesse, qui frappe sur un clou, l'enfonce dans une planche malgré la résistance que celle-ci offre au clou; un boulet qui frappe un obstacle peut s'enfoncer d'une certaine quantité malgré la résistance de l'obstacle.

Dans le premier exemple, l'énergie du marteau s'est transformée en travail; si F est la force moyenne que la planche oppose au clou et l la longueur dont il s'est enfoncé, le travail produit (égal au produit de la force par le chemin (4), est égal à $F \times l$; ce travail mesure l'énergie du marteau, pourvu que toute cette énergie se soit transformée en travail (voy. plus loin n° 10). On démontre, en mécanique, que cette énergie⁽¹⁾ est égale à $\frac{1}{2} m v^2$, m étant la masse du marteau et v sa vitesse.

On appelle *énergie cinétique* ou *énergie actuelle*; ou encore *force vive* d'un corps en mouvement, la quantité $\frac{1}{2} m v^2$: demi-produit de la masse par le carré de la vitesse. Cette énergie s'évalue avec les unités de travail.

1. Voy. *Cours de Physique*, notions de mécanique, pour plus de détails sur toutes ces questions.

Exercice numérique. — Quelle est la valeur de l'énergie cinétique d'un boulet pesant 10 kg, sa vitesse étant 200^m par seconde?

1° *Faisons le calcul dans le système C.G.S.* — La masse du boulet est 10 000 grammes-masse, sa vitesse est 20 000 cm, la force vive est donc :

$$\frac{1}{2} 10\,000 \times 20\,000^2 = 2\,000\,000\,000\,000 \text{ ergs} = 2 \cdot 10^{12} \text{ ergs } (1)$$

et comme le joule vaut 10⁷ ergs

$$2 \cdot 10^{12} \text{ ergs} = 2 \cdot 10^5 \text{ joules} = 200\,000 \text{ joules.}$$

Le résultat en kgm est $\frac{2 \cdot 10^5}{9,81} = 20\,387 \text{ kgm.}$

2° *Le problème peut se résoudre dans le système que nous avons appelé système des mécaniciens.* — Dans ce système, la masse d'un corps s'obtient en divisant son poids exprimé en kg par 9,81 (p. 4, note 2) et la vitesse s'évalue en mètres par seconde. Donc :

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \frac{10}{9,81} \times 200^2 = 20\,387 \text{ kgm.}$$

Pour avoir le résultat en joules, il suffirait de multiplier par 9,81 ce qui donnerait 200 000 joules, environ.

Autre exemple d'énergie cinétique. — Volant. —

Le volant (fig. 1) d'une machine à vapeur contient, pendant la marche, une grande quantité de force vive ou énergie cinétique; si on supprime l'arrivée de la vapeur, la machine marche encore un certain temps, jusqu'à ce que le travail des frottements ait consommé la force vive qui était emmagasinée dans le volant.

Le rôle du volant dans les machines est de régulariser le mouvement; à cause de sa très grande masse, il s'oppose aux variations brusques de vitesse.

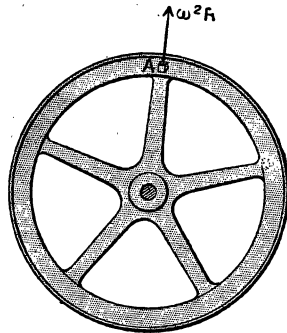


Fig. 1. — Volant.

1. On abrège l'écriture de cette manière lorsque les nombres sont très grands $10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$.

Il est bon de remarquer que les différents points d'un volant — et d'une manière générale, d'un corps qui tourne. — n'ont pas la même vitesse : ceux qui sont près du centre ont une vitesse plus petite que ceux qui sont voisins de la circonférence ; il résulte de là une certaine difficulté pour le calcul de la force vive du volant. Si presque toute la masse était concentrée sur la jante, la force vive aurait pour valeur approchée $\frac{1}{2} m v^2$; m étant la masse du volant et v la vitesse à la circonférence ⁽¹⁾.

8. Énergie potentielle. — Conservation de l'énergie mécanique. — On dit qu'un corps possède de l'énergie potentielle, lorsqu'il contient une certaine quantité d'énergie par suite de la position qu'on lui fait occuper dans le milieu où il est plongé. Exemple : une masse d'eau placée dans un réservoir à une certaine hauteur ; si on la fait couler, elle produira du travail : elle pourra servir à faire tourner une turbine. L'énergie qui est ici disponible, et qu'on pourra utiliser quand on voudra, est appelée énergie potentielle ou énergie de position.

Cette énergie qui est ainsi en réserve est égale au travail qu'on a dépensé pour porter l'eau du niveau du sol jusqu'à la hauteur du réservoir, elle est donc égale au poids de l'eau multiplié par cette hauteur.

Comme autre exemple d'énergie potentielle, nous pouvons citer un ressort qui a été tendu : si on l'abandonne à lui-même, il pourra produire du travail. C'est ainsi que le ressort d'une montre qui a été tendu peut mettre le mécanisme en mouvement pendant un certain temps.

Lorsque l'énergie potentielle d'un corps ou d'un système de corps diminue, elle est remplacée par une quantité équivalente d'énergie cinétique de sorte que *l'énergie totale, somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique, reste constante pourvu que le corps (ou le système de corps) n'emprunte rien ou ne cède rien au milieu extérieur. Il y a donc conservation de l'énergie totale dans les transformations mécaniques pour un système de corps qui n'emprunte rien ou ne cède rien au milieu extérieur.*

1. Plus exactement, on démontre que cette force vive a pour valeur $\frac{1}{2} I \omega^2$; ω étant la vitesse angulaire, c'est-à-dire la vitesse d'un point placé à la distance 1 de l'axe et I étant une certaine grandeur appelée moment d'inertie dont la grandeur dépend de la forme du volant.

Exemple : prenons une bille élastique placée à une hauteur h .^m au-dessus du sol et soit P kg son poids; l'énergie potentielle qu'elle tient en réserve est $P \times h$ kgm. Si nous la laissons tomber, et que nous la considérons à l'instant où elle est à la distance h' du sol, elle possède de l'énergie sous les deux formes : elle contient encore une provision d'énergie potentielle égale à Ph' et, comme elle a une vitesse, elle possède aussi de l'énergie cinétique; on démontre, en mécanique, que cette énergie cinétique a pour valeur $P(h - h')$ (1) de sorte que la somme $Ph' + P(h - h') = Ph$ est constante.

A mesure que la bille descend, son énergie potentielle diminue et se trouve remplacée par une quantité équivalente d'énergie cinétique. Lorsque la bille touche le sol, il n'y a plus que de l'énergie cinétique. Si la bille et le sol sont *parfaitement élastiques*, la bille rebondit à son point de départ et, pendant qu'elle s'élève, sa vitesse diminue ainsi que son énergie cinétique, mais la quantité d'énergie cinétique qu'elle perd est compensée par l'accroissement de l'énergie potentielle. Avec une bille et un sol parfaitement élastiques et s'il n'y avait pas à vaincre la résistance de l'air, le mouvement d'ascension et de descente durerait indéfiniment, à cause de la conservation de l'énergie totale. En réalité, on sait qu'une telle bille remonte, chaque fois, à un niveau moins élevé que le précédent et il semble y avoir perte d'énergie : l'énergie qui manque a été cédée à l'air qui s'oppose au mouvement, une autre partie peut être transformée en chaleur si le corps est imparfaitement élastique. Mais si nous envisageons le système plus étendu : bille, air, sol, la quantité totale d'énergie n'a pas changé.

9. Conservation du travail dans les machines. —

Rendement. — On appelle machine tout appareil destiné à transformer de l'énergie; les plus anciennes transforment le travail d'un moteur en un autre travail; la machine à vapeur, les moteurs à gaz ou à essence transforment la chaleur en énergie mécanique; les machines électriques transforment l'énergie électrique en travail ou inversement.

Considérons une machine de la première espèce : on lui fournit du travail à l'aide d'un moteur et elle doit vaincre certaines forces

1. On démontre qu'un corps qui tombe d'une hauteur $h - h'$ a pour vitesse $v = \sqrt{2g(h - h')}$ de sorte que $\frac{1}{2} m v^2 = \frac{P}{g} \times 2g(h - h') = P(h - h')$. — On sait que la masse $m = \frac{P}{g}$ (3) —

résistantes dont le travail est appelé le travail résistant. Si l'on évalue d'une part le travail fourni, le *travail moteur*, et d'autre part le *travail utile* recueilli, on trouve que :

$$\text{Travail utile} < \text{travail moteur.}$$

Il semble que le principe de la conservation de l'énergie soit en défaut. Mais, si nous observons plus attentivement, nous voyons que toute machine, quelle que soit la perfection de sa construction, comporte des *résistances passives*, c'est-à-dire des forces qui s'opposent à son mouvement sans effet utile tels sont : le frottement, la résistance de l'air, etc.... Si l'on calcule le travail de ces résistances passives. On trouve que :

$$\text{Travail moteur} = \text{Travail utile} + \text{travail des résistances passives.}$$

ou
$$\text{Travail moteur} = \text{Travail résistant total.}$$

On appelle rendement d'une machine le rapport du travail utile au travail moteur.

$$\text{Rendement} = \frac{\text{travail utile}}{\text{travail moteur.}}$$

Pour une bonne machine, ce rendement ne dépasse pas 0,80.

10. Transformation de l'énergie mécanique en chaleur. — Équivalent mécanique de la calorie. —

Le travail dépensé dans une machine pour vaincre les frottements ne se retrouve pas sous forme d'énergie mécanique, puisque le frottement diminue la vitesse et peut produire l'arrêt si on supprime le travail moteur. Il y a donc perte d'énergie mécanique, mais cette perte est toujours accompagnée de la production d'une certaine quantité de chaleur. Il est naturel d'admettre que l'énergie mécanique s'est transformée en chaleur et que la chaleur est une forme particulière d'énergie. Si cette manière de voir est exacte, une même quantité de travail, quelle que soit la façon dont elle disparaît, doit être remplacée par une quantité de chaleur déterminée, c'est-à-dire qu'il doit y avoir un rapport déterminé entre la quantité d'énergie mécanique et la quantité de chaleur correspondante ; ce rapport est appelé *équivalent mécanique de la calorie* ⁽¹⁾ (on dit aussi, mais c'est moins correct, *équivalent mécanique de la chaleur*). Des expériences très nombreuses, extrêmement variées, ont montré qu'il faut dé-

1. La première détermination directe de ce nombre a été faite par Joule en 1843.

penser 426 kgm pour obtenir une grande calorie ⁽¹⁾ ou $0^{\text{gcm}}, 426$ pour une petite calorie.

Or $0^{\text{gcm}}, 426$ valent $9,81 \times 0,426 = 4^{\text{joules}}, 18$.

L'équivalent mécanique de la grande calorie, exprimé en kgm, est donc 426.

Les électriciens emploient plus souvent l'équivalent mécanique de la petite calorie, $4^{\text{joules}}, 18$.

Il est bon de remarquer que, si l'on avait choisi pour mesurer les quantités de chaleur la quantité de chaleur qui correspond à 1 joule, par exemple, le nombre qui exprime une quantité de chaleur et celui qui exprime le travail correspondant seraient égaux : la valeur numérique de l'équivalent mécanique dépend du choix des unités.

Les résultats que nous venons d'expliquer forment ce qu'on appelle le *principe de l'équivalence de la chaleur et du travail*.

11. Transformation de la chaleur en travail. — Impossibilité d'une transformation complète. — Rendement théorique d'une machine thermique. —

Inversement, on peut transformer la chaleur en travail; c'est ce qu'on réalise avec les machines thermiques : machine à vapeur, moteurs à gaz, à essence, etc. Il y a bien encore, dans ce cas, équivalence, c'est-à-dire que, si l'on transforme en travail une grande calorie, on recueille 426 kgm (ce résultat a été vérifié par Hirn sur une machine à vapeur). Mais la transformation ne se fait pas comme la transformation inverse; en effet, il est possible de transformer *complètement* en chaleur une certaine quantité donnée de travail (ceci se produit, par exemple, dans une machine qu'on arrête à l'aide de freins : toute l'énergie cinétique est transformée en chaleur par le frottement); or, *il n'est pas possible de transformer complètement en travail une quantité donnée de chaleur* : on ne peut en transformer qu'une partie, l'autre reste sous forme de chaleur.

Sadi Carnot a remarqué que dans toute machine thermique il y a une source chaude et une source froide; par exemple dans une machine à vapeur, la vapeur prend une certaine quantité de chaleur, Q calories, à la chaudière (source chaude), elle travaille dans le cylindre en se refroidissant et se liquéfie dans le condenseur ou dans l'atmosphère (source froide) en restituant Q' calories. On n'a transformé, en travail, que $Q - Q'$ calories. On augmente le rendement, en travail, en élevant la température de la source chaude. Pour

1. Rappelons qu'on appelle grande calorie la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température d'un kg d'eau. — La petite calorie correspond au gramme et vaut 1000 fois moins.

cette raison, les machines à haute pression, pour lesquelles la température de la chaudière est plus élevée, utilisent mieux la chaleur.

On appelle rendement théorique d'une machine thermique le rapport de la quantité de chaleur transformée en travail à la quantité fournie par la source chaude. Avec les lettres employées ci-dessus, le rendement a pour valeur $\frac{Q' - Q}{Q}$. Sadi Carnot a montré que, quel que

soit le type de machine considéré, ce rendement est égal à $\frac{T - T'}{T}$,

T est la *température absolue* de la source chaude et T' celle de la source froide. — On appelle température absolue la température ordinaire augmentée de 273° (le zéro absolu étant à — 273°). Pour une machine à vapeur qui fonctionne entre 151° et 40° ou 424° (1) absolus et 513° absolus, le rendement théorique est $\frac{424 - 513}{424} = 0,26$.

C'est-à-dire que cette machine, supposée absolument parfaite, ne peut transformer en travail que les 0,26 de la chaleur prise à la chaudière; une machine ordinaire donne un rendement plus petit, voisin de la moitié du rendement théorique.

12. **Autres formes de l'énergie.** — Jusqu'ici, nous n'avons parlé que de deux sortes d'énergie : l'énergie mécanique et la chaleur; il existe d'autres formes que l'on étudie dans les sciences physiques et chimiques : l'énergie électrique dont nous allons étudier dans ce volume les transformations; l'énergie des radiations lumineuses ou calorifiques, l'énergie chimique. Toutes ces formes d'énergie peuvent se transformer les unes dans les autres et obéissent au principe de la *conservation de l'énergie*, c'est-à-dire que, si l'on évalue avant une transformation l'énergie totale d'un système, toutes les quantités étant évaluées en unités de travail, on trouve, après la transformation, des énergies d'une autre espèce, mais si l'on calcule leur équivalent en travail, on obtient le même nombre qu'avant la transformation.

13. **Dégradation de l'énergie.** — De ce qui a été dit au n° 11, il résulte que la chaleur est une espèce d'énergie moins parfaite que le travail, puisqu'elle ne se prête pas complètement à une transformation en énergie mécanique. Elle ne peut pas non plus être transformée complètement en énergie électrique; elle est donc d'un « grade » moins élevé, dans la classification des formes d'énergie, elle est une forme d'énergie de qualité inférieure, au point de vue

1. 151° centigrades correspondent à 151 + 273 = 424° absolus.

des transformations. C'est pour cette raison que l'on dit que la transformation d'une certaine énergie en chaleur est une *dégradation*.

Or, dans toutes les transformations d'énergie que nous réalisons, il y a toujours apparition d'une certaine quantité de chaleur : dans les transformations d'énergie mécanique les frottements, les chocs produisent de la chaleur; dans l'utilisation de l'énergie électrique, les conducteurs s'échauffent par le passage du courant, etc...

Cette quantité de chaleur, qui ne peut pas être complètement transformée en une autre forme d'énergie, représente en réalité une perte de notre pouvoir de transformation; c'est ce qu'on exprime en disant que *dans toutes les transformations il y a une certaine quantité d'énergie qui se dégrade*. Une machine est d'autant plus parfaite qu'elle dégrade moins d'énergie.

En résumé, il y a bien conservation de l'énergie totale dans un système, mais chaque transformation nouvelle se *paie* par la dégradation d'une partie de l'énergie et le système n'a pas la même valeur utilisable après la transformation.

Tableau résumé des unités mécaniques.

Unités de force ou de poids :	} dyne. kg = 981 000 dynes à Paris.		
Unité de masse.....		gramme-masse (1).	
Unités de travail.....	} erg. joule = 10 ⁷ ergs. kgm = 9 ^{joules} ,81. watt-heure = 3 600 joules. hectowatt-heure = 360 000 joules. kgm = 9 ^{joules} ,81. cheval-heure = 270 000 kgm.		
Unités de puissance.....		} watt = 1 joule par seconde. kilowatt = 1 000 joules par seconde. cheval-vapeur = 75 kgm par seconde = 736 watts = 3/4 de kw.	
Équivalent mécanique de la grande calorie			= 426 kgm.
— — de la petite calorie			= 4 ^{joules} ,18.

1. Dans le système des mécaniciens l'unité de masse est égale à la masse du corps dont le poids est 9^{kg},81 et la masse d'un corps s'obtient en divisant le poids, exprimé en kg par 9,81.

EXERCICES

1. Une masse d'eau de 3 m³ tombe d'une hauteur de 12^m,5, quelle est la quantité de travail correspondante? Donner le résultat en kgm et en joules.

R. 37 500 kgm. ; 367 875 joules.

2. Quelle est la puissance d'une chute d'eau qui débite 1500 lit. par seconde; la hauteur de chute est 20 m? Évaluer en kw et en chevaux-vapeur.

R. 400 H.-P. ; 294,4 kwts.

3. Le prix de revient de l'énergie hydraulique s'évalue ordinairement en *kilowatt-an*. Calculer le prix de l'hectowatt-heure et du cheval-heure pour une chute dans laquelle le kw-an vaut 120 fr? On suppose l'année de 300 jours de travail de 24 heures.

R. l'hectowatt-heure revient à $\frac{120}{7200 \times 10} = \frac{1}{600} = 0^{\text{r}},00166$.

le cheval-heure revient à 0^{rs},01226.

4. Quelle est l'énergie cinétique d'un wagon pesant 25 tonnes et animé d'une vitesse de 72 km à l'heure?

R. 5.10⁶ joules ou 509 684 kgm.

5. Quelle est la quantité de chaleur équivalente à la force vive du problème précédent?

R. 1196 grandes calories..

6. Une machine à vapeur dépense environ 1 kg de charbon par cheval-heure. Sachant que le charbon en brûlant, dégage environ 7500 grandes calories, calculer la fraction d'énergie utilisée par la machine?

R. 8 pour 100 environ.

7. Un volant de 10 tonnes et de rayon moyen 2 m tourne avec une vitesse de 80 tours par minute. Calculer son énergie cinétique, en supposant que toute la masse est localisée à la circonférence de rayon moyen.

8. Avec un moteur qui fournit le cheval-heure pour 0^{rs},05, on fait fonctionner des dynamos qui servent à l'éclairage dont le prix est 0 fr. 07 l'hw-h. Calculer en pour 100 la fraction du prix de vente que représente le prix de la force motrice.

9. Un cheval effectue un effort moyen de 50 kg. Il fait 5 fois par minute le tour d'un manège de 4 m de diamètre. Calculer le travail produit après 8 heures. Calculer la puissance du cheval. Donner les résultats dans les divers systèmes d'unités.

CHAPITRE I

PRINCIPAUX EFFETS DU COURANT ÉLECTRIQUE — CANALISATIONS

14. *Générateurs et récepteurs électriques.* —

Tout le monde connaît les principales applications de l'énergie électrique : éclairage par lampes à incandescence ou par arcs, tramways ou chemins de fer électriques, transport de force (ou mieux d'énergie) à distance, etc. Dans tous les cas, on sait qu'il existe certaines usines, dites *usines génératrices d'électricité* dans lesquelles se trouvent des machines ou *générateurs* qui produisent l'énergie électrique ; de ces usines, partent des fils ou des câbles métalliques, généralement en cuivre, appelés *conducteurs*, qui transmettent l'énergie électrique aux appareils d'utilisation ou *récepteurs*. Comme dans toute transmission d'énergie à distance, par eau ou air sous pression par exemple, nous trouvons : 1° des *générateurs* qui produisent l'énergie, 2° une *canalisation* pour la transmettre et 3° des *récepteurs* pour l'utiliser. Dans la suite, nous nous servirons des analogies qui existent entre une canalisation hydraulique et une canalisation électrique pour nous représenter le courant électrique.

On classe les générateurs électriques d'après la source d'énergie qu'ils utilisent :

1° Les générateurs qui transforment l'énergie chimique en énergie électrique ; ce sont les *piles* et les *accumulateurs* (pendant la décharge) ;

2° Les générateurs qui transforment directement l'énergie calorifique en énergie électrique ; ce sont les *piles thermo-*

électriques dont les applications industrielles sont peu importantes;

3° Les générateurs qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, de beaucoup les plus importants; ce sont les *dynamos*.

Nous allons voir, en indiquant les principaux effets du courant électrique, que les récepteurs peuvent se classer comme les générateurs :

1° Les récepteurs qui transforment l'énergie électrique en énergie chimique : les accumulateurs pendant la charge, les appareils appelés *voltamètres* ou *cuves électrolytiques* dans lesquels le courant est employé à produire des réactions chimiques.

2° Les récepteurs qui transforment l'énergie électrique en chaleur : appareils de chauffage et d'éclairage, *lampes et fours électriques*;

3° Les récepteurs qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique : *moteurs électriques*.

Dans tout générateur, il existe deux points appelés *pôles* auxquels on attache les fils conducteurs, nous verrons que ces pôles ne sont pas identiques. De même, dans tout récepteur, il y a deux points auxquels on fixe les fils qui communiquent avec les pôles du générateur.

15. *Principaux effets du courant électrique.* — Pour faire les expériences suivantes, on peut utiliser le courant produit par un générateur quelconque; il est particulièrement commode d'employer une batterie de 2 ou 3 accumulateurs ou, à défaut, une batterie de 3 ou 4 éléments de pile au bichromate.

1° *Production de chaleur.* — Le courant électrique chauffe les conducteurs qu'il traverse. Pour le démontrer, nous tendrons un fil de fer très fin de 5 à 10 cm de longueur entre deux bornes A et B (fig. 2); d'autre part, nous aurons attaché aux pôles de

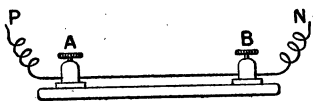


Fig. 2.

la pile (ou de la batterie d'accumulateurs) deux fils de cuivre

plus gros P et N. Si nous touchons les bornes A et B avec les extrémités des fils de cuivre, nous voyons le fil de fer s'échauffer et devenir incandescent. — Pour tenir les fils de cuivre à la main, il est nécessaire qu'ils soient protégés par une gaine isolante, sauf à leurs extrémités. Le fil AB s'est donc échauffé par le passage du courant; d'ailleurs, les fils P et N s'échauffent aussi, mais beaucoup moins, parce qu'ils sont plus gros. Si nous intervertissons les fils P et N, le fil AB rougit comme précédemment, le dégagement de chaleur ne nous permet pas de distinguer les pôles du générateur ni de savoir si le courant électrique a un sens de propagation.

C'est la chaleur dégagée par le courant électrique qui rend lumineux le filament des lampes à incandescence.

2° **Actions chimiques du courant.** — On sait qu'on réalise facilement, dans les cours de chimie, la décomposition de l'eau. A cet effet, on peut employer un voltamètre facile à construire. T et T' (fig. 3)

sont deux tubes de verre recourbés en forme de J dans lesquels on a passé des fils de fer qui se terminent en A et B, au-dessous de deux éprouvettes C et D. Le tout est plongé dans un vase contenant de l'eau additionnée d'un peu de soude caustique et les éprouvettes

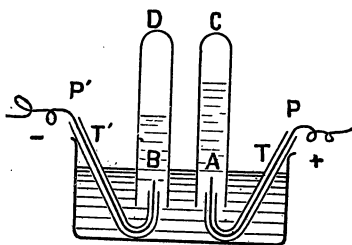


Fig. 3. — Voltamètre.

sont remplies, au début, du même liquide. Pour que celui-ci ne rentre pas dans les tubes T et T', on met un peu de mercure au fond de ces tubes ou bien on ferme les extrémités A et B avec du mastic des fontainiers qui ne laisse passer que les fils de fer.

Fixons les fils P et P' aux pôles de la source électrique (le fil P' à la borne qui correspond au zinc si le générateur est une pile et P à l'autre pôle). Nous voyons des bulles de gaz se dégager dans les éprouvettes et le volume dégagé en D est, à chaque instant, double de celui qui est en C. Il est facile de vérifier que le gaz dégagé en D est de l'hydrogène, car il brûle en

produisant une flamme très peu éclairante; le gaz de C est de l'oxygène, car il rallume une allumette qui ne présente plus qu'un point en ignition. Cette expérience montre que l'eau est le résultat de la combinaison de 2 vol. d'hydrogène avec 1 vol. d'oxygène, car la soude qu'on a introduite dans le récipient se retrouve après l'expérience. On peut aussi décomposer l'eau additionnée d'acide sulfurique; mais, dans ce cas, les fils A et B doivent être en platine.

Si nous répétons l'expérience précédente en intervertissant les pôles, nous constatons qu'on recueille l'hydrogène dans l'éprouvette où se dégagait précédemment l'oxygène et inversement. Les deux pôles de la source électrique ne sont donc pas identiques : on appelle pôle positif celui auquel est fixé le fil à l'extrémité duquel se produit l'oxygène; l'autre est le pôle négatif. Dans le cas où la source est une pile, qui contient toujours une lame de zinc, c'est la borne fixée au zinc qui est le pôle négatif; l'autre borne, fixée à une lame de cuivre ou à une lame de charbon, est le pôle positif.

Nous verrons, plus loin, que beaucoup de corps composés liquides sont décomposés par le passage du courant; on donne à ce phénomène le nom d'*électrolyse*, il correspond à une transformation d'énergie électrique en énergie chimique.

5° Action du courant électrique sur l'aiguille aimantée. — On sait qu'une aiguille aimantée *n.-s.* (fig. 4),

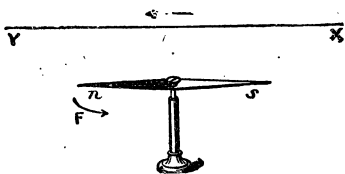


Fig. 4. — Déviation de l'aiguille aimantée par un courant. — Le pôle nord va à la gauche de l'observateur d'Ampère.

mobile sur un pivot, se dirige, sous l'influence du champ magnétique terrestre, à peu près dans la direction *sud-nord* et c'est toujours la même extrémité (celle sur laquelle le constructeur a laissé la couleur bleue du recuit) qui se tourne vers le nord.

Si l'on place au-dessus un fil XY dont les extrémités sont réunies aux pôles d'un générateur, on voit l'aiguille tourner d'un certain angle; elle

tournerait d'un angle voisin de 90° avec un générateur puissant. Lorsqu'on retourne le fil bout pour bout, ou, ce qui revient au même, si on intervertit les pôles, l'aiguille tourne, mais en sens inverse. La déviation de l'aiguille nous montre donc, comme l'électrolyse, que le courant n'a pas les mêmes propriétés dans les deux sens.

16. Sens du courant. — Détermination des pôles d'un générateur. — De ce qui précède, il résulte qu'il y a lieu d'adopter *conventionnellement* un sens pour le courant électrique, bien que nous ne sachions rien de sa nature intime. On convient de prendre pour sens celui que l'on suit en allant du pôle positif au pôle négatif le long du fil conducteur. Nous verrons, plus loin, que le courant doit être regardé comme formant un circuit fermé et que, par suite, *dans le générateur* il va du pôle négatif au pôle positif.

Par exemple, dans une pile de Volta (fig. 5), formée d'une lame de cuivre et d'une lame de zinc plongées dans une dissolution d'acide sulfurique (SO^+H^2), le courant va dans le sens PAN à l'extérieur, et du zinc au cuivre à l'intérieur. Cette manière de voir se trouve justifiée par le dégagement d'hydrogène qui se fait sur la lame de cuivre, bien que ce soit le zinc qui soit attaqué par l'acide.

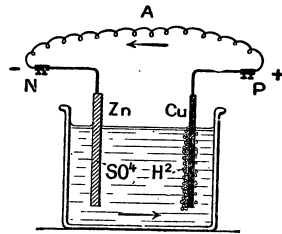


Fig. 5. — Sens du courant; il forme un circuit fermé.

Pour reconnaître le sens d'un courant on peut :

1° Couper le fil et mettre chaque extrémité aux bornes d'un voltamètre (fig. 3); si l'hydrogène se dégage en D, le fil P est réuni au pôle + du générateur et le courant va de P vers P'.

2° **Papier cherche-pôles.** — L'emploi d'un voltamètre est peu pratique; on emploie, souvent, une bande de papier dit papier *cherche-pôles*, que l'on humecte avec un peu d'eau; on appuie les extrémités des fils conducteurs à une distance de quelques millimètres : le papier devient rouge du côté négatif.

On prépare ce papier, en plongeant des bandes de papier-filtre blanc dans la solution suivante :

Salpêtre (azotate de potassium).	15 g.
Eau.	100 g.
Glycérine.	150 g.
Phtaléine du phénol, ...	2 g dissous dans 20 g d'alcool.

Lors du passage du courant, le salpêtre se décompose et donne de la potasse du côté négatif : la potasse colore en rouge la phtaléine du phénol.

Au lieu de papier, on peut utiliser un tube de verre contenant la dissolution précédente.

3° Emploi de l'aiguille aimantée. — Galvano-
mètre. — La déviation d'une aiguille aimantée par le courant peut servir à reconnaître l'existence et le sens d'un courant. On applique la règle suivante donnée par Ampère.

On appelle droite et gauche d'un courant, la droite et la gauche d'un observateur couché le long du courant, de façon que celui-ci entre par les pieds et sorte par la tête; l'observateur regarde le pôle nord de l'aiguille aimantée. *Le pôle nord est toujours dévié à gauche du courant* (fig. 4). On appelle *galvanomètre* un appareil qui sera décrit plus tard et qui sert à reconnaître l'existence et le sens d'un courant. La partie essentielle est une aiguille aimantée au voisinage de laquelle est placée une bobine sur laquelle se trouve enroulé le fil conducteur.

Il est évident que la déviation de l'aiguille dépend de ce que nous appellerons plus loin l'intensité du courant et qu'elle peut servir à mesurer cette intensité. Les galvanomètres industriels sont appelés *ampèremètres* parce qu'ils sont gradués en unités appelées *ampères* (22).

17. Autres effets du courant électrique. —
1° Moteurs électriques. — Dans les exemples précédents, nous avons vu l'énergie électrique se transformer en chaleur, en énergie chimique; elle donne de l'énergie mécanique lors de la déviation de l'aiguille aimantée, mais c'est surtout dans les *moteurs électriques* que cette transformation se produit. Ces

moteurs seront étudiés plus tard ; ils comprennent toujours des aimants ou des électroaimants.

2° **Aimantation de l'acier.** — Si l'on introduit une tige d'*acier* non aimantée dans un tube de verre (fig. 6), sur

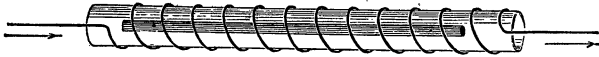


Fig. 6. — Aimantation d'une tige d'acier par le courant.

lequel on a enroulé un fil de cuivre dans lequel on fait passer le courant, et qu'on retire la tige après quelques instants, on constate qu'elle est aimantée ; elle a acquis la propriété d'attirer le fer. On peut enrouler directement le fil sur la tige, mais, dans ce cas, le fil doit être protégé par une gaine isolante (18).

3° **Aimantation du fer.** — Une tige de fer, placée dans les mêmes conditions, s'aimante également, mais elle ne possède la propriété d'attirer le fer que pendant le passage du courant ; lorsqu'on supprime celui-ci, le fer perd son aimantation. Le système formé d'une masse de fer entourée par un fil dans lequel on peut faire passer un courant s'appelle un *électroaimant* ; la figure 7 représente un électroaimant droit.

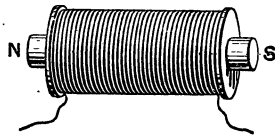


Fig. 7. — Électroaimant droit.

18. **Corps bons et mauvais conducteurs.** — **Première idée de la résistance électrique.** — Tous les corps ne se laissent pas traverser par le courant électrique ; il y a de bons et de mauvais conducteurs.

Corps solides. — Pour apprécier les corps à ce point de vue, nous prendrons la disposition de la figure 8. P représente, schématiquement, une batterie de piles ou d'accumulateurs ; le courant passe dans un ampèremètre G qui fait connaître l'intensité du courant. On détache le fil relié à la borne B et on l'écarte jusqu'en A ; on introduit entre A et B un fil de cuivre

enroulé en hélice; le courant est plus faible que précédemment : le fil AB oppose donc une certaine résistance au passage du courant.

Si on remplace le fil de cuivre par un fil de fer de même

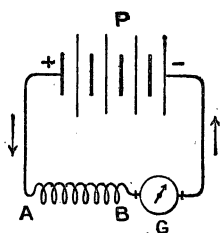


Fig. 8. — L'introduction du fil AB diminue l'intensité du courant.

longueur et de même section, l'intensité du courant baisse davantage; le fer conduit moins bien le courant que le cuivre ou, autrement, sa *résistance électrique* est plus grande que celle du cuivre. En opérant de cette façon, on peut ranger les métaux dans l'ordre suivant, de résistance croissante (ou de conductibilité décroissante) : argent, cuivre, aluminium, fer, nickel, mallechort, etc.

Des épaisseurs même assez petites de verre, porcelaine, caoutchouc, gutta-percha, soufre, etc., arrêtent complètement le courant et l'ampèremètre marque zéro.

Les métaux sont des corps *bons conducteurs*, les autres corps solides sont *mauvais conducteurs* ou *isolants*. Le charbon conduit plus mal que les métaux.

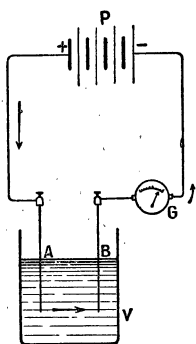


Fig. 9. — Conductibilité des liquides.

Il est facile de vérifier, avec cette disposition, que la résistance d'un fil augmente avec sa longueur et qu'elle diminue si on augmente la section : *les fils gros et courts ont une très faible résistance*.

Corps liquides. — Il suffit, pour étudier la conductibilité des liquides, de disposer l'appareil comme le montre la figure 9; il faut que les bouts de fil A et B n'aient pas d'action chimique sur le liquide enfermé dans le vase V. On vérifie ainsi que le mercure est conducteur; il en est de même des dissolutions des électrolytes (aci-

des, bases et sels de la chimie), mais ces corps subissent une décomposition (électrolyse) par le passage du courant. Les autres liquides sont des isolants : huiles, pétrole, benzine, ... etc.

Corps gazeux. — Les gaz sont des isolants, il suffit de couper le fil et d'écartier légèrement les extrémités pour arrêter complètement le courant.

Applications. — Les conducteurs du courant sont le plus souvent en cuivre, métal peu résistant. Pour éviter les pertes de courant aux points de contact des conducteurs avec les supports, on est obligé d'*isoler* les conducteurs avec des matières mauvaises conductrices. Lorsqu'on peut suspendre les conducteurs dans l'air, qui est un isolant presque parfait, on se contente de les soutenir, de distance en distance, sur des *isolateurs* en porcelaine portés par des poteaux (télégraphe). Si le conducteur est en contact sur toute sa longueur avec des solides ou des liquides, on le protège en l'entourant d'une ou plusieurs couches de caoutchouc, de gutta, de soie ou même de coton. Le fil qui est enroulé sur la bobine de la figure 7 est du fil isolé ; sans cette précaution, le courant, au lieu de parcourir le fil dans toute sa longueur, passerait directement d'une spire à la voisine.

CHAPITRE II

ANALOGIE HYDRAULIQUE — INTENSITÉ POTENTIEL OU TENSION

19. *Électricité. — Analogie hydraulique.* — Nous avons vu dans les expériences précédentes que, le long des conducteurs, il y a transport d'une certaine espèce d'énergie que nous avons appelée énergie électrique. Or, dans la plupart des transports d'énergie que nous connaissons, cette énergie est emmagasinée dans un corps matériel qui se déplace et qui sert, en quelque sorte, de support à l'énergie transportée; exemples :

1° La courroie qui transmet le mouvement d'un moteur à une machine sert de support à l'énergie qu'elle transporte;

2° Dans une transmission d'énergie par eau ou air sous pression, l'eau ou l'air servent également de support à l'énergie transportée.

Il semble naturel de supposer, et nous verrons que cette hypothèse est justifiée par les faits, que l'énergie électrique est transportée par *quelque chose* qui se propage le long des conducteurs. Ce *quelque chose* qui ne semble pas matériel, mais qui présente une grande analogie avec un fluide, est appelé *électricité*. Nous dirons donc que le courant électrique transporte de l'électricité le long des conducteurs, et que *cette électricité est l'agent de transport de l'énergie électrique*.

D'ailleurs, il existe une assez grande analogie entre le courant électrique qui parcourt un conducteur et un courant d'eau circulant dans une canalisation. Nous aurons assez souvent recours à cette image pour nous représenter matériellement les principales propriétés du courant électrique.

A ce point de vue, un générateur d'énergie électrique peut être comparé à une pompe rotative qui entretient une circulation d'eau dans une canalisation; le rôle de la pompe est d'entretenir le mouvement de l'eau dans la canalisation, de même que le générateur électrique entretient la circulation de l'électricité dans la canalisation électrique.

L'eau qui circule dans une conduite rencontre une certaine résistance à son mouvement, à cause des frottements et des coudes; cette résistance est plus grande, évidemment, dans un tuyau étroit que dans un tuyau large; elle augmente aussi avec la longueur de la conduite. Nous avons vu plus haut que, de même, le courant électrique est obligé de vaincre une certaine résistance qui augmente avec la longueur des fils et diminue quand on augmente leur section.

Le frottement d'un liquide dans une conduite produit certainement un dégagement de chaleur, d'ailleurs bien difficile à constater expérimentalement, mais qui existe sûrement [(le frottement produit toujours de la chaleur (15)]; de même, le courant électrique chauffe les conducteurs qu'il parcourt et d'autant plus — nous le verrons bientôt — que leur résistance est plus grande.

Le courant liquide peut être utilisé à produire de l'énergie mécanique; si nous plaçons en un point de la canalisation une petite turbine, elle sera mise en mouvement, elle produira du travail; la turbine est ici l'analogue d'un moteur électrique.

20. Débit dans une conduite d'eau.

— Considérons une pompe centrifuge P (fig. 10) qui établit un courant dans une canalisation unique; lorsque le courant est établi, il passe la même quantité d'eau, dans le même temps, à tra-

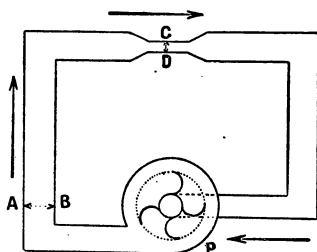


Fig. 10. — Débit d'une conduite d'eau. — Il passe, dans le même temps, la même quantité d'eau en AB et en CD.

vers une section quelconque de la conduite. Prenons en effet deux sections l'une AB, l'autre CD, que nous choisissons, à dessein, très différentes; s'il passait, dans un même temps, plus d'eau par AB que par CD, il y aurait accumulation d'eau dans la partie de la conduite comprise entre AB et CD; or ceci est impossible puisque l'eau est incompressible et que nous supposons la conduite rigide (1).

Considérons maintenant le cas d'une canalisation qui se ramifie en plusieurs *dérivations*. La quantité d'eau qui traverse

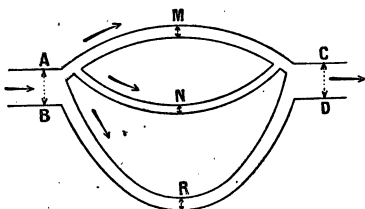


Fig. 11. — La somme des quantités d'eau qui passent, en un temps donné, par M, N et R, est égale à celle qui traverse AB ou CD.

la section AB (fig. 11) est la même que celle qui traverse CD dans le même temps; mais cette quantité se répartit dans chacune des dérivations et la somme des quantités d'eau qui passent, en un temps donné, en M, N et R est égale à celle qui arrive dans le même temps par AB. Tout ceci

résulte de l'*incompressibilité* à peu près complète de l'eau. Ces résultats d'un raisonnement très simple se vérifieraient facilement en disposant dans la canalisation des compteurs à eau.

On appelle *débit* ou *intensité* d'un courant d'eau le volume d'eau qui traverse une section quelconque de la canalisation dans l'unité de temps. Nous allons voir que l'intensité d'un courant électrique peut se définir d'une façon analogue.

21. Définition d'une quantité d'électricité. — **Coulomb.** — Parmi les actions que produit le courant, nous choisirons la décomposition de l'eau pour définir ce que nous appellerons *quantité d'électricité*.

1^{re} Expérience. — Prenons une pile P (fig. 12) formée

1. Ceci nous prouve que la vitesse du courant est plus grande dans les parties étroites.

de plusieurs éléments groupés en série (ou une série d'accumulateurs) et faisons passer le courant dans plusieurs voltamètres disposés à la suite les uns des autres — c'est ce qu'on appelle monter en série. — Nous les choisirons, à dessein, de dimensions et de formes très différentes; malgré cette précaution, nous constatons que les volumes d'hydrogène dégagés dans des temps égaux sont les mêmes dans tous les voltamètres. Nous pourrions donc prendre cette quantité d'hydrogène dégagée pour caractériser la quantité d'électricité qui passe à travers une section quelconque du conducteur. La quantité ainsi définie est l'analogie de la quantité d'eau qui traverse une section quelconque d'une canalisation et *ce que nous appelons électricité est quelque chose de comparable à un liquide incompressible*. Les voltamètres peuvent se comparer à des compteurs à eau qu'on aurait installés en différents points de la canalisation.

2^e Expérience. — Disposons les voltamètres comme l'indique la figure 13 : l'électricité qui arrive en M se partage entre les deux dérivations et celles-ci se rejoignent en N. L'expérience prouve qu'au bout d'un certain temps, les volumes d'hydrogène dégagés en A et en B sont égaux; en C, le volume est plus petit qu'en A; il en est de même en D; mais la somme des volumes dégagés en C et en D est égale au volume dégagé

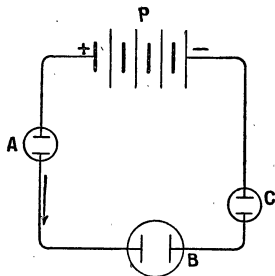


Fig. 12. — Dans tous les voltamètres, quelles que soient leurs dimensions, il y a même volume d'hydrogène dégagé.

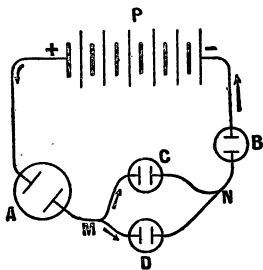


Fig. 13. — La somme des volumes d'H dégagés en C et D est égale au volume dégagé en A.

en A : et, puisque nous prenons, pour mesurer la quantité d'électricité qui passe, le volume d'hydrogène dégagé, il faut conclure que la quantité d'électricité qui passe en A est égale à la somme des quantités qui traversent C et D. Ce que nous avons appelé quantité d'électricité se conduit donc encore comme un liquide incompressible : tout ce qui traverse A, dans un temps donné, se retrouve en C et D. Un résultat analogue s'obtiendrait en mettant entre M et N un nombre de dérivations supérieur à deux.

Supposons que les deux dérivations C et D soient identiques (il suffit de prendre des voltamètres de mêmes dimensions et des fils conducteurs de même longueur et de même section) ; nous aurons des volumes d'hydrogène dégagés égaux en C et D et chacun de ces volumes sera la moitié de celui dégagé en A dans le même temps. Or, la quantité d'électricité qui arrive en M se partage en deux parties égales puisque les deux branches C et D sont identiques ; notre expérience prouve donc que *si la quantité d'électricité est réduite à moitié, il en est de même de la quantité d'hydrogène dégagé*. On généraliserait facilement ce résultat important en mettant 3, 4, 5... dérivations identiques entre M et N : les volumes d'hydrogène seraient $1/3$, $1/4$

CONCLUSION. — *Les volumes d'hydrogène dégagés sont proportionnels aux quantités d'électricité qui traversent les voltamètres.*

Nous pourrions donc prendre les quantités d'hydrogène dégagées pour mesurer les quantités d'électricité.

Unité de quantité d'électricité. — **Coulomb.** — *L'unité employée pour mesurer les quantités d'électricité est appelée coulomb⁽¹⁾.*

Le coulomb est une quantité d'électricité telle que, si elle traverse un voltamètre, il se dégage $\frac{1}{96\ 600}$ de gramme d'hydrogène.

1. Les noms de Coulomb et d'Ampère ont été donnés en mémoire des physiciens français Coulomb (1736-1806) et Ampère (1775-1836), à cause de leurs découvertes en électricité et magnétisme.

Cette quantité correspond à un poids de $0^{\text{mg}},01035$ ou à un volume de $0^{\text{cm}^3}, 116$ (1).

22. **Intensité d'un courant.** — **Ampère.** — L'intensité d'un courant électrique est l'analogue du débit d'un courant liquide.

On appelle intensité d'un courant électrique la quantité d'électricité qu'il transporte par seconde.

L'unité est l'ampère :

Un courant d'un ampère est un courant qui transporte, par seconde, une quantité d'électricité égale à un coulomb et qui, par conséquent, met en liberté dans un voltamètre

$\frac{1}{96\ 600}$ de gramme d'hydrogène par seconde.

Les ampèremètres dont on se sert pour évaluer l'intensité d'un courant sont gradués en ampères; nous verrons plus loin comment on arrive à ce résultat.

23. **Conséquences et applications.** — Si l'on représente par i l'intensité d'un courant et par t le temps pendant lequel il circule, la quantité d'électricité transportée q est évidemment donnée par

$$q^{\text{coulombs}} = i^{\text{ampères}} \times t^{\text{secondes}}$$

puisque $i^{\text{ampères}}$ est la quantité pour 1 seconde.

Exercice. — Calculer le poids et le volume d'hydrogène dégagé par un courant de 10 ampères qui traverse un voltamètre pendant 1 heure (3600^{s}).

Le poids d'hydrogène dégagé est :

$$p^{\text{g}} = \frac{1^{\text{g}}}{96\ 600} \times 10^{\text{amp}} \times 3600^{\text{s}} = 0^{\text{g}}, 3727.$$

Pour calculer le volume correspondant, il faut se rappeler que la densité de l'hydrogène est $0,0695$ et que le litre d'air

1. La raison qui a fait adopter la fraction $\frac{1}{96\ 600}$ plutôt qu'un nombre plus simple ne peut être expliquée ici : ceci résulte d'une définition théorique du coulomb déduite de la loi des attractions électriques. La définition donnée ici est la définition pratique.

pèse $1\text{g},293$; de sorte que 1^l d'hydrogène pèse
 $1\text{g},293 \times 0,0695 = 0\text{g},0898$.

Vol. d'hydrogène, $V^l = \frac{0,3727}{0,0898} = 4,15$.

24. **Ampère-heure.** — On utilise souvent dans la pratique un multiple du coulomb appelé *ampère-heure*; c'est la quantité d'électricité débitée par un courant de 1 ampère pendant 1 heure, soit 3600 coulombs.

Un ampère-heure dégage $0^l,415$ d'hydrogène (cela résulte facilement de l'exercice précédent).

25. **Variation de la pression dans une canalisation d'eau. — Travail correspondant.** — Rappelons d'abord qu'on appelle *pression* en un point d'un liquide la force que ce liquide exerce sur une surface de 1cm^2 ; dans le système C.G.S., on évalue les pressions en dynes par cm^2 ⁽¹⁾; les mécaniciens évaluent en kg par cm^2 . Ce sont les différences de pression qui produisent la circulation d'un liquide dans une canalisation; si la pression était partout la même dans un *tube horizontal*, il y aurait repos du liquide. La pompe de la figure 10 a pour but d'élever la pression vers la gauche de façon à produire un courant d'eau dans la canalisation. Si nous mettions des manomètres en différents points, on trouverait qu'ils indiquent des pressions décroissantes à mesure qu'on s'éloigne de la pompe, dans le sens du courant⁽²⁾.

La différence des pressions (qu'on appelle aussi *perte de charge*) entre A et B

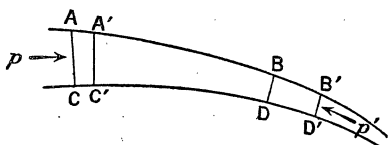


Fig. 14.

(fig. 14) a pour conséquence une perte d'énergie du liquide dans la partie de la conduite comprise entre A et B; cette perte d'énergie est utilisée à vaincre les

frottements dans cette région et, par suite, il y a production

1. Cette unité est aussi appelée barye, $1\text{kg. par cm}^2 = 981\,000$ baryes.
2. La canalisation de la figure est supposée dans un plan horizontal, si

d'une petite quantité de chaleur. On peut démontrer que la *perte d'énergie, ou le travail produit par l'eau dans la partie comprise entre AC et BD, est égale à la perte de charge multipliée par le volume de liquide qui passe.*

En effet, supposons que la canalisation soit tout entière horizontale, pour ne pas avoir à considérer le travail produit par le poids du liquide par suite de variation de niveau. Soient p la pression sur AC, p' la pression sur BD, s la section AC et s' la section BD ; nous supposons encore que le régime permanent de l'écoulement est atteint, de sorte que la pression garde toujours sa valeur p en AC et sa valeur p' en BD (1).

Considérons la portion de liquide comprise entre AC et BD, elle est poussée, vers la droite, par une force p par cm^2 et, par suite, par une force égale à ps sur toute la section. Sur BD, la pression du liquide qui est au delà, s'oppose à l'écoulement avec une pression p' par cm^2 et une force $p' \times s'$ sur BD. Considérons le mouvement pendant un petit intervalle de temps, la masse ACBD s'est déplacée en A'C'B'D' ; on lui a fourni, sur AC, une certaine quantité de travail $W = p \times s \times AA'$ (puisque la force est ps et le chemin AA' assez petit pour être regardé comme rectiligne). Ce travail se retrouve sous deux formes : une partie W_1 est employée à vaincre les frottements dans la partie de la conduite entre AC et BD, l'autre est employée à repousser la pression p' et produit le travail $W_2 = p's' \times BB'$. En vertu de la conservation de l'énergie on a donc :

$$W = W_1 + W_2 \text{ ou } ps \times AA' = W_1 + p's' \times BB'.$$

Mais $s \times AA'$ c'est le volume liquide qui a traversé la section AC et $s' \times BB'$ est le volume qui a traversé BD, dans le même temps ; ces volumes sont d'ailleurs égaux, puisque le liquide est incompressible ; désignons par v ce volume. L'égalité précédente devient

$$p \times v = W_1 + p'v \text{ ou } W_1 = pv - p'v = (p - p')v.$$

Le travail dépensé par le liquide entre AC et BD pendant un petit

on fixait aux différents points A, C, etc., des tubes verticaux ouverts à la partie supérieure, l'eau s'y élèverait à une certaine hauteur, qui irait en décroissant à mesure qu'on s'éloigne de la pompe dans le sens du courant (voy. 59.)

1. Lorsque la pompe commence à fonctionner, il y a d'abord un régime variable dans la conduite, il faut un certain temps pour que le régime permanent soit atteint.

intervalle de temps est bien égal au produit de la perte de charge $p - p'$ par le volume qui a passé. Si on considère un intervalle de temps plus grand, on pourra le partager en intervalles assez petits; mais en faisant la somme, il est facile de voir que le principe est encore vrai.

Lorsqu'il passe un volume de liquide égal à l'unité, le travail accompli par le liquide entre AC et BD est égal à $(p - p') \times 1$; supposons que nous ne sachions pas définir la pression en un point d'un liquide en mouvement, nous pourrions cependant définir une différence de pression (ou perte de charge) de la façon suivante :

La différence de pression entre deux points A et B d'une canalisation d'eau est égale numériquement au travail accompli par l'unité de volume liquide qui passe de A à B.

Il est très important de remarquer que ce travail ne dépend pas de la valeur absolue des pressions, mais seulement de leur différence.

De ce qui précède, il résulte que le travail fourni par le courant liquide, en une seconde, entre les points A et B est égal au débit (vol. d'eau qui passe par seconde) multiplié par la perte de charge.

Travail par sec. = perte de charge \times débit = $(p - p') d$
d représente le débit.

Au bout de t^s , on a évidemment :

$$\text{Travail pour } t^s = (p - p') d. t.$$

26. Différence de potentiel ou de tension électrique.

— La différence de *potentiel* ou de *tension* entre deux points A et B (fig. 15) est l'analogie de la différence de pression dans une canalisation d'eau; pour que l'électricité circule de A vers B, il faut qu'il y ait entre ces deux points une diff. de pot., et pour définir cette grandeur numériquement nous dirons, par analogie

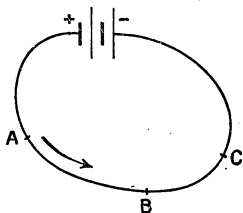


Fig. 15.

avec ce qu'on vient d'établir pour un courant liquide :

La diff. de pot. (ou de tension) entre deux points d'un circuit électrique est une quantité égale au travail effectué par un coulomb qui passe du premier point au second.

Il faut remarquer que nous n'aurons jamais à considérer les valeurs absolues des potentiels (ou tensions) mais seulement les différences de potentiel.

27. Volt. — Voltmètres. — L'unité de diff. de pot. est appelée **volt** (abréviation de Volta) ⁽¹⁾.

Le volt est la chute de potentiel que doit éprouver un coulomb pour produire un travail égal à 1 joule. — Les diff. de pot. se mesurent avec des instruments appelés **voltmètres** dont la construction est analogue à celle des ampèremètres mais qui sont gradués d'une façon particulière, qui sera expliquée plus tard ; ils ont une très grande résistance électrique, tandis que les ampèremètres ont une résistance très petite.

De plus, les deux instruments ne sont pas utilisés de la même manière. Pour mesurer l'intensité du courant qui parcourt le circuit BAC (fig. 16) on coupe le fil et l'on met chacune des extrémités aux bornes de l'ampèremètre, de façon que le courant passe *tout entier* dans l'instrument.

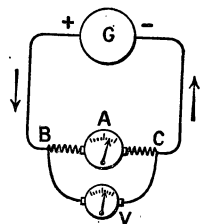


Fig. 16. — Montage d'un ampèremètre A et d'un voltmètre V.

Pour mesurer la diff. de pot. entre deux points B et C d'un circuit, *on ne coupe pas le fil*, on réunit, à l'aide de fils conducteurs, les points B et C aux bornes du voltmètre ; c'est ce qu'on appelle monter en *dérivation*.

28. Force électromotrice d'un générateur. — Un générateur hydraulique qui entretient un courant d'eau dans une canalisation, a pour effet de communiquer à chaque unité de volume d'eau une certaine énergie que celle-ci dépense en se déplaçant le long du circuit ; cette énergie est égale à la perte

1. Volta (1745-1827), célèbre physicien italien, né à Côme, est l'inventeur de la pile.

totale de charge entre la sortie de l'eau et son point de retour à la pompe.

De même, on appelle force électromotrice (abréviation f. é. m.) d'un générateur électrique une grandeur égale à l'énergie que le générateur communique à chaque coulomb qui le traverse.

Une f. é. m. est une quantité de même espèce qu'une diff. de pot. et, par suite, elle s'évalue aussi en volts.

La f. é. m. d'un générateur est égale à la diff. de pot. entre ses pôles, lorsque le circuit est ouvert. On mesure cette f. é. m. en réunissant les pôles du générateur aux bornes d'un volt-mètre. Nous verrons, plus loin, qu'il ne faut pas confondre la f. é. m. d'un générateur avec la diff. de pot. qui existe entre ses pôles en circuit fermé (41).

29. Travail électrique. — Il est facile de calculer, d'après les définitions précédentes, le travail produit par le passage d'un courant entre deux points dont la diff. de pot. est $V - V'$, par le passage de Q coulombs.

$$\text{Travail électrique } W \text{ joules} = (V - V') \text{ volts} \times Q \text{ coulombs}$$

En effet, le travail serait, par définition, égal à $V - V'$ pour 1 coulomb, et pour Q coul. il est égal à la quantité ci-dessus.

Si on appelle *puissance du courant* entre deux points l'énergie produite par seconde, on a évidemment :

$$P \text{ watts} = (V - V') \text{ volts} \times I \text{ ampères}$$

Puisque I ampères représentent l'intensité du courant ou le nombre de coulombs qu'il transporte par seconde ; d'ailleurs, le résultat s'exprime en *watts*, puisque c'est un certain nombre de joules par seconde (voy. tableau des unités page 15).

Le travail produit en t^s peut s'exprimer en fonction de l'intensité en remarquant que, si l'intensité est I amp., la quantité Q d'électricité qui passe en t^s est $Q \text{ coulombs} = I \text{ ampères} \times t^s$.

$$W \text{ joules} = (V - V') \text{ volts} \times I \text{ amp} \times t^s$$

30. Application numérique. — Supposons que les points A et B soient les bornes d'une lampe à incandescence de

16 bougies montée sur un secteur à 110 volts, le courant qui traverse le filament est environ de 0 amp, 55. On a :

$$\text{Dépense d'énergie dans la lampe en } 1^s = 110 \text{ volts} \times 0 \text{ amp, } 55 = 60 \text{ watts, } 5;$$

$$\text{Dépense en 1 heure, ou } 3600^s, W^{\text{joules}} = 60, 5 \times 3600 = 217\ 800 \text{ joules.}$$

Dans ce cas, on exprime plutôt la dépense d'énergie en *hectowatts-heure* (voy. page 13), l'hectovatt-heure valant $3600 \times 100 = 360\ 000$ joules, on aurait :

$$\frac{217.800}{360.000} = 0^{\text{Hwh}}, 605$$

Ce résultat se voit d'ailleurs plus rapidement en remarquant que 60 watts, 5 pendant une heure équivalent à 60, 5 watts-heure ou à $0^{\text{Hwh}}, 605$.

EXERCICES

1. Calculer le volume d'hydrogène dégagé dans un voltamètre par un courant de 5 amp. en 10 minutes?

R. 348 cm³.

2. Pendant combien de temps faut-il faire passer un courant de 10 amp., dans un voltamètre, pour obtenir 1 litre d'oxygène?

R. 1724 s. ou 28 m. 44 s.

3. Certains galvanomètres sont sensibles au *micro-ampère*, c'est-à-dire à $\frac{1}{1\ 000\ 000}$ d'amp.; calculer le temps nécessaire pour qu'un tel courant mette en liberté, dans l'électrolyse, 1 cm³ d'hydrogène.

R. 8 620 690 secondes, un peu moins de 100 jours.

On voit combien le galvanomètre est plus sensible que le voltamètre; il existe d'ailleurs des instruments 1000 fois plus sensibles que celui que nous venons de considérer.

4. Quelle est l'énergie consommée en 1 heure par une lampe à arc, la diff. de pot. étant 50 volts et l'intensité du courant 12 amp.? Donner le résultat en H. w. h., en chevaux-heure.

R. 6 Hwh.; 0^{ch-h}, 815.

5. Un moteur électrique dont la puissance est 3 kw. produit dans sa canalisation un courant de $27\frac{3}{11}$; quelle est sa f. é. m.?

*6. Une chute d'eau débite 500 l. à la seconde, avec une hauteur de 20 m. Calculer sa puissance. Elle est utilisée à faire tourner une turbine qui met en mouvement une dynamo de f. é. m. 110 v.; quelle est l'intensité du courant produit? On admet que le rendement est 0,60.

*7. Un voltamètre a fourni en 10 minutes un volume de gaz tonnant (hydrogène et oxygène réunis) égal à 100 cm³. Quelle est l'intensité du courant?

CHAPITRE III

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE — LOIS D'OHM

31. Définition de la résistance électrique. — Nous avons déjà vu que les différents corps ne conduisent pas également le courant électrique et nous avons donné une idée qualitative de la résistance électrique (il sera bon de relire le n° 18). Le but de ce chapitre est de donner une définition précise qui se prête aux calculs.

Expérience. — Prenons un circuit comprenant une pile P (fig. 17), un ampèremètre G et, entre A et B, un conducteur quelconque. Un voltmètre V est placé en dérivation entre A et B. Notre circuit comprend en outre un *rhéostat* R R' : le rhéostat est un appareil qui permet d'introduire dans le circuit une résistance variable (voy. 49). Si l'on met le point M près de R, il y a peu de résistance dans le circuit; si on le met près de R', on introduit une résistance plus grande.

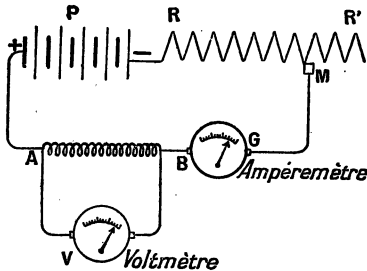


Fig. 17. — Définition de la résistance électrique.

Le contact M étant près de R, on mesure l'intensité I du courant à l'ampèremètre et la diff. de pot. entre A et B soit E. On déplace le curseur M de manière à changer l'intensité du cou-

rant ; on lit I' pour l'intensité et E' sur le voltmètre. Un nouveau déplacement donne I'' et E'' , etc. Faisons les quotients $\frac{E}{I}$, $\frac{E'}{I'}$, $\frac{E''}{I''}$, etc., on trouve un résultat constant, d'où :

1^{re} LOI D'OHM (1). — *Le quotient de la diff. de pot. entre deux points d'un conducteur, par l'intensité du courant qui le traverse est un nombre constant, indépendant de l'intensité du courant.*

Ce quotient constant caractérise la portion du conducteur placée entre A et B, d'où la définition :

On appelle résistance électrique d'un conducteur le quotient de la diff. de pot. qui existe entre ses extrémités par l'intensité du courant qui le traverse.

32. Unité de résistance. — Ohm. — De la définition précédente, il résulte que, si on appelle E la diff. de pot. aux extrémités du conducteur, I l'intensité du courant et R la résistance, on a :

$$R \text{ ohms} = \frac{E \text{ volts}}{I \text{ ampères}} \quad (1)$$

Dans cette formule, E est évalué en volts, I en ampères et R avec une certaine unité qu'on appelle *l'ohm*. La définition de l'ohm résulte de cette formule : si l'on fait

$$E = 1 \text{ volt}, I = 1 \text{ ampère}$$

on trouve $R = 1 \omega$ (on représente l'ohm par la lettre grecque ω , (oméga)).

L'ohm est une résistance telle que, si l'on établit une diff. de pot. de 1 volt entre ses extrémités, elle est parcourue par un courant de 1 ampère.

On se procure une résistance égale à 1ω d'une infinité de manières (de même qu'on pourrait avoir des étalons divers de la masse du kg). *L'ohm légal* est réalisé par une colonne de mercure de 106^{cm}, 3 de longueur et de 1 mm² de section à 0°.

Les lignes télégraphiques aériennes formées par du fil de fer

1. OHM (1787-1844), célèbre physicien allemand.

de 4 mm de diamètre ont une résistance d'environ 10^{ω} par km (voy. d'autres exemples plus loin).

55. Autres formes algébriques de la loi d'Ohm.

— De l'équation (1) on tire :

$$E \text{ volts} = I \text{ amp} R^{\omega} \quad (2)$$

La diff. de pot. entre deux points est égale au produit de l'intensité du courant par la résistance comprise entre ces deux points.

$$I \text{ amp} = \frac{E \text{ volts}}{R^{\omega}} \quad (3)$$

On obtient l'intensité d'un courant, dans une portion de conducteur, en divisant la diff. de pot, qui existe entre ses extrémités par sa résistance.

54. Résistance d'un conducteur cylindrique. —

Lois d'Ohm. — Nous allons donner les lois d'Ohm qui permettent de calculer la résistance d'un conducteur cylindrique — il faut entendre par ce mot un conducteur qui a partout même section, cette section n'étant pas nécessairement un cercle; elle peut être un carré, un rectangle, etc.

Pour faire facilement les expériences que nous allons décrire, il est bon d'employer des fils métalliques dont la résistance spécifique est un peu grande, le *maillechort* (alliage de Cu, Ni, Zn) et

surtout la *manganine* (alliage de Cu, Ni et Mn) sont commodes.

1^{re} Loi. — La résistance d'un fil cylindrique est proportionnelle à sa longueur. — Le montage (fig. 18)

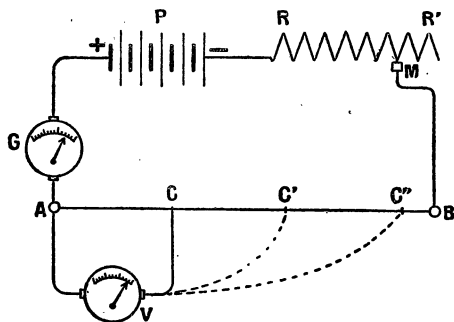


Fig. 18. — La résistance d'un conducteur cylindrique est proportionnelle à la longueur.

comprend : une pile P de 4 à 5 éléments au bichromate (ou 3 ou 4 accumulateurs); un rhéostat RR', un ampèremètre et un fil d'environ 1 m de long et 1/2 mm de diamètre, en manganine, tendu entre deux bornes A et B (1). On règle le rhéostat de façon à avoir un courant de 3 ou 4 ampères. En A on attache un fil réuni à un voltmètre, un autre fil se termine par un contact C que l'on déplace sur le fil AB.

On cherche en quel point il faut mettre C pour que le voltmètre indique 1 volt, puis le point C' pour avoir 2 volts, C'' pour 3 volts. On trouve que les longueurs AC, AC', AC'' sont proportionnelles à 1, 2 et 3. Or, on a, d'après la définition de a résistance, I étant l'intensité du courant :

$$\text{résistance AC} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ amp}}$$

$$\text{résistance AC}' = \frac{2 \text{ volts}}{1 \text{ amp}}$$

$$\text{résistance AC}'' = \frac{3 \text{ volts}}{1 \text{ amp}}$$

Ces résistances sont donc dans le même rapport que les longueurs.

2^e Loi. — **La résistance d'un fil varie en sens inverse de la surface de sa section.**

Remarquons de suite que, si la section est un cercle, comme les surfaces sont proportionnelles aux carrés des rayons ou des diamètres, on peut dire que *la résistance d'un fil cylindrique varie en raison inverse du carré de son diamètre.*

Pour démontrer cette loi, prenons la même disposition que précédemment; mais, à la place du fil unique AB, nous placerons (fig. 19) un fil AC de 1/2 mm de diamètre, et, entre les bornes C et B, un fil de même espèce de 1 mm de diamètre. Mesurons la diff. de pot. pour la longueur AC, puis mettons le voltmètre entre C et un point D tel que la diff. de pot. soit la même. On déplace le contact D jusqu'à ce qu'il en soit ainsi. Nous vérifierons que $CD = 4 AC$: la résistance AC est donc égale à celle

1. Au lieu de manganine, on peut prendre du maillechort, mêmes dimensions.

de CD, une longueur de gros fil égale à AC aurait une résistance égale au $\frac{1}{4}$ de celle de fil fin, et comme les surfaces des sections sont dans le rapport de 4 à 1, la loi est établie.

3^e Loi. — La résistance d'un fil dépend de sa nature. — Il suffit, pour le prouver, de mettre entre A et B plusieurs fils de même diamètre; entre A et C de la manganine,

entre C et B du fer. On vérifie que les diff. de pot. qui correspondent à des longueurs égales de ces fils sont très différentes : beaucoup plus grandes avec la manganine qu'avec le fer.

35. **Formule d'Ohm. — Résistivité.** — On résume les lois précédentes dans la formule

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

R est la résistance du fil cylindrique;

l sa longueur exprimée en c. m.;

s sa section exprimée en cm^2 ;

ρ (rhô) est un coefficient qui dépend du fil et qu'on appelle sa **résistivité** ou **résistance spécifique**.

La **résistivité d'un corps est égale à la résistance d'une barre de 1 cm de long et de 1 cm^2 de section.**

36. **Résistivité des différents corps. — Variation avec la température.** — Au point de vue de leur résistance, les corps se partagent en deux groupes, les bons conducteurs et les isolants. Pour les corps conducteurs il y a lieu

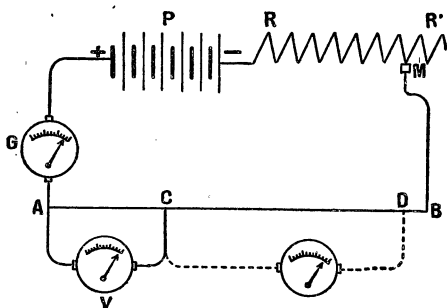


Fig. 19. — La résistance d'un conducteur cylindrique est inversement proportionnelle à sa section.

de distinguer deux sortes de conductibilités : *la conductibilité métallique et la conductibilité électrolytique.*

1. Conductibilité métallique. — C'est la conductibilité que présentent les métaux et leurs alliages, à l'état solide ou à l'état fondu (mercure à la température ordinaire). Pour ces corps, la résistivité est faible et s'exprime en *microhms* par cm.

Le *microhm* est égal à $\frac{1}{1\ 000\ 000}$ d'ohm ou 10^{-6} ohm (1).

Le tableau ci-contre donne les résistivités des métaux et alliages les plus importants au point de vue des applications électriques.

La résistivité des corps métalliques augmente lorsque la température s'élève; le coefficient de variation est d'environ $\frac{3}{1000}$ à $\frac{4}{1000}$ par degré pour les métaux simples, il est beaucoup plus petit pour les alliages.

Si l'on désigne par a le coefficient de variation pour 1° , il est facile de voir que la résistivité à t° se calcule par une formule analogue à celle dont on se sert dans le calcul des dilatations par la chaleur.

Calculons, par exemple, la résistivité du cuivre à 250° , sachant qu'elle vaut 1,56 microhms-centimètre à 0° . Le coefficient $a = 0,0043$.

Pour chaque degré, la résistivité augmente de 0,0043 de sa valeur pour 250° , l'augmentation est $0,0043 \times 250$ de sa valeur, de sorte que, si celle-ci avait été égale à 1 elle serait devenue $1 + 0,0043 \times 250$ et, comme elle était 1,56, on a :

Résistivité à $250^{\circ} = 1,56 \times [1 + 0,0043 \times 250] = 3,237$; elle a plus que doublé.

1. Le préfixe *micro* mis devant un nom d'unité indique par convention un sous-multiple égal à $\frac{1}{1\ 000\ 000}$.

Rappelons aussi la signification d'un exposant négatif $10^{-n} = \frac{1}{10^n}$.

Le préfixe *méga* est employé pour les multiples, il est pris dans le sens de 1 000 000. Ex. : 1 mégohm = 1 000 000 d'ohms.

Il est facile de généraliser le résultat précédent dans une formule

$$\rho_t = \rho_0 [1 + at].$$

ρ_t représente la résistivité à t^0

ρ_0 représente la résistivité à 0^0 .

Le tableau ci-dessous indique les valeurs des coefficients a .

Résistivité de quelques métaux et alliages.

Noms des corps.	ρ en microhms par cent. à 0^0	Coefficient de température.
Argent.	1.46	0.004
Cuivre recuit.	1.56	0.0045
Aluminium.	2.56	0.0045
Zinc.	5.61	0.004
Platine.	8.98	0.00247
Fer.	9.065	0.00625
Nickel.	12.52	0.0057
Plomb.	19.14	0.0041
Tantale.	16	0.003
Mercure.	94.07	0.0009
Maillechort (Cu, Ni, Zn) de	20 à 40	0.0003
Constantan (Cu, 10 : Ni, 40).	50	négligeable
Manganine (Cu, Ni, Mn).	46	négligeable
Ferro-Nickel (Fe et Ni).	78	0.0009

Les trois derniers alliages sont employés pour la confection des rhéostats et des boîtes de résistances, à cause de leur résistivité très grande et aussi parce que leur coefficient de température est faible. Le rhéostan et la rhéostatine sont des alliages analogues à très grande résistivité.

Le charbon a une résistivité beaucoup plus grande que celle des métaux usuels et variable avec l'échantillon considéré; *cette résistance diminue* quand la température s'élève. Pour une lampe à incandescence, la résistance à chaud n'est guère que moitié de la résistance à la température ordinaire : il est évident que c'est la résistance à chaud que l'on considère dans la pratique.

2° **Conductibilité électrolytique.** — C'est la conductibilité que présentent, à l'état liquide, les corps appelés *électrolytes*. Ces corps peuvent être amenés à l'état liquide, soit par fusion sous l'action de la chaleur, soit en les dissolvant dans l'eau. *A l'état solide, ces corps sont isolants.* Les électrolytes sont les acides, les bases et les sels de la chimie; les corps composés qui ont d'autres fonctions chimiques sont ordinairement des isolants aussi bien à l'état liquide qu'à l'état solide.

Les électrolytes en se laissant traverser par le courant sont décomposés (voy. électrolyse) : la décomposition du corps et le passage du courant ont lieu simultanément et le passage du courant est une conséquence de l'électrolyse.

La résistivité des électrolytes est beaucoup plus grande que celle des métaux :

Acide sulfurique au $\frac{1}{10}$, $\rho = 1^{\circ}, 1$.

Sulfate de cuivre à 15 pour 100, $\rho = 24^{\circ}$.

Chlorure d'ammonium (saturation), $\rho = 2^{\circ}, 55$.

Sulfate de zinc (saturation), $\rho = 26^{\circ}, 6$.

Comme on voit, *ces nombres sont des millions de fois plus grands que pour les métaux* (ρ est exprimé en ohms et pour les métaux il était exprimé en microhms.)

La résistivité des électrolytes diminue quand la température s'élève; pour l'acide sulfurique le coefficient de température vaut — 0,015.

3° **Isolants.** — On appelle isolants les corps mauvais conducteurs qui, pratiquement, ont une résistance si grande qu'ils arrêtent le passage du courant. Voici, à titre d'exemples, quelques résistivités de corps isolants :

Verre	9×10^{15} ohms
Cristal.	6×10^{15} —
Caoutchouc.	7×10^{15} —
Gutta	45×10^{15} —
Papier sec	12×10^{14} —

Ces nombres n'ont rien d'absolu, ils varient avec l'échan-

tillon considéré, mais ils nous donnent l'ordre de grandeur de la résistivité des isolants.

37. Remarques. — 1° **Résistance d'un fil de 1^m et de 1^{mm}² de section.** — Dans certains ouvrages, on donne la résistance spécifique pour un fil de 1^m de long et de 1^{mm}² de section. Il est facile de voir que ce nombre est égal à $\rho \times 10\,000$.

En effet, il suffit d'appliquer la formule $R = \rho \frac{l}{s}$ dans laquelle $l = 100$ cm, $s = 1\text{mm}^2 = 0\text{cm}^2,01$

$$R = \rho \times \frac{100}{0,01} = 10\,000 \rho.$$

Pour le cuivre, par exemple, on aurait $1,56 \times 10\,000$ microhms ou $0^{\omega},0156$.

2° **Résistance d'un fil de 1^m et 1^{mm} de diamètre.** — Dans certains cas, on donne la résistance d'un fil de 1^m de long et de 1^{mm} de diamètre. Il est facile de passer de cette donnée à celles qui précèdent.

Un cercle de diamètre d a pour surface $\frac{\pi d^2}{4}$ et si $d = 1\text{mm}$;

$$s_{\text{mm}^2} = \frac{3,1416 \times 1}{4} = 0\text{mm}^2,7854.$$

Soit R la résistance d'un fil de 1^m de long et 1^{mm} de diamètre

$$R = \rho \frac{100}{0\text{cm}^2,007854} = \frac{10\,000 \rho}{0,7854}$$

c'est-à-dire le nombre trouvé plus haut divisé par 0,7854.

Supposons qu'il s'agisse du cuivre, le fil de 1^m de long et de 1^{mm} de diamètre a pour résistance

$$\frac{10\,000 \times 1,56}{0,7854} \text{ microhms} = \frac{10\,000 \times 1,56}{0,7854 \times 10^6} \text{ ohms} = 0^{\omega},02 \text{ env.}$$

38. Conductivité. — Conductance. — C'est l'inverse $\frac{1}{\rho}$ de la résistivité; plus un corps est bon conducteur, plus sa *conductivité* est grande. Si on représente par c la conductivité,

la résistance d'un fil est donnée par la formule $R = \frac{l}{cs}$. Ajoutons encore qu'on appelle *conductance* l'inverse de la résistance :

$$\text{conductance } \frac{1}{R} = \frac{cs}{l}$$

39. Chute de tension en ligne. — Analogie hydraulique. — Il résulte de ce qui a été dit plus haut que le potentiel

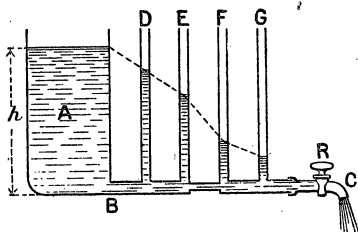


Fig. 20. — Chute de pression le long d'une conduite d'eau.

(ou tension) décroît le long d'un conducteur dans le sens du courant; le phénomène est analogue à la perte de charge ou chute de pression que l'on peut constater le long d'une conduite d'eau. La figure 20 montre cette perte de charge le long du conduit BC. Si le robinet était fermé, le niveau serait le même dans tous les tubes (vases commu-

nicants); lorsqu'on ouvre le robinet, les niveaux s'abaissent comme le montre la figure.

On peut vérifier que la chute augmente à mesure qu'on s'éloigne de B; pour des tubes régulièrement espacés, la chute est la même, à moins qu'entre deux tubes, comme E et F, le canal ne soit plus étroit ou obstrué; dans ce cas la chute est plus grande.

Il en est de même

en électricité, la perte de tension augmente avec la résistance. Considérons une ligne conductrice redressée en ligne droite, et for-

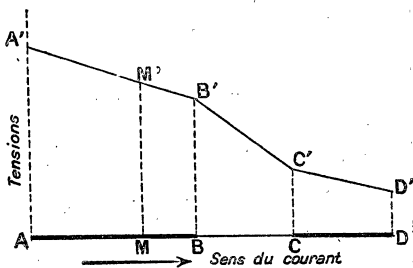


Fig. 21. — Chute de tension le long d'un conducteur.

mée de 3 conducteurs AB, BC, CD (fig. 21). Si aux différents points de AB on élève des perpendiculaires proportionnelles à la tension, on obtient une droite A'B', la longueur MM' représente, à une certaine échelle, la tension en M.

La portion BC, plus mince, est de plus grande résistance et la chute est proportionnellement plus grande, la droite qui représente les tensions est plus inclinée. Si CD est au contraire un fil peu résistant, la chute de tension est faible le long de CD et la droite C'D' est moins inclinée que B'C'.

Le long d'un fil homogène, la chute est proportionnelle à la longueur, comme on l'a vu plus haut en établissant la loi relative à la longueur (voy. 34, 1^{re} loi).

40. Loi d'Ohm dans le cas d'un circuit contenant un ou plusieurs générateurs. — Lorsqu'un générateur : pile, accumulateur ou dynamo, de f.é.m. E, a ses pôles réunis par un conducteur de résistance R, l'intensité du courant ne s'obtient pas en divisant E par R car le courant traverse, non seulement la résistance extérieure R, mais il doit vaincre aussi la résistance du générateur (résistance intérieure) puisque le courant forme un circuit fermé. Si r est la résistance intérieure, l'intensité du courant est :

$$I_{\text{amp}} = \frac{E_{\text{volts}}}{R^{\omega} + r^{\omega}}$$

La loi d'Ohm s'applique, mais il faut prendre la résistance totale $R + r$.

Pour vérifier, par l'expérience, on peut prendre une pile de Daniell dont la f. é. m. est 1,07 et dont on a mesuré la résistance intérieure r ; soient $R = 3\omega$ et $r = 2\omega$; on vérifie, à l'aide d'un ampère-mètre, que le courant vaut

$$\frac{1,07}{3 + 2} = \frac{1,07}{5} = 0^{\text{a}},21$$

Ordinairement, on ne connaît pas la résistance intérieure du générateur, mais on peut donner plusieurs valeurs R, R', ... à la résistance extérieure en se servant d'un rhéostat.

Supposons que r ne soit pas connu; mais on a constaté que, pour

une résistance extérieure 3ω le courant est de $0^{\text{a}}21$, on a l'équation

$$\frac{1,07}{3+x} = 0,21 \text{ d'où } x = 2\omega \text{ environ.}$$

On répète l'expérience avec une autre résistance $R' = 1\omega$, par exemple, et on trouve $\frac{1,07}{1+2} = 0^{\text{a}},36$

ce qui vérifie expérimentalement la formule $I = \frac{E'}{R\omega + r\omega}$.

On ferait les mêmes expériences avec un autre générateur, accumulateur ou dynamo.

Cas de plusieurs générateurs groupés en tension.

— On dit que des appareils quelconques sont groupés en *tension* ou *en série* lorsqu'ils sont placés les uns à la suite des autres de façon à être traversés tous par le même courant. Dans ce cas, les f.é.m. ou tensions des générateurs s'ajoutent et le courant s'obtient en appliquant la formule :

$$\text{Intensité} = \frac{\text{somme des f.é.m.}}{\text{résist. extér.} + \text{somme des résist. des générateurs}}$$

Nous reviendrons sur cette question à propos des groupements des éléments de piles.

41. Différence de potentiel aux bornes d'un générateur. — Court-circuit. — Il résulte des vérifications faites au numéro précédent que la f.é.m. d'un générateur se mesure en *circuit ouvert*, c'est-à-dire que les pôles ne sont pas réunis par un conducteur : ils sont réunis aux bornes d'un voltmètre. Si l'on fait communiquer les bornes par un conducteur, le voltmètre ne mesure plus la f.é.m., il donne la *diff. de pot. aux bornes en circuit fermé* et le résultat que l'on trouve dépend de la résistance R du conducteur. Si I est l'intensité du courant, la loi d'Ohm montre que E' , la diff. de pot. aux bornes est $E' = RI$.

$E' < E$ puisque, d'après la loi d'Ohm étendue à tout le circuit, $E = (R + r) I$.

Dans les exemples du numéro précédent, la f.é.m. est $1^{\text{v}},07$; la diff. de pot. aux bornes dans le 1^{er} cas, avec $R = 3\omega$ serait

$0,21 \times 3 = 0^v,63$. Dans le second cas, $R = 1^a$, on aurait $0,36 \times 1 = 0^v,36$. Ces résultats sont faciles à vérifier avec un voltmètre assez sensible.

Nous remarquerons encore qu'une partie de la tension est perdue dans le générateur. Dans le premier exemple, où $r = 2^a$ et $I = 0^a,21$, la chute de tension due à la résistance du générateur est $0,21 \times 2 = 0^v,42$.

Court-circuit. — On dit qu'un appareil est mis en *court-circuit* lorsque ses bornes sont réunies par une résistance très petite, à peu près négligeable; dans ces conditions le courant prend une intensité qui peut être très grande et capable de détériorer les appareils par suite du dégagement de chaleur et de l'inflammation possible de l'isolant qui entoure le fil : tous les incendies causés par les appareils électriques sont dus à des courts-circuits.

Lorsqu'on met en court-circuit les pôles d'un générateur, on obtient, dans celui-ci, le courant maximum, car $R = 0$.

Supposons qu'on mette en court-circuit une dynamo de f.é.m. 110^v et de résistance intérieure $0^a,5$, le courant produit dans la machine serait $I = \frac{110^v}{0,5} = 220^a$.

42. Généralisation complète de la loi d'Ohm. —

Cas où le circuit contient un récepteur. — Force contre-électromotrice. — Si nous considérons une canalisation d'eau, comme celle de la figure 10, et que l'on mesure, à l'aide de manomètres, la pression en différents points, nous savons que la pression décroît dans le sens du courant. Mais, si entre deux points se trouve une turbine que le courant d'eau peut mouvoir, on constate que la perte de charge entre ces points augmente lorsqu'on fait travailler la turbine. De même, si le circuit électrique contient un moteur, ou un voltamètre dans lequel on effectue une décomposition chimique, il y a une chute de tension supplémentaire : le récepteur se conduit comme s'il avait une f.é.m. de sens contraire à celle du générateur (un générateur dont on aurait renversé les pôles).

Ceci est facile à vérifier à l'aide d'un voltmètre si l'on connaît la résistance du moteur (ou du voltamètre); on mesure la diff.

de pot. aux bornes du moteur en marche, soit V cette différence, soient en outre i l'intensité du courant et r la résistance du moteur, on trouve $V > ri$. — Si le moteur était calé de façon à ne pas tourner, la diff. de pot. aux bornes serait égale au produit de r par l'intensité du courant qui ne serait d'ailleurs pas la même, elle aurait une valeur $i' > i$, puisque le moteur ne travaille pas. — La différence $V - ri = e$ s'appelle la *f.é.m. inverse* ou *force contre-électromotrice* du récepteur.

La diff. de pot. $V = ri + e$ se compose donc de deux parties : ri qui correspond à la loi d'Ohm et e qui dépend du travail fourni par le moteur.

Pour calculer l'intensité du courant dans un circuit qui contient des f.é.m. inverses, il suffit de retrancher ces f.é.m. de celles des générateurs.

$$\text{Intensité} = \frac{\text{somme f.é.m. générat.} - \text{somme f.é.m. inverses}}{\text{somme de toutes les résistances}}$$

Exemple numérique. — Un circuit comprend 3 éléments de pile Daniell montés en série ($e = 1^{\text{v}},07$, $r = 1^{\omega}$) réunis à un voltamètre à eau dont la f.é.m. inverse est $1^{\text{v}},50$, la résistance extérieure, fils et voltamètre est 2^{ω} ; quelle est l'intensité du courant?

$$I = \frac{3 \times 1,07 - 1,50}{2 + 3 \times 1} = 0^{\text{a}},34.$$

EXERCICES

1. Calculer la résistance d'un fil télégraphique en fer galvanisé de 100 km. de longueur et de diamètre 4 mm. Prendre la résistivité du fer dans le tableau du n° 36.

R. 722ω (environ).

2. La ligne précédente étant parcourue par un courant de $0^{\text{a}},03$, quelle est la diff. de pot. aux extrémités?

R. $21 \text{ v. } 66$.

3. Quelle longueur faut-il donner à un fil de manganine, de $1/10$ de mm. de diamètre, pour que sa résistance soit 100ω .

R. $1^{\text{m}},71$.

4. Quel diamètre faut-il donner à un fil de cuivre de longueur 10 m. pour que sa résistance soit 1 ω ?

R. 0 mm. 44.

5. Que devient la résistance de la ligne n° 1 si la température passe de 0° à 40° ?

R. 902 ω . 5. — Elle augmente de 1/4.

6. Calculer le prix d'une ligne de cuivre dont la résistance est 10 ω et la longueur 10 km. Densité du cuivre 8,8, prix de la tonne 2200 fr.

R. 3020 fr. On cherche d'abord la section du conducteur qui est 0 cm²,156, puis le volume (156 dm³) et le poids 1372 kg.

7. Même question pour une ligne en aluminium satisfaisant aux mêmes conditions ; densité 2,7 et le prix 3100 fr. la tonne.

8. Une cuve contient une solution d'acide sulfurique au 1/10 ; deux électrodes de platine rectangulaire ayant 10 cm. de long et 2 cm. de large sont plongées dans le liquide à une distance de 5 cm. Calculer la résistance. ($\rho = 1 \omega, 1$).

* 9. Un générateur donne un courant de 20 a, lorsque ses bornes sont réunies par une résistance de 5 ω ; si on les réunit par une résistance de 50 ω , le courant n'est plus que 2 a. 18. Calculer la f. é. m, et la résistance intérieure du générateur.

* 10. Comment varie la résistance d'un conducteur dont on multiplie par 10 toutes les dimensions linéaires ?

CHAPITRE IV

COURANTS DÉRIVÉS — RHÉOSTATS LOI DE JOULE

On appelle *dérivation* (par analogie avec une dérivation d'un cours d'eau) tout conducteur branché en deux points du circuit principal. Nous allons étudier quelques cas simples.

43. 1^{er} Exemple : le **courant principal se partage en deux courants dérivés**. — Soit un générateur

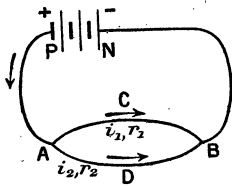


Fig. 22.
Courants dérivés.

PN (fig. 22), le courant se bifurque en A et les fils ACB et ADB se rejoignent pour se rendre au pôle N. Supposons données : l'intensité I du courant principal qui arrive en A et les résistances r_1 et r_2 des dérivation ; nous voulons calculer les intensités i_1 et i_2 dans les branches ACB et ADB. Nous pouvons appliquer la loi d'Ohm à chaque branche, et si on représente par V la

chute de tension entre A et B, on a,

$$\text{Pour la branche ACB, } V = i_1 r_1 \text{ (voy. 33)}$$

$$\text{— — — ADB, } V = i_2 r_2$$

d'où $i_1 r_1 = i_2 r_2$; ou, en mettant sous forme de proportion :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

D'autre part, on a démontré expérimentalement (voy. 21, 2^e exp.) que

$$I = i_1 + i_2 \quad (2)$$

Le problème revient donc à partager I en deux parties i_1 et i_2 qui sont inversement proportionnelles aux résistances r_1 et r_2 .

REMARQUE. — Si l'une des résistances, r_1 par exemple, est très petite par rapport à r_2 , le courant passe à peu près tout entier dans r_1 et ce qui passe en r_2 est négligeable.

Résistance équivalente. — Mais, ordinairement, le problème se présente d'une façon différente; I n'est pas connue, car cette intensité dépend de la *résistance équivalente* aux deux dérivationes r_1 et r_2 ; on appelle ainsi la résistance unique R qu'il faudrait mettre entre A et B pour que le courant principal I garde la même valeur. Cette résistance serait telle que $I = \frac{V}{R}$, V étant la diff. de pot. entre A et B qui ne doit pas changer pour que le courant conserve la même valeur dans le reste du circuit. La loi d'Ohm, appliquée à chaque dérivation, donne :

$$i_1 = \frac{V}{r_1}$$

$$i_2 = \frac{V}{r_2}$$

Ajoutons membre à membre ces deux dernières équations :

$$i_1 + i_2 = \frac{V}{r_1} + \frac{V}{r_2} = \frac{V}{R} = I$$

puisque $I = i_1 + i_2$. Si nous divisons par V les termes de l'égalité

$$\frac{V}{r_1} + \frac{V}{r_2} = \frac{V}{R}$$

on obtient

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (3)$$

L'inverse de la résistance équivalente est égale à la somme des inverses des résistances des dérivation. Ou :

La conductance de deux fils bifurqués est égale à la somme des conductances de chacun d'eux.

44. Application numérique. — Une pile au bichromate est formée de deux éléments montés en série (fig. 22); la f. é. m. de chaque élément est 2^v et la résistance intérieure 0^ω,5. Les fils PA et NB ont, ensemble, une résistance de 0^ω,2, résist. ACB = 1^ω,2, résist. ADB = 2^ω,5. Calculer l'intensité du courant principal et l'intensité dans chaque dérivation.

Pour calculer l'intensité du courant principal, il faut d'abord chercher la résistance équivalente aux dérivation, on a (3)

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{1,2} + \frac{1}{2,5} = \frac{10}{12} + \frac{10}{25} = \frac{250 + 120}{300} = \frac{370}{300}$$

Il suffit de prendre les inverses pour avoir R

$$R = \frac{300}{370} = \frac{30}{37} = 0^{\omega},82 \text{ par excès.}$$

La résistance totale du circuit principal, en y comprenant la résistance équivalente, est

$$\text{Résistance totale} = 0^{\omega},5 \times 2 + 0^{\omega},2 + 0^{\omega},82 = 2^{\omega},02.$$

$$\text{Intensité du courant principal } I = \frac{4^v}{2^{\omega},02} = 1^a,98.$$

Reste à partager 1^a,98 en parties inversement proportionnelles à 1,2 et 2,5 ou en parties proportionnelles aux inverses de ces nombres :

$$\frac{1}{1,2} \text{ et } \frac{1}{2,5} \text{ ou } \frac{10}{12} \text{ et } \frac{10}{25}$$

$$i_1 = \frac{\frac{10}{12}}{\frac{10}{12} + \frac{10}{25}} = \frac{1,98 \times \frac{10}{12}}{\frac{10}{12} + \frac{10}{25}} = \frac{1,98 \times 10 \times 300}{370 \times 12} = 1^a,54.$$

$$i_2 = \frac{\frac{10}{25}}{\frac{10}{12} + \frac{10}{25}} = \frac{1,98 \times \frac{10}{25}}{\frac{10}{12} + \frac{10}{25}} = \frac{1,98 \times 10 \times 300}{370 \times 25} = 0^a,64.$$

45. Principe du shunt des galvanomètres et des ampèremètres.

— On appelle *shunt* une résistance que l'on introduit en dérivation sur le circuit d'un galvanomètre ou d'un ampèremètre pour diminuer sa sensibilité et lui permettre de mesurer des courants plus intenses. Leur usage est nécessaire avec les instruments à fil fin qui pourraient être « brûlés » (fondus) par un courant trop intense.

Pour les galvanomètres, on emploie souvent un appareil dont la figure 23 montre la disposition. Le courant à mesurer arrive aux bornes P et P' placées à l'extrémité de lames de cuivre assez larges pour que leur résistance soit tout à fait négligeable. Les bornes du galvanomètre sont reliées à G et G'.

Des résistances marquées $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ sont reliées à la lame P' G' et sont fixées, à droite, à des bouts de lames de cuivre. Si on introduit en A une fiche de cuivre, la résistance marquée $\frac{1}{999}$ est mise en dérivation dans le circuit et il ne passe plus dans le galvanomètre que le $\frac{1}{1000}$ du courant. En effet, cette fraction $\frac{1}{999}$ signifie que la résistance vaut $\frac{1}{999}$ de la résistance du galvanomètre; le courant principal se partage donc entre deux conducteurs dont les résistances sont G (galvanomètre) et $\frac{G}{999}$ (shunt). Il est aisé de voir que (45, équation (1)) l'intensité dans le shunt doit être 999 fois plus grande que dans le galvanomètre : les $\frac{999}{1000}$ du courant passent donc dans le shunt et $\frac{1}{1000}$ dans le galvanomètre.

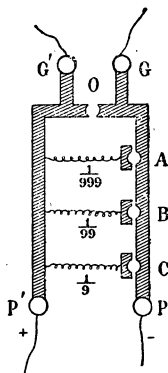


Fig. 23. — Shunt.

46. 2^e EXEMPLE. — *Cas où il y a plus de deux cou-*

rants dérivés. — Généralisons la question précédente, et supposons qu'il y ait entre A et B plus de deux fils (fig. 24); I

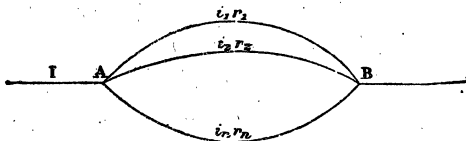


Fig. 24.

représente le courant principal, r_1, r_2, r_3, \dots les résistances et i_1, i_2, i_3, \dots les intensités

Si V est la diff. de pot. entre A et B on a :

$$i_1 = \frac{V}{r_1}$$

$$i_2 = \frac{V}{r_2}$$

$$i_3 = \frac{V}{r_3}$$

$$i_1 + i_2 + i_3 + \dots = \frac{V}{r_1} + \frac{V}{r_2} + \frac{V}{r_3} + \dots = I = \frac{V}{R}$$

car $I = i_1 + i_2 + i_3 \dots$ (n° 21) et si R est la résistance équivalente, $\left(I = \frac{V}{R} \right)$

On tire de là :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots$$

La conductance de l'ensemble est égale à la somme des conductances de chaque fil.

En particulier, si r_1, r_2, r_3, \dots sont des résistances égales et qu'il y ait n fils, la résistance R est n fois plus petite que celle d'un seul fil. Connaissant la résistance équivalente, on pourra calculer $V = IR$ si le courant principal est donné et calculer ensuite

i_1, i_2, \dots à l'aide des équations $i_1 = \frac{V}{r_1} \dots$ etc.

Il est important de remarquer que plus on ajoute de fils en dérivation, plus on diminue la résistance équivalente. De même qu'on facilite l'écoulement de l'eau d'un réservoir en mettant un plus grand nombre de tuyaux pour le passage du liquide.

47. Application au groupement des lampes à incandescence. — On groupe ordinairement les lampes à incandescence en dérivation sur les canalisations électriques.

Les conducteurs AA' et BB' (fig. 25) sont réunis aux pôles de la dynamo. Si on n'allume qu'une lampe, la résistance est égale à r , 200^Ω par exemple; avec deux lampes, la résistance est

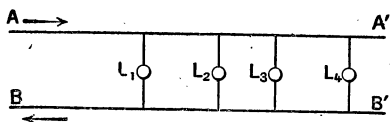


Fig. 25. — Groupements, en dérivation, des lampes à incandescence.

plus petite, elle est réduite de moitié, avec trois lampes elle est réduite au tiers, etc. Si les conducteurs AA' et BB' sont assez gros pour que leur résistance soit à peu près négligeable, et qu'on maintienne entre AA' et BB' une différence de tension égale à 110^v,

chaque lampe est traversée par un courant de $\frac{110^v}{200^\omega} = 0^a, 55$.

48. Cas général des courants dérivés. — Règles de Kirchhoff. — Le problème général de la dérivation est plus complexe que les exemples précédents; on peut avoir affaire à un circuit contenant dans certaines branches des f. é. m. directes (générateurs) ou inverses (récepteurs). Le problème se résout assez facilement en appliquant les règles de Kirchhoff.

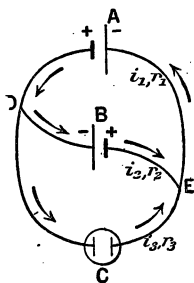


Fig. 26. — Application des règles de Kirchhoff.

1° A chaque sommet tel que D (fig. 26) où aboutissent plusieurs fils, la somme algébrique des intensités est nulle, c'est-à-dire qu'il part autant d'électricité de ce point qu'il en arrive. Dans le cas de la figure 26, on a : $i_1 = i_2 + i_3$ (1).

2° Si l'on parcourt un circuit fermé

quelconque, on peut lui appliquer la loi d'Ohm généralisée, la somme algébrique des produits des intensités par les résistances est égale à la somme algébrique des *f. é. m.*

Comme exemple, considérons le groupement de la figure 26, A est une pile de *f. é. m.* e_1 , B est une pile de *f. é. m.* e_2 , et C un voltamètre de force contre-électromotrice e_3 . Les pôles sont indiqués par les signes + et - et les résistances des branches, y compris celles des appareils, sont r_1 , r_2 , et r_3 . Il s'agit d'évaluer les intensités i_1 , i_2 et i_3 .

Puisque nous avons 3 inconnues, il faut écrire 3 équations.

1° La première règle de Kirchoff, appliquée au point D, donne (avec le sens que l'on a supposé aux courants)

$$(1) \quad i_1 = i_2 + i_3.$$

Il ne faut pas l'appliquer en E parce que l'équation qu'on obtiendrait serait la même.

2° On peut former avec les trois dérivations trois circuits fermés : ADBEA, ADCEA et BDCEB; il suffit d'en considérer deux. — Le troisième donnerait une équation qui serait une conséquence des deux autres. — Le circuit ADBEA donne

$$(2) \quad r_1 i_1 + r_2 i_2 = e_1 + e_2$$

Le circuit ADCEA donne

$$(3) \quad r_1 i_1 + r_3 i_3 = e_1 - e_3$$

il suffit de résoudre le système des trois équations (1) (2) (3) après avoir remplacé les lettres par les nombres pour avoir i_1 , i_2 , i_3 .

Une difficulté se présente pour les signes : les *f. é. m.* sont prises avec le signe + si elles ont pour effet d'élever la tension dans le sens que l'on suit, on les regarde comme négatives si elles abaissent la tension dans le sens que l'on parcourt. Les résistances sont toujours positives, mais les intensités sont affectées d'un signe : elles sont positives si le courant marche dans le sens que l'on parcourt, on doit les affecter du signe - si le courant est en sens inverse de celui que l'on suit. Si par exemple on avait considéré, comme second circuit fermé, le circuit BDCEB, on aurait écrit :

$$i_3 r_3 - i_2 r_2 = -e_3 - e_2.$$

Cette équation s'obtiendrait d'ailleurs en retranchant membre à membre l'équation (2) de l'équation (3).

49. Rhéostats. — Les rhéostats sont des appareils à résistance variable, ils sont employés dans un grand nombre de circonstances : expériences nombreuses de laboratoire, réglage de la tension des dynamos, démarrage des moteurs, réglage des lampes à arc, etc. On peut réaliser un rhéostat à variation continue en tendant un fil sur lequel on déplace un contact mobile comme on l'a fait au n° 34.

Pour avoir une résistance plus grande, on enroule un fil plus

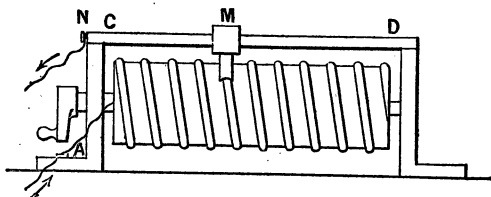


Fig. 27. — Rhéostat à variation continue.

long sur un cylindre isolant, l'une des extrémités du fil est reliée à l'une des bornes A (fig. 27), l'autre borne N est reliée à une barre CD, conductrice, parallèle aux génératrices du cylindre; un curseur M glisse sur CD. On voit aisément que, par le déplacement du curseur et par la rotation du cylindre, on peut prendre une longueur de fil variable d'une manière continue.

Mais, pour les besoins industriels, on se sert surtout de rhéostats à variations discontinues, moins coûteux à construire. On emploie un certain nombre d'hélices de fil conducteur réunies à des *plots* métalliques *a*, 1, 2, 3... (fig. 28). Une manette dont le manche est isolant met en communication l'un des plots avec le fil de la ligne qui est relié au centre O. Lorsque la manette est sur *a*, il n'y a pas de résistance supplémentaire

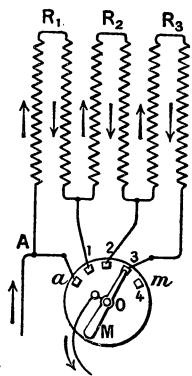


Fig. 28.
Rhéostat industriel.

dans le circuit ; si on la place sur le plot 1, on introduit la résistance R_1 ; sur le plot 2, on introduit $R_1 + R_2$ etc. On fixe souvent un plot m , *plot mort*, sur lequel on applique l'extrémité de la manette pour couper le courant. Cette rupture doit se faire en allant de gauche à droite, de sorte qu'avant la coupure le courant passe par des intensités décroissantes ; on évite ainsi, en partie, les effets de la self-induction (voy. ce mot).

On fabrique économiquement des rhéostats en utilisant des lampes à incandescence usagées dont l'éclat est réduit (mais dont le filament n'est pas rompu). On les groupe en dérivation par groupes de six, par exemple. Si la résistance de chaque lampe est 210 ohms, un groupe correspond à une résistance $\frac{210}{6} = 35$ ohms ; deux groupes à $\frac{35^w}{2}$, trois groupes à $\frac{35^w}{3}$

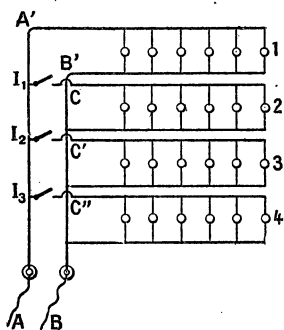


Fig. 29. — Rhéostat formé de lampes.

La figure 29 montre schématiquement la disposition pour 4 groupes : les bornes des lampes sont réunies à des conducteurs, les interrupteurs I_1, I_2, I_3 , permettent d'introduire les groupes 2, 3, 4 (le petit crochet C que fait le fil sur le schéma indique que ce fil passe au-dessus de BB' et ne lui est pas réuni). Si tous les interrupteurs sont levés le courant passe le long de AA' et revient par BB' après avoir traversé le groupe supérieur de six lampes, la résistance introduite est 35^w ; si l'on abaisse I_1

on a 12 lampes en dérivation, la résistance est $\frac{35^w}{2}$ etc. Les lampes de cette résistance laissent passer environ $0^a, 5$, de sorte que, avec un groupe, le rhéostat laisse passer $0, 5 \times 6 = 3^a$; avec 2, 3... groupes le courant qui traverse le rhéostat est $6^a, 9^a, \dots$

Rhéostat à liquide. — Il se compose d'une dissolution d'un

électrolyte — souvent, on emploie le bicarbonate de sodium — Deux lames de fer, maintenues à un support isolant, plongent dans le liquide. Une manivelle permet de monter ou de descendre les lames. Lorsqu'on les descend, on diminue la résistance puisqu'on augmente la surface utile des électrodes. A la partie inférieure se trouve une barre métallique qui met le rhéostat en court-circuit quand les lames sont à fond de course : la résistance de l'appareil est alors négligeable. On peut, évidemment, employer d'autres dispositions : faire varier la distance des électrodes en les écartant ou en les rapprochant.

Remarque sur la construction des rhéostats. —

On emploie, ordinairement, des alliages à grande résistivité et à faible coefficient de température : ferro-nickel, maillechort, manganine, etc.... Pour augmenter la résistance, sans employer une trop grande longueur de fil, on est tenté d'employer un fil très fin, mais on est limité, dans cette voie, par l'intensité du courant maximum qui doit passer dans le rhéostat, surtout si celui-ci doit fonctionner pendant un temps prolongé. On admet que le fil de ferro-nickel peut supporter sans danger l'élévation de température qui correspond à 4 ampères par mm² de section et 6 ampères par mm² pour les fils de maillechort. Le problème se pose donc de la manière suivante :

Application numérique. — Quelle longueur faut-il donner au fil de ferro-nickel d'un rhéostat de 10 ohms, le courant maximum ne devant pas dépasser 20 ampères ?

D'après ce qui a été dit, il faut prendre du fil dont la section est au moins $\frac{20}{4} = 5^{mm^2}$ (1).

De la formule $R = \rho \frac{l}{s}$ on tire $l = \frac{Rs}{\rho}$, or $R = 10\omega$; $s = 0^{cm^2}05$;

$$\rho = 78^{microhms} \text{ ou } \frac{78\omega}{1\,000\,000}$$

On a donc :

$$l^{cm} = \frac{10 \times 0,05 \times 1\,000\,000}{78} = 64^m \text{ environ.}$$

1. Le rayon du fil supposé cylindrique serait en mm. $\sqrt{\frac{5}{3,1416}} = 1 \text{ mm. } 25 \text{ environ.}$ Dans un calcul de ce genre on peut remplacer 3,1416 par $\frac{22}{7}$.

50. **Boîtes de résistances.** — Ce sont des rhéostats utilisés dans les laboratoires pour des mesures électriques; les courants employés sont toujours très faibles (de l'ordre du milliampère, $\frac{1}{1000}$ d'ampère, ou même du microampère, $\frac{1}{1000000}$ d'ampère); on

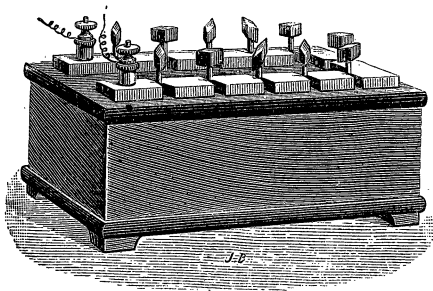


Fig. 30. — Boîte de résistances.

peut donc utiliser un fil très fin et réaliser sous un petit volume des résistances de plusieurs milliers d'ohms (un courant un peu fort ferait fondre de pareils fils). On prend dans ces boîtes des résistances de 1, 2, 5, 10... ohms, comme on prend des masses dans une boîte de poids.

La figure 30 représente l'aspect extérieur d'une boîte de résistances. On voit, sur la face supérieure, des lames métalliques qui présentent, de distance en distance, des interruptions où sont placées des chevilles dont la tête est en ébonite et la partie inférieure métallique. La figure 31 est une coupe partielle et montre, au-dessous de chaque orifice, une hélice de maillechort ou de manganine dont l'un des bouts est relié à A et l'autre à B. Lorsqu'une cheville est en place, par exemple la cheville 1, le courant passe de A en B à peu près sans résistance, à cause de la large section des lames et de la cheville, et il ne passe rien dans la résistance qui est au-dessous (45, remarque). Pour introduire une résistance, il faut enlever la cheville correspondante. — On remarquera que le fil des résistances a été plié en deux avant d'être enroulé en hélice; on évite ainsi les effets de self-induction (181).

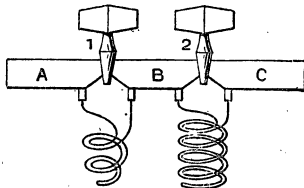


Fig. 31. — Disposition des résistances dans la boîte.

51. **Principe de la mesure des résistances.** — Pont

de Wheatstone. — Donnons seulement le principe. Le montage comprend une pile P (fig. 32); le fil principal se bifurque en C suivant deux dérivations CMD et CND; entre les points M et N se trouve un fil (le pont) et un galvanomètre G. On règle les quatre résistances r, r', r_1, r'_1 de façon qu'il n'y ait pas de courant dans le galvanomètre; à ce moment, les quatre résistances forment une proportion :

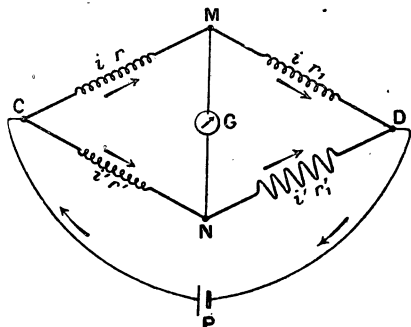


Fig. 32. — Principe de la méthode du pont de Wheatstone.

$$\frac{r}{r_1} = \frac{r'}{r'_1}$$

En effet, remarquons d'abord que s'il ne passe pas de courant dans le pont, l'intensité i dans CM est la même que dans MD et l'intensité i' dans CN est la même que dans ND donc :

Diff. de pot. entre C et M = ri ; diff. de pot. entre M et D = r_1i ;
 Diff. de pot. entre C et N = $r'i'$; diff. de pot. entre N et D = r'_1i' .

Or, les points M et N n'ont pas de diff. de pot. puisqu'il ne passe pas de courant entre M et N et l'on a :

diff. de pot. entre C et M = diff. de pot. entre C et N.
 et M et D = N et D.

d'où l'on déduit : $ri = r'i'$ et $r_1i = r'_1i'$.

Divisons membre à membre et simplifions, il vient :

$$\frac{r}{r_1} = \frac{r'}{r'_1} \tag{1}$$

Pour mesurer une résistance r , par exemple, on la place dans CM, on met en MD une boîte de résistance et en CN et ND deux résistances connues. On prend dans la boîte le nombre d'ohms nécessaires pour amener l'aiguille du galvanomètre au zéro. L'équation (1) fait connaître r puisqu'on connaît les trois autres grandeurs.

On emploie souvent la disposition suivante: sur une planchette (non

représentée) on fixe des lames de cuivre, AC, mMm' et DB (fig. 33) ; leur largeur est assez grande pour que leur résistance soit absolument négligeable. Les fils de la pile P, un élément Daniell, sont réunis aux points C et D (mêmes lettres que dans la fig. 32), la résistance inconnue est mise en r , entre C et M (ne pas oublier que la résistance mm' est négligeable, tout se passe comme si les points m , M et m' étaient confondus), entre M et D on met la boîte de résistances

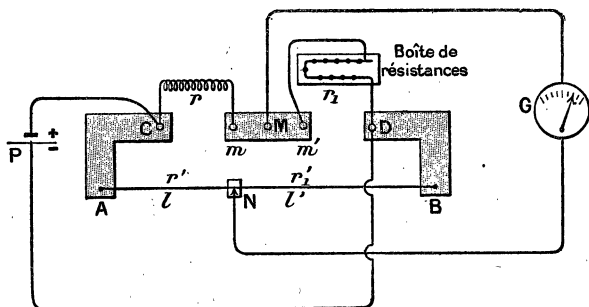


Fig. 33. — Pont de Wheatstone.

dans laquelle on prend une résistance de même ordre de grandeur que celle qu'on veut mesurer. Entre les points A et B est tendu un fil de manganine ou de maillechort *bien régulier* et un curseur N se déplace le long de AB. Ce curseur porte un contact à ressort qu'on peut appuyer sur le fil. Les points M et N sont réunis au galvanomètre. On déplace N jusqu'à ce que le courant soit nul dans le galvanomètre.

Dans l'équation $\frac{r}{r_1} = \frac{r'}{r'_1}$ on peut remplacer le dernier rapport $\frac{r'}{r'_1}$ par celui des longueurs l et l' des portions AN et NB du fil et l'on a :

$$\frac{r}{r_1} = \frac{l}{l'}$$

Remarque. — Emploi d'un téléphone. — Cas des liquides. — Dans la disposition précédente, on peut remplacer le galvanomètre du pont par un téléphone que l'on place à l'oreille, et, comme source électrique, au lieu d'une pile, on prend une petite bobine d'induction dont les bornes du secondaire sont reliées aux points C et D (le primaire est relié à une pile). Tant que le pont

n'est pas réglé suivant la proportion indiquée plus haut, on entend un son qui cesse lorsqu'on a $\frac{r}{r_1} = \frac{r'}{r'_1}$.

C'est toujours de cette manière qu'il faut opérer pour mesurer la résistance d'un liquide qui subit l'électrolyse par le passage du courant. L'emploi des courants alternatifs supprime pratiquement l'électrolyse qui, à cause de la f. é. m. de polarisation change les conditions d'équilibre du pont.

52. Chaleur dégagée dans les conducteurs. — Loi de Joule. — Considérons une portion de conducteur qui présente entre ses extrémités une chute de tension égale à E^v ; nous avons vu (29) que l'énergie électrique dépensée en t^s dans cette portion du conducteur est :

$$W \text{ joules} = E^v I^a t^s \quad (1)$$

La puissance dépensée (énergie par seconde) est :

$$P \text{ watts} = E^v I^a \quad (2)$$

Dans ces formules, on peut remplacer E par la valeur RI , car, en vertu de la loi d'Ohm, $E^v = R^{\omega} I^a$, R étant la résistance. Ce qui donne :

$$\begin{aligned} \text{énergie en } t^s, W \text{ joules} &= RI^2 t \\ \text{puissance, } P \text{ watts} &= RI^2 \end{aligned}$$

Toute cette énergie se transforme en chaleur dans le conducteur, si celui-ci ne contient ni moteur, ni cuve électrolytique ; or, nous savons (10) qu'il faut $4,18 \text{ joules}$, pour produire une petite calorie. La quantité de chaleur dégagée est donc :

$$\text{pour } t^s, Q \text{ calories} = \frac{E^v I^a t^s}{4,18} = \frac{R^{\omega} I^2 t^s}{4,18} \quad (3)$$

$$\text{et par seconde, } Q_1 \text{ cal} = \frac{E^v I^a}{4,18} = \frac{R^{\omega} I^2}{4,18} \quad (4)$$

La formule (3) résume les lois que Joule a découvertes par l'expérience :

1^{re} Loi. — *La quantité de chaleur dégagée dans un conducteur est proportionnelle à sa résistance.*

2^e Loi. — *La quantité de chaleur dégagée dans un conducteur est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.*

3^e Loi. — *Cette quantité de chaleur est proportionnelle au temps pendant lequel le courant passe.*

Vérification expérimentale. — Joule a trouvé ces lois en faisant plonger dans l'eau d'un calorimètre une spirale de fil métallique parcourue par un courant. La quantité de chaleur se déduit de l'élévation de température que l'on mesure.

Voici une expérience de cours assez simple qui permet de vérifier grossièrement les lois ⁽¹⁾. Au lieu d'un calorimètre ordinaire, on prend de petits flacons dans lesquels on met environ 100^{cm}⁵

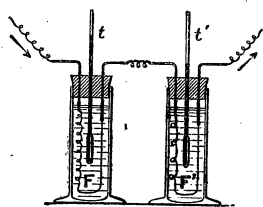


Fig. 34. — Chaleur dégagée par le passage du courant. Loi de Joule.

de pétrole (fig. 34); ce liquide présente l'avantage d'être un bon isolant et d'avoir une chaleur spécifique plus petite que l'eau. Dans chaque flacon, plonge un thermomètre soutenu par un bouchon de caoutchouc et une spirale de fil fin parcourue par le courant. On s'est arrangé pour que dans le premier flacon la résistance soit à peu près

1^o et dans l'autre 0^o,5 (les fils sont en maillechort ou en manganine, ou même en fer très fin; la longueur de l'un est double de l'autre).

Si l'on fait passer un courant de 4 amp. par exemple pendant 1 minute, la température monte d'une dizaine de degrés dans le premier flacon et de la moitié dans le second, ce qui vérifie la 1^{re} loi.

En 2 minutes, l'élévation de température serait double dans chaque flacon (3^e loi).

Un courant de 2 ampères ne donne plus que 2^o,5 et 1^o,25, soit 4 fois moins (2^e loi).

55. Échauffement des fils. — Applications. — Le courant qui parcourt un fil conducteur lui apporte constamment de la chaleur, de sorte que, si le fil n'en perdait pas dans

1. Empruntée au *Cours de Physique* de MM. Faivre-Dupaigre et Carimey.

le milieu ambiant, sa température croîtrait toujours, jusqu'à fusion du fil. Mais, à mesure que la température monte, le corps perd de la chaleur de plus en plus, et il arrive ordinairement un moment où la chaleur, perdue par refroidissement, est égale à celle que le courant apporte : à partir de ce moment la température reste stationnaire. Si l'on opère avec des fils fins la température s'élève facilement jusqu'au rouge, car il faut peu de chaleur pour les porter à cette température; et, comme d'autre part leur résistance est grande, le courant dégage beaucoup de chaleur.

Si l'on fait passer un courant dans une chaîne formée de fils de fer alternativement gros et fins, on observe que les fils fins rougissent; pour une certaine intensité, les gros fils ne rougissent pas. Si on place, dans le même circuit, des bouts de fils différents mais de même diamètre, on constate, pour une intensité convenable, que les fils très bons conducteurs (argent, cuivre) ne rougissent pas, tandis que les fils de très grande résistance (fer, platine, etc.) sont portés à l'incandescence.

Pour arriver à la fusion des fils, il est évident qu'il faut utiliser un courant très intense si le fil est gros et si sa température de fusion est élevée; la fusion des métaux très fusibles comme le plomb ou le zinc peut s'obtenir avec des courants relativement faibles.

Les applications de la chaleur dégagée dans les conducteurs sont très importantes; elles seront étudiées dans la suite : canalisations électriques, coupe-circuits, ampèremètres et voltmètres thermiques pour courants alternatifs, éclairage et chauffage électriques.

54. Cas où le circuit contient une force contre-électromotrice — Généralisation. — Si la portion de conducteur considérée contient un récepteur possédant une force contre-électromotrice (voltamètre ou moteur), on sait (42) que la chute de tension se compose de deux parties, l'une RI due à la loi d'Ohm, l'autre e , f.é.m. inverse du récepteur, de sorte que $E^v = RI + e$.

L'énergie dépensée pour t^s est :

$$W^{\text{joules}} = E^v I t^s = RI^2 t + e I t.$$

Cette énergie se compose de deux parties : l'une RI^2t qui est transformée en chaleur dans le conducteur et produit $\frac{RI^2t}{4,18}$ calories, cette première partie représente une perte, sauf dans le cas de l'éclairage et du chauffage (dégradation de l'énergie, voy. 13), et elle entraîne des difficultés dans la construction des canalisations. La seconde partie eIt représente l'énergie utilisée dans le moteur ou dans la cuve à électrolyse.

On peut évidemment rapporter à 1^s et le produit $(eI)^{\text{watts}}$ représente la puissance consommée par le récepteur.

Les formules précédentes s'appliquent évidemment à tout le circuit d'une canalisation et, si E désigne la f.é.m. du générateur, celui-ci produit, par seconde, une puissance $P^w = EI$ qui se dépense en partie sous forme de chaleur dans les conducteurs et en partie dans les récepteurs.

EXERCICES

1. Aux bornes d'un générateur de f. é. m 110 v. on fixe deux dériva-tions, l'une de 50ω et l'autre de 2ω . Calculer l'intensité du courant dans chaque conducteur, la résistance du générateur étant 0ω , 5. Calculer aussi l'intensité dans le générateur.

R. générateur 45 a. 45, dans les dériva-tions : 1 a. 75 et 45 a. 7.

Pour traiter la question, on commence par chercher la résistance équi-valente aux deux dériva-tions, 1ω . 923 ; de sorte que la résistance totale équivaut à $1,923 + 0,5$.

2. Calculer, dans le problème précédent, la perte de tension dans le générateur et la diff. de pot. aux bornes.

R. 22 v. 7. — 87,4.

3. Calculer la quantité de chaleur dégagée dans chacune des dériva-tions et dans le générateur en 1 s.

R. générateur 247 cal., dériva-tions : 914 cal. et 36°,6.

4. Une lampe à incandescence de 110 volts parcourue par un courant de 0 a. 5 est plongée dans un vase contenant 500 g. d'eau. Calculer l'élévation de température de l'eau après 10 minutes.

R. 15°,8.

* 5. Reprendre la question traitée au n° 44 mais en la compliquant par l'introduction d'un voltamètre de f. é. m. inverse égale à 1 v. 5 dans la branche ADB qui aura pour résistance totale 4ω .

6. Deux éléments de pile de f. é. m. 2 v. et de mêmes dimensions sont réunis par leurs pôles de même nom. Prouver que le circuit n'est parcouru par aucun courant. Les points milieu des fils de jonction sont réunis par une résistance de $1 \omega, 5$ et la résistance de chaque élément, y compris les fils jusqu'au point d'attache de la dérivation, est $0 \omega, 5$. Calculer les intensités dans les différentes parties du circuit.

* 7. Reprendre la même question en supposant que les éléments ont encore même f. é. m., mais des dimensions et, par suite, des résistances différentes; on prendra $0 \omega, 5$ pour l'un des éléments et 1ω , pour l'autre.

CHAPITRE V

ÉLECTROLYSE — POLARISATION

55. **Définitions.** — Rappelons les définitions : on donne le nom d'*électrolyse* à la décomposition d'un corps par le courant électrique. On appelle *électrolyte*

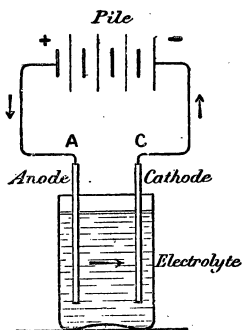


Fig. 35.
Cuve électrolytique.

le liquide qui subit la décomposition et *électrodes* les lames métalliques qui plongent dans le liquide pour amener le courant. L'électrode qui communique avec le pôle positif s'appelle *électrode positive* ou *anode*, ou encore *électrode d'entrée*; l'autre s'appelle *électrode négative*, ou *cathode*, ou encore *électrode de sortie*. Le vase dans lequel on opère est un *voltamètre* ou *cuve électrolytique* (fig. 35).

Un électrolyte est toujours un liquide, on l'amène à cet état par fusion, ou par dissolution dans l'eau. Les acides, les bases et les sels fondus ou dissous sont des électrolytes; les autres liquides composés sont des isolants.

56. **Lois qualitatives de l'électrolyse.** — 1° *Les produits de la décomposition n'apparaissent que sur les électrodes; il ne se forme rien dans l'intérieur du liquide.*

2° *Le métal, ou l'hydrogène, du composé descend le courant et se rend à la cathode; le reste du composé remonte à l'anode.* — Ce reste peut être un corps simple ou

un groupe d'atomes formant ce qu'on appelle en chimie un *radical*.

Exemples : l'acide chlorhydrique dissous se décompose en chlore qui se dégage à l'anode, et en hydrogène qui se dégage à la cathode. Le chlorure de sodium fondu, ou tout autre chlorure métallique, se décompose en chlore et en métal.

57. Réactions secondaires. — La loi précédente est générale; mais, très souvent, les produits de l'électrolyse peuvent réagir sur le liquide ou sur les électrodes et l'on recueille des corps qui ne sont pas ceux que le courant a mis en liberté. On donne à ces réactions qui accompagnent l'électrolyse le nom de *réactions secondaires*.

Prenons quelques exemples.

58. Décomposition de l'eau acidulée par SO^4H^2 .

— Nous avons décrit le voltamètre (voy. 15). L'eau pure n'est pas un électrolyte : elle ne conduit pas le courant. Si on l'additionne d'acide sulfurique SO^4H^2 , il y a électrolyse de ce corps : l'hydrogène H^2 se rend à la cathode et le radical SO^4 à l'anode. Mais ce radical, en présence de l'eau, donne la réaction secondaire : $\text{SO}^4 + \text{H}^2\text{O} = \text{SO}^4\text{H}^2 + \text{O}$, de sorte que l'acide sulfurique est régénéré et on obtient, comme nous savons, deux volumes d'hydrogène à l'électrode négative et un volume d'oxygène à l'autre électrode.

59. Décomposition de la potasse ou de la soude. — Si l'on dissout dans l'eau de la soude NaOH , ce corps est décomposé par le courant : on obtient le sodium Na à la cathode et le radical OH à l'anode. Mais, comme le sodium décompose l'eau, on a : $\text{Na} + \text{H}^2\text{O} = \text{NaOH} + \text{H}$. La soude est régénérée et on obtient de l'hydrogène. Quant au radical OH , il donne, à l'anode, la réaction secondaire : $2\text{OH} = \text{H}^2\text{O} + \text{O}$.

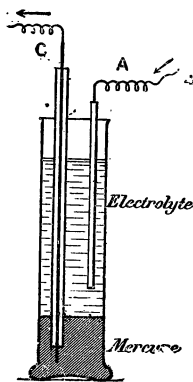
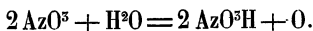


Fig. 36. — Électrolyse avec cathode de mercure.

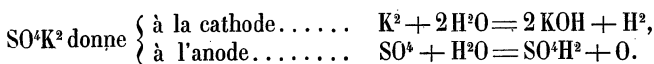
Pour prouver qu'il se fait du sodium, on prend comme cathode du mercure placé au fond d'une éprouvette à pied (fig. 56); au-dessus on met la dissolution de soude dans laquelle plonge une lame de fer qui sert d'anode. Le mercure est relié au pôle négatif par un fil de fer qui passe dans un tube de verre pour l'isoler. Dans ces conditions, il se dégage de l'oxygène sur la lame A et, si on recueille le mercure, on peut, en le distillant, obtenir du sodium. La dissolution de potasse donne des résultats analogues⁽¹⁾.

60. **Sulfate de cuivre. — Azotate d'argent, etc.** — La loi générale nous dit que le sulfate de cuivre SO^4Cu doit donner SO^4 à l'anode et Cu à la cathode. Si l'on fait l'électrolyse d'une solution de sulfate de cuivre avec des électrodes de platine, on obtient un dépôt de cuivre sur la cathode; et, à l'anode, le radical SO^4 donne, avec l'eau, de l'acide sulfurique et un dégagement d'oxygène. Les autres sulfates donnent des résultats semblables.

L'azotate d'argent AzO^5Ag se décompose en argent qui va à la cathode et le radical AzO^5 va à l'anode où, en présence de l'eau, il produit de l'acide azotique et de l'oxygène :



61. **Sels alcalins.** — Dans le cas des sels alcalins, la réaction se complique par suite de l'action du métal sur l'eau. Le sulfate de potassium SO^4K^2 donne, d'après la loi générale : SO^4 à l'anode, et K^2 à la cathode. Mais, comme précédemment, le radical SO^4 , en présence de l'eau, donne de l'acide sulfurique et de l'oxygène; à la cathode, le potassium réagit sur l'eau pour donner de la potasse et de l'hydrogène.



On fait souvent l'expérience dans un tube en U dans lequel

1. On peut montrer, dans un cours, où l'on ne peut faire cette distillation, que ce mercure, traité par l'eau, dégage de l'hydrogène.

on a mis une dissolution de sulfate de potassium additionnée de sirop de violette ; la dissolution devient verte du côté de la cathode à cause de la potasse ; elle rougit par l'acide sulfurique du côté de l'anode. On peut remplacer le sirop de violette par une infusion de fleurs de mauve.

62. Anode soluble. — Lorsque l'anode est constituée par un métal attaquable par les produits de l'électrolyse, elle peut se dissoudre.

Le cas le plus intéressant est celui où elle est formée par le métal du sel soumis à l'action du courant. Exemple : on fait l'électrolyse du sulfate de cuivre avec une anode de cuivre ; le radical SO^4 réagit sur cette anode et régénère le sulfate de cuivre : $\text{SO}^4 + \text{Cu} = \text{SO}^4\text{Cu}$. L'action du courant se borne à un transport de métal de l'anode sur la cathode, et la composition du bain, si on a le soin de l'agiter, reste à peu près constante. *Ce cas est toujours employé lorsqu'on veut déposer des métaux.*

65. Loi quantitative de l'électrolyse ou loi de Faraday. — Lorsque nous avons défini la quantité d'électricité, nous avons établi les faits suivants :

1° La quantité d'électrolyte décomposée est indépendante de la forme et des dimensions des voltamètres et elle est proportionnelle au temps (si le courant est constant).

2° La quantité d'électrolyte décomposée est proportionnelle à la quantité d'électricité qui traverse le voltamètre : c'est là une définition de la quantité d'électricité (voy. 21).

3° Les expériences faites au n° 21 en étudiant l'électrolyse de l'eau (ou plus exactement de la soude) peuvent se généraliser avec un électrolyte quelconque ; il y a lieu de chercher les proportions des différents électrolytes décomposés par la même quantité d'électricité, il suffira de peser les cathodes ou de recueillir les gaz qui se dégagent et de les mesurer. On trouve ainsi que :

Lorsque plusieurs voltamètres sont parcourus par le même courant, il y a même nombre de valences rompues dans chacun d'eux.

Faisons passer le même courant dans une suite de voltamètres contenant les dissolutions suivantes :

Azotate d'argent	$AzO^5 - Ag$	$Ag' = 108$
Sulfate de cuivre.	$SO^4 = Cu$	$Cu'' = 63$
Chlorure d'or	$Au \equiv Cl^3$	$Au''' = 196$
— stannique.	$Sn \equiv Cl^4$	$Sn^{IV} = 118$
— stanneux	$Sn = Cl^2$	$Sn'' = 118'$
Acide sulfurique	$SO^4 = H^2$	$H' = 1$

(Les traits, dans la première colonne, représentent les valences.)

On vérifiera, en recueillant les produits de l'électrolyse à la cathode, que les poids obtenus sont entre eux comme 108, $\frac{63}{2}$, $\frac{196}{3}$, $\frac{118}{4}$, etc.

On donne quelquefois le nom d'*équivalent électrochimique* au quotient du poids atomique par la valence que le corps possède dans le composé considéré. L'étain, par exemple, a pour équivalents électrochimiques $\frac{118}{4}$ dans $SnCl^4$ et $\frac{118}{2}$ dans $SnCl^2$.

Enfin, l'expérience a prouvé qu'il faut 96 600 coulombs pour rompre une valence-gramme d'un électrolyte quelconque (ou mettre en liberté un équivalent électrochimique).

64. Résumé. — Loi de Faraday. — Il faut 96 600 coulombs pour rompre une valence-gramme (ou pour mettre en liberté un équivalent électrochimique) d'un électrolyte quelconque et ce résultat est indépendant des dimensions et de la forme des voltamètres.

Cette loi nous permet de généraliser la définition que nous avons donnée précédemment pour le coulomb : *Le coulomb est la quantité d'électricité nécessaire pour rompre $\frac{1}{96\ 600}$ de valence-gramme d'un électrolyte quelconque.*

On définit souvent le coulomb par l'électrolyse de l'azotate d'argent : 1 coulomb dépose 0^g 001 118 d'argent $\left(\frac{108}{96\ 600} \right)$.

Un courant de 1 ampère dépose cette même quantité en une seconde (1).

65. **Applications.** — Elles seront étudiées en même temps que toutes les applications chimiques (voy. ch. XXVIII).

66. **Dépense d'énergie dans l'électrolyse.** — **F. é. m. de polarisation.** — Mesurons la diff. de pot. entre les deux bornes d'un voltamètre dans lequel l'électrolyse se produit régulièrement depuis quelques instants, nous trouvons une valeur E volts. D'autre part, si nous connaissons la résistance r , qu'on a pu mesurer, et l'intensité du courant I , qui est donnée par un ampèremètre, on trouve que $E > rI$: la chute du potentiel est plus grande que celle qui correspond à la loi d'Ohm. Posons $E - rI = e$, ou

$$E = rI + e \quad (1)$$

La quantité e , excès de la diff. de pot. sur celle que donnerait la loi d'Ohm, s'appelle la **f. é. m. de polarisation** du voltamètre. Cette grandeur dépend de la nature de la réaction chimique et aussi des électrodes. Si nous multiplions par I les deux membres de l'équation (1) on obtient :

$$EI = rI^2 + eI \quad (2)$$

Le terme EI , qui représente l'énergie totale dépensée par seconde dans le voltamètre, se compose de deux parties :

1° la quantité rI^2 , transformée en chaleur par effet Joule, elle produit $\frac{rI^2}{4,18}$ calories ;

2° le terme eI correspond à l'énergie absorbée par la réaction chimique et à d'autres phénomènes secondaires. Lorsque ces derniers sont peu importants, ou bien lorsqu'ils n'existent pas, il est possible de calculer la f. é. m. de polarisation ; mais, le plus souvent, le nombre calculé est plus petit que celui donné par la mesure directe (voy. plus bas un exemple, aux exercices).

Il résulte de l'existence de la f. é. m. de polarisation que,

1. Des expériences de haute précision ont donné un nombre un peu différent 96 540 au lieu de 96 600. Dans la pratique, on se contente du nombre 96 600.

pour réussir une électrolyse, il faut employer une source de f. é. m. supérieure à la f. é. m. de polarisation. Par exemple, pour l'eau acidulée par l'acide sulfurique, la f. é. m. de polarisation étant environ $1^v,5$, il faut employer une diff. de pot. plus grande que $1^v,5$; c'est ainsi qu'avec un élément Daniell de f. é. m. $1^v,07$ on ne peut décomposer l'eau acidulée, mais on réussit avec deux éléments mis en série ⁽¹⁾.

Lorsqu'on emploie une f. é. m. insuffisante, les électrodes se polarisent et prennent une diff. de pot. de sens contraire à celle de la source, de sorte que le courant ne peut se produire : l'électrolyte joue sensiblement le rôle de soupape qui ne laisse passer le courant qu'à partir d'une f. é. m. supérieure à la f. é. m. de polarisation.

67. Polarisation des électrodes. — Courant secondaire. — La f. é. m. de polarisation d'un voltamètre s'explique par la modification qu'éprouvent les électrodes en se recouvrant des produits de l'électrolyse (même si ces produits sont gazeux, ils sont en partie absorbés par les électrodes). Ces produits ont une sorte de tendance à se recombinaison pour régénérer l'électrolyte et, par suite, tendent à produire un courant inverse de celui qui a provoqué la décomposition. Lorsque les électrodes sont ainsi modifiées, on dit qu'elles sont *polarisées*, de là le nom de f. é. m. de polarisation donné à la f. é. m. inverse d'un voltamètre.

Expérience. — Le courant d'une pile P (fig. 37) décompose un électrolyte quelconque placé dans le voltamètre V. Après avoir fait passer le courant pendant quelques minutes, on enlève le fil de fer *f* qui plonge dans deux petits godets à mercure A et B, et on fait plonger ce fil de façon à relier B et C. On voit se produire dans le galvanomètre G un courant inverse de celui de la pile : le voltamètre devient donc une source d'électricité. Le courant qu'on obtient ainsi est appelé *courant secondaire* ou *courant de polarisation*; ordinairement, il a une durée très courte; le galvanomètre reçoit seulement une impulsion.

1. Avec un nombre quelconque de daniells mis en quantité on ne peut pas réussir puisque la f. é. m n'est que $1^v.07$.

L'expérience réussit avec tous les électrolytes ; il est intéressant de la faire en prenant un voltamètre à eau acidulée et des électrodes de plomb (principe des accumulateurs) ; dans ce cas, le courant de polarisation dure plus longtemps.

68. **Cas où la f. é. m. de polarisation est nulle.** — Si les électrodes sont constituées par le métal du sel dont on fait l'électrolyse, il n'y a pas modification des électrodes et, par suite, la f. é. m. de polarisation est nulle, la chute de potentiel est donnée simplement par la loi d'Ohm. Ce cas se présente, par exemple, quand on fait l'électrolyse d'une solution de sulfate de cuivre entre deux électrodes de cuivre. Nous avons vu (62) que le phénomène se borne à un transport de cuivre de l'anode sur la cathode : il n'y a pas à fournir d'énergie pour la décomposition chimique, puisque la composition du bain reste constante.

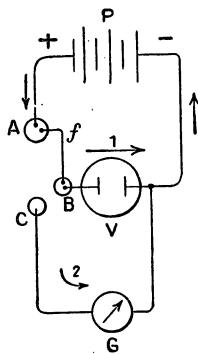


Fig. 37. — Courant secondaire résultant de la polarisation des électrodes.

EXERCICES.

1. Calculer l'intensité d'un courant qui a déposé 1 g. 5 d'argent en 50 minutes. $Ag = 108$.

2. Quel poids de cuivre un courant de 1 a déposé-t-il par heure en traversant une solution de sulfate de cuivre $\frac{Cu}{2} = \frac{65}{2}$.

3. Quelle densité de courant faut-il employer pour déposer une épaisseur de $\frac{1}{10}$ de mm. d'argent par heure sur la cathode dans l'électrolyse de l'azotate d'argent. $Ag = 108$, densité du métal = 10,5. On évalue la densité du courant en ampères par dm^2 .

R. 2 a. 61.

Il suffit de supposer une cathode de $1 dm^2$ de surface et de calculer le poids de la couche d'argent qui a $1 dm^2$ de surface et $1/10$ de mm. d'épaisseur ; on trouve ainsi 10 g 5. Il reste ensuite à calculer l'intensité du courant qui dépose 10 g. 5 d'argent en 1 heure.

*4. Calculer la f. é. m. de polarisation d'un voltamètre à eau, sachant que la chaleur de formation de l'eau est 69 000 calories.

R. 1 v. 50 environ.

69 000 calories représentent l'énergie de la réaction $H^2 + O = H^2O$, c'est-à-dire la chaleur dégagée par la combinaison de 2 g. d'H avec 16 g. d'O. Pour 1 g. d'H on aurait 34 500 calories. Cette chaleur correspond à $34\,500 \times 4,18 = 144\,210$ joules. Or, pour dégager 1 g. d'H il faut 96 600 coulombs qui doivent éprouver une chute de potentiel x , telle que $96\,600 \times x = 144\,210$. On tire de cette équation $v = 1$ v. 50.

CHAPITRE V

PILES

69. *Définitions.* — *Pile de Volta.* — Les piles sont des générateurs chimiques d'énergie électrique : elles dépendent de l'énergie chimique. Un élément de pile se compose d'un liquide excitateur qui est un électrolyte dans lequel plongent deux lames de *métaux différents*, l'une des lames métalliques pouvant être remplacée par du charbon. Ces lames, appelées électrodes, portent, chacune, un bout de fil de cuivre qui constitue : l'un le pôle positif, l'autre le pôle négatif.

L'une des lames est attaquée par l'électrolyte et s'y dissout peu à peu ; dans la pratique, cette lame est toujours du zinc. Les autres métaux, facilement attaquables par les acides à froid, sont moins avantageux ; le fer, en particulier, dont le prix est moins élevé que celui du zinc, donne des f. é. m. trop faibles. La lame de zinc qui réagit sur le liquide excitateur forme l'électrode négative. Une pile se compose d'un ou plusieurs éléments.

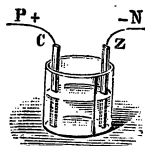


Fig. 38.
Élément Volta.

Le premier élément de pile a été inventé par Volta à la fin du xviii^e siècle. On réalise un élément Volta en plongeant dans un vase contenant de l'eau acidulée par l'acide sulfurique ($\frac{1}{10}$ d'acide environ) une lame de cuivre C (fig. 38) et une lame de zinc Z ; des bouts de fils de cuivre P et N sont soudés à chaque lame et forment les pôles du générateur⁽¹⁾.

1 La pile primitive de Volta était constituée par une série d'éléments

La lame de zinc réagit sur l'acide et produit du sulfate de zinc qui reste dissous dans le liquide et de l'hydrogène qui se dégage. Tant que les bouts des fils P et N sont séparés, l'hydrogène ne se produit que sur le zinc et rien n'apparaît sur le cuivre. Si nous réunissons les bouts des fils P et N, nous observons que l'hydrogène se dégage surtout sur le cuivre et pourtant ce métal n'agit pas chimiquement sur l'acide sulfurique : on peut s'assurer par des pesées que le poids du cuivre reste invariable; l'hydrogène qui se dégage sur la lame de cuivre provient donc de l'action de l'acide sur le zinc. Il semble que cet hydrogène soit transporté sur le cuivre (il n'y est pas, d'ailleurs, transporté sous forme de bulles gazeuses visibles dans le liquide). Le dégagement d'hydrogène sur le cuivre est conforme aux lois de l'électrolyse : l'hydrogène se dégage sur l'électrode de sortie du courant.

70. *Emploi du zinc pur ou du zinc amalgamé.*

— Si l'on remplace la lame de zinc ordinaire Z par une lame de zinc absolument pur, on constate qu'en *circuit ouvert*, c'est-à-dire lorsque les fils P et N sont séparés, il ne se produit aucune réaction chimique, par suite, aucun dégagement d'hydrogène; mais, si l'on *ferme le circuit*, en réunissant par un fil conducteur les pôles P et N, il y a réaction, dissolution du zinc dans l'acide par formation du sulfate de zinc et *tout l'hydrogène* se dégage sur le cuivre, ce qui est conforme à la loi de l'électrolyse.

Le zinc pur étant assez difficile à préparer et, par suite, assez coûteux, on le remplace, dans la pratique, par du **zinc amalgamé** (zinc combiné à une certaine quantité de mercure), qui possède à peu près les mêmes propriétés. Il ne se dégage pas sensiblement d'hydrogène sur le zinc amalgamé et ce métal ne se dissout dans l'acide que lorsque le circuit est fermé. *Dans tous les éléments de piles on n'emploie que du zinc amalgamé*, lequel présente un double avantage : il ne se polarise pas par la

formés chacun d'un disque de cuivre et d'un disque de zinc, séparés par une rondelle de *drap* imbibée d'acide sulfurique étendu. Un certain nombre de ces éléments étaient *empilés* les uns au-dessus des autres, de là le nom de *pile*.

production d'hydrogène et la pile ne dépense pas de zinc (s'il est bien amalgamé) lorsque le circuit est ouvert.

71. Polarisation de la pile. — Dépolarisants. —

Le courant fourni par un élément Volta diminue rapidement d'intensité, à partir de l'instant où l'on a fermé le circuit et, après quelques minutes, il n'a plus qu'une faible valeur par rapport à celle qu'il avait au début. Cet affaiblissement du courant n'est pas dû à une augmentation sensible de la résistance de la pile, mais à une diminution de sa f. é. m. Pour le prouver, on mesure à l'aide d'un voltmètre la f. é. m. d'un élément que l'on vient de monter et dont les pôles n'ont pas encore été réunis par un fil conducteur, on trouve une f. é. m. un peu plus petite qu'un volt, 0^v,8. On réunit les pôles par un fil conducteur que l'on supprime après quelques minutes, on mesure à nouveau la f. é. m. et l'on trouve un nombre beaucoup plus petit que 0^v,8. Lorsqu'un élément a ainsi perdu une partie de sa f. é. m., on dit qu'il est *polarisé*. La polarisation, c'est-à-dire la perte de f. é. m., est plus rapide si la pile est fermée sur un circuit de faible résistance et que, par suite, l'intensité du courant qu'elle débite est assez grande. La polarisation a pour cause la modification éprouvée par la lame de cuivre sur laquelle se fixe une gaine adhérente d'hydrogène; c'est la lame positive de l'élément qui est polarisée.

Un élément polarisé, que l'on abandonne à lui-même pendant assez longtemps, en *circuit ouvert* reprend, peu à peu, sa f. é. m. primitive : il se *dépolarise* de lui-même, mais lentement.

Si l'on veut maintenir la f. é. m. initiale, il faut supprimer le dégagement d'hydrogène sur la lame de cuivre, on y arrive en introduisant dans le liquide excitateur des *matières oxydantes* appelées *dépolarisants* dont l'oxygène se combine à l'hydrogène pour donner de l'eau; on est ainsi conduit à des piles autres que celle de Volta, laquelle n'est jamais employée en pratique.

72. Pile au bichromate ou pile Grenet. — On ajoute à l'eau acidulée du bichromate de potassium ou de sodium (celui-ci est plus économique) et l'on remplace le cuivre par du charbon des cornues. La forme la plus usitée est celle de la

figure 59, dans laquelle le pôle positif est constitué par deux lames de charbon C et C' réunies par une traverse métallique.

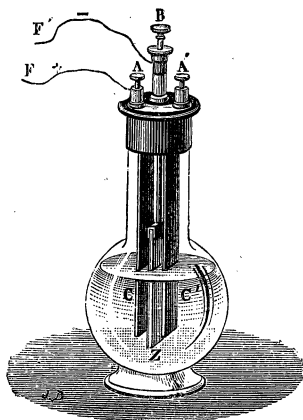


Fig. 39. — Pile au bichromate.

Le pôle négatif est une plaque de zinc amalgamé Z. Pour supprimer complètement l'usure en circuit ouvert, on peut soulever le zinc au-dessus du liquide, lorsqu'on ne se sert pas de l'élément. Dans cette pile, il n'y a pas de dégagement d'hydrogène. Le bichromate est réduit, il se fait de l'alun de chrome, du sulfate de zinc et de l'eau. La f. é. m. est, au début, voisine de 2 volts, mais elle diminue peu à peu.

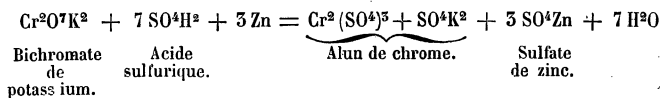
La résistance de cette pile est assez petite; elle dépend évidemment des dimensions; pour un élément d'un litre elle n'est que de quelques centièmes d'ohm. Le liquide, à la fois exciteur et dépolarisant, a, ordinairement, la composition suivante :

Eau	1000
Acide sulfurique	250
Bichromate de potasse ou de soude.	120

Le liquide qui est rouge orangé au début devient vert-brun foncé à mesure qu'il se forme de l'alun de chrome⁽¹⁾.

73. Piles à deux liquides. — Autres dispositions de la pile au bichromate. — On obtient des piles plus constantes, en séparant par un vase poreux le liquide exciteur

1. La réaction chimique de cette pile est résumée par l'équation :



et le dépolarisant. On améliore la pile *au bichromate*, en mettant la dissolution de bichromate, additionnée d'acide sulfurique, pour diminuer la résistance, dans un vase poreux où plonge la lame de charbon. Ce vase est placé dans un récipient, non poreux, contenant l'acide sulfurique étendu et la plaque de zinc.

La disposition est la même que pour la pile de Bunsen. On peut aussi employer la disposition inverse, mettre le zinc et l'eau acidulée dans le vase intérieur, le charbon et le dépolarisant dans le vase extérieur. La pile à deux liquides se polarise moins vite que la pile à un seul liquide; de plus, le dépolarisant est mieux utilisé puisqu'il est placé dans le compartiment où il doit agir et, par suite, on en dépense moins. Le vase poreux empêche partiellement le mélange des liquides, mais laisse passer le courant; toutefois, il a pour conséquence une augmentation de la résistance de la pile.

La pile au bichromate est assez utilisée dans les petites installations domestiques ou dans les laboratoires où l'on ne peut se procurer le courant d'une usine ou des accumulateurs. On a donné à ces piles des formes assez variées. Lorsqu'on emploie plusieurs éléments, il est commode de fixer les électrodes à un support que l'on soulève à l'aide d'un treuil (pile à treuil) lorsqu'on ne se sert pas de courant.

La composition des liquides employés est la suivante :

Liquide excitateur :

Eau.	9
Acide sulfurique.	1

Liquide dépolarisant :

Eau.	1 000
Bichromate de potasse ou de soude.	150
Acide sulfurique	200

74. **Élément Daniell.** — Le dépolarisant est une dissolution concentrée de sulfate de cuivre, placée dans un vase poreux D (fig. 40) dans lequel plonge la lame de cuivre qui forme le pôle positif. Ce vase poreux est placé à l'intérieur d'un

vase V non poreux qui contient une lame cylindrique de zinc amalgamé. Celle-ci porte une fente qui permet la circulation du liquide. Le vase V contient de l'acide sulfurique étendu d'eau.

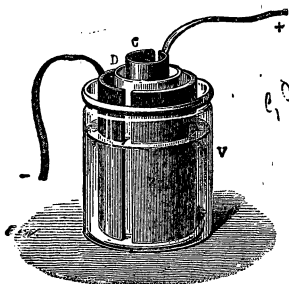
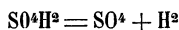


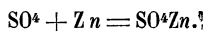
Fig. 40. — Élément Daniell.

Lorsqu'on réunit les pôles par un conducteur, le courant passe dans les liquides et produit leur électrolyse :

L'acide sulfurique donne :



L'ion SO^4 , remonte le courant, réagit sur le zinc pour former du sulfate de zinc qui se dissout,

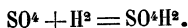


L'hydrogène descend le courant et tend à venir se dégager sur le cuivre.

Le sulfate de cuivre donne, par l'électrolyse :



L'ion Cu descend le courant et vient se déposer sur la lame de cuivre dont le poids augmente. L'ion SO^4 remonte le courant et, rencontrant l'hydrogène, il se produit de l'acide sulfurique :



L'acide sulfurique se trouve régénéré et tout se borne, comme réaction finale, à la transformation du sulfate de cuivre en sulfate de zinc. Au pôle négatif, il y a dissolution du zinc et, au pôle positif, dépôt de cuivre,



On peut d'ailleurs supprimer l'acide sulfurique du vase extérieur et le remplacer par une solution de sulfate de zinc.

La f. é. m. de cet élément est 1^v,07; la résistance, surtout à cause du vase poreux, est assez grande; la pile n'est donc pas très puissante mais elle est remarquable par sa constance : elle est à peu près impolarisable, la f. é. m. reste constante pourvu qu'on ait soin d'y ajouter des cristaux de sulfate de cuivre de façon à maintenir la solution concentrée.

75. **Autre disposition. — Pile Callaud.** — On a imaginé différentes dispositions de cette pile qui ont pour but de diminuer sa résistance en supprimant le vase poreux.

La pile Callaud, usitée dans la télégraphie et dans les chemins de fer, se compose d'un grand vase V (fig. 41), au fond duquel on place un disque de cuivre relié à un gros fil de cuivre P entouré d'une épaisse couche de gutta dans la partie qui plonge dans le liquide; une lame de zinc amalgamé cylindrique soutenue sur les bords du récipient, par des crochets, plonge jusqu'au milieu de la hauteur. On verse dans le récipient de l'eau acidulée peu concentrée et, à l'aide d'un entonnoir qui va jusqu'au fond, on introduit une solution concentrée de sulfate de cuivre. Ce liquide étant plus dense que l'eau acidulée, se répand au fond du vase et les deux liquides restent superposés à cause de leur différence de densité. Si l'on a soin de ne pas agiter les liquides et de ne pas transporter l'élément, les liquides restent séparés très longtemps et ne se mélangent pas plus vite que s'ils étaient séparés par un vase poreux. On a soin de maintenir concentrée la solution de sulfate de cuivre en laissant tomber des cristaux de ce corps au fond du récipient.

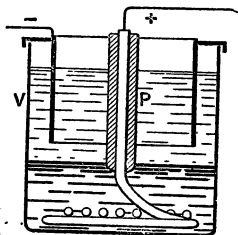


Fig. 41. — Pile Callaud.

La résistance de cet élément est beaucoup plus petite que celle de l'élément Daniell ordinaire.

L'élément Médinger a une disposition analogue à celle de l'élément Callaud.

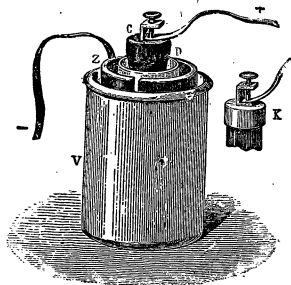


Fig. 42. — Élément Bunsen.

76. **Élément Bunsen.** —

Le dépolarisant est de l'acide azotique que l'on place dans le vase poreux D (fig. 42) et, comme le cuivre serait attaqué, on le remplace par une lame de charbon à laquelle on attache le fil de cuivre qui sert de pôle positif.

Le vase D est placé à l'intérieur d'un vase V qui contient la

lame de zinc et l'acide sulfurique étendu. Il y a réduction de l'acide azotique par l'hydrogène; il se forme de l'eau et des vapeurs nitreuses qui viennent se dégager peu à peu à la surface du liquide. La f. é. m. est 1 volt,8; la résistance est faible. C'est une pile très puissante; mais elle est beaucoup moins constante que la pile de Daniell, car les liquides qui la composent s'épuisent, elle ne donne plus rien après quelques heures. Elle a, en outre, l'inconvénient de dégager des vapeurs nitreuses dangereuses à respirer.

77. Pile de Leclanché. — La pile de Leclanché est utilisée pour les sonneries électriques et pour tous les services intermittents. Le dépolarisant est un solide, du bioxyde de manganèse aggloméré avec du charbon; le mélange remplit le vase poreux T (fig. 43). — Dans certains modèles le vase poreux

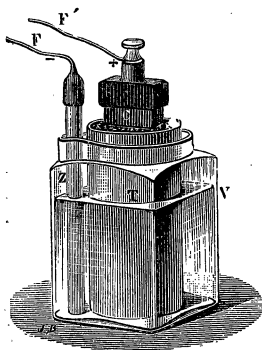


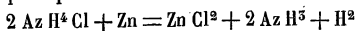
Fig. 43.
Élément Leclanché.

est supprimé et le mélange solide forme un cylindre placé au milieu de l'élément. — Le vase extérieur V contient le zinc Z et une dissolution de chlorure d'ammonium⁽¹⁾. Lorsqu'on ferme le circuit, le zinc décompose le chlorure d'ammonium pour faire du chlorure de zinc qui se dissout. Au pôle positif, il se forme de l'ammoniaque qui se dissout également et de l'hydrogène qui réduit le bioxyde de manganèse⁽²⁾. La dépolarisation est assez lente, car le dépolarisant est un solide; aussi, la pile ne peut pas fournir un travail prolongé. Mais elle convient pour

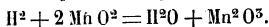
un service intermittent, car elle ne s'use pas du tout en circuit

1. Rappelons que le chlorure d'ammonium AzH^4Cl est aussi appelé chlorhydrate d'ammoniaque ou sel ammoniac.

2. La réaction principale est :



L'hydrogène réduit le bioxyde de manganèse :



ouvert et, par suite, dépense très peu. La f. é. m. est 1 volt,46 et la résistance assez grande.

78. Piles dites sèches ou piles à liquide immobilisé. — Ce sont des éléments qui présentent l'avantage d'être facilement transportables ; ils sont clos hermétiquement et le liquide est immobilisé dans une substance poreuse. On emploie, ordinairement, des éléments du type Leclanché. Une première disposition consiste à prendre un élément Leclanché, sans vase poreux, composé d'un récipient en zinc servant d'électrode négative ; au centre est placé un cylindre de charbon entouré d'un mélange aggloméré de bioxyde de manganèse et de charbon. Dans le récipient, on coule une dissolution chaude de gélatine à laquelle on ajoute du sel ammoniac. Par refroidissement, le liquide se prend en gelée. On fixe le couvercle d'une façon hermétique. Une borne est fixée au charbon, l'autre au vase de zinc. On emploie ordinairement, au lieu de la gélatine animale, une solution d'*agar-agar* (substance gélatineuse qu'on extrait de certaines algues) : 50 g. d'*agar-agar* sont dissous dans 3 litres d'eau bouillante puis on ajoute 600 g. de sel ammoniac ; ce liquide, coulé chaud dans la pile se prend en gelée par refroidissement.

On peut aussi remplacer la gélatine par des substances poreuses que l'on imprègne de la solution de sel ammoniac ; les substances poreuses employées sont le plâtre, la sciure de bois, le cofferdam (fibre de noix de coco), etc.

Les piles sèches sont employées pour les postes portatifs de télégraphie, de téléphonie, pour les essais de lignes électriques, etc., on les utilise aussi sur certains véhicules automobiles pour faire fonctionner la bobine d'allumage, etc.

79. Quelques détails sur le montage des piles. — **Amalgamation du zinc.** — Le zinc doit toujours être bien amalgamé. Si la lame a la forme cylindrique, on la fait reposer par sa génératrice dans une cuvette plate (ou mieux dans une cuvette à cavité demi-cylindrique) dans laquelle on a mis une petite couche de mercure recouverte d'une solution étendue d'acide sulfurique. On fait rouler la lame de zinc qui se décape en traversant l'eau acidulée et s'amalgame en passant par le mercure. On peut activer

en frottant avec une brosse formée de fils métalliques. On opère d'une façon analogue pour une lame plane.

Montage. — Avant d'introduire les liquides dans les éléments il faut nettoyer avec soin tous les contacts, à l'aide de papier émeri ou même avec une lime douce ; les fils, lames de cuivre, pinces de serrage, etc., doivent être bien exempts d'oxyde pour que les contacts ne présentent pas une résistance supplémentaire ; pour la même raison, les vis doivent être serrées assez fortement. Lorsque ces précautions sont prises, il suffit de verser les liquides dans les vases.

Sels grimpants. — Dans certains cas, des cristaux se forment (surtout du sulfate de zinc) et montent le long des parois des vases et des électrodes ; on évite, en partie, cet inconvénient en recouvrant de paraffine la partie supérieure des vases et même des charbons. La paraffine ne laissant pas monter l'eau, par capillarité, les sels ne grimpent pas.

GRANDEURS QUI CARACTÉRISENT UNE PILE. MESURE DE CES GRANDEURS.

80. **Force électromotrice.** — Nous savons qu'on mesure la f. é. m. d'un générateur en déterminant, à l'aide d'un voltmètre, la diff. de pot. aux bornes *en circuit ouvert*. Comme les éléments des piles ont des f. é. m. comprises entre 1 et 2 volts, les voltmètres ordinaires ne donnent la f. é. m. d'un élément qu'avec une approximation grossière. Ils peuvent cependant servir à démontrer que :

La f. é. m. d'un élément est indépendante de ses dimensions et qu'elle ne dépend que de la nature des liquides employés.

81. **Mesure de la f. é. m. d'un élément.** — *Pile étalon.* — On mesure la f. é. m. d'une pile en la comparant à celle d'un élément dont la f. é. m. est bien connue. On donne le nom de *pile-étalon* à un élément de f. é. m. bien déterminée. On peut utiliser pour les mesures grossières, un élément Daniell et compter sa f. é. m. comme égale à 1^{volt},07 ; mais on emploie, de préférence, l'élément *Latimer Clark*.

La figure 44 représente un tel élément qui est composé de deux tubes de verre réunis vers leur partie supérieure. Au fond de chacun d'eux,

se trouvent un peu de mercure et un fil de platine soudé qui sert de pôle. Au-dessus du mercure on place, d'un côté, du sulfate mercurieux solide et au-dessus des cristaux de sulfate de zinc ; de l'autre côté, on a mis un petit morceau de zinc et le tout est surmonté d'une solution concentrée de sulfate de zinc. Des expériences de haute précision ont établi que, à la température de 15°, la f. é. m. de cet élément est 1^{volt},434. On ne doit pas fermer le circuit d'un élément Latimer Clark, car il se polarise. Lorsque cet élément est monté avec soin, sa f. é. m. à 15° est toujours la même et peut servir à définir expérimentalement le volt.

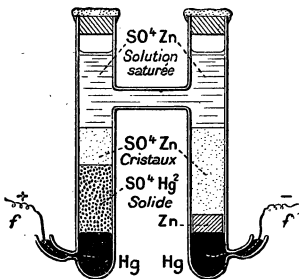


Fig. 44.
Élément Latimer-Clark.

Le volt est la diff. de pot. égale à la fraction $\frac{1\ 000}{1\ 434}$ de la f. é. m. de l'élément Latimer Clark à 15°.

On utilise aussi l'élément Weston que l'on obtient en remplaçant, dans le précédent, le zinc et le sulfate de zinc par du cadmium et du sulfate de cadmium. La f. é. m. de cet élément est 1^{volt},019 et elle ne varie pas sensiblement avec la température tandis que la f. é. m. du Latimer Clark varie à peu près de 0°,002 par degré.

82. Principe de la mesure d'une f. é. m. par le potentiomètre. — La partie essentielle de l'appareil est un fil

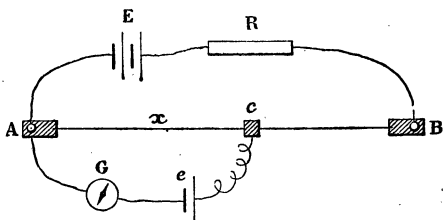


Fig. 45. — Mesure de la f. é. m. d'une pile.

métallique (maillachort ou manganine) AB, bien régulier et homogène de 1 ou 2 mètres de longueur (fig. 45). En E on place deux accumulateurs montés en série (ou 3 à 4 él. Daniell), R est un rhéostat.

On forme un autre circuit AGec comprenant : un galvanomètre G, une pile étalon e et un contact c qu'on peut faire glisser le long de AB. Les pôles positifs sont indiqués, comme à l'ordinaire, par les traits

courts et placés tous à gauche. En déplaçant le contact c , sur AB, on trouve une position pour laquelle le galvanomètre est au zéro, la f. é. m. de la pile e est alors équilibrée par la diff. de pot. entre A et c . Soient e la f. é. m. de la pile étalon, i l'intensité du courant dans le fil AB, x la longueur Ac; on a, d'après la loi d'Ohm : diff. de pot. entre A et $c = i \times$ résistance Ac, où

$$e = i \rho \frac{x}{s} \quad (1)$$

ρ étant la résistivité du fil et s sa section.

Remplaçons l'élément étalon e par la pile de f. é. m. inconnue e' ; pour que le courant soit nul dans le galvanomètre, il faudra déplacer le contact mobile et l'amener en un autre point de AB et, si x' est la distance de ce point à A, on a comme précédemment :

$$e' = i \rho \frac{x'}{s} \quad (2)$$

L'intensité du courant i est la même dans les deux expériences puisque le circuit AGec est parcouru par un courant nul qui n'a pas d'action sur le circuit principal.

En divisant membre à membre les équations (2) et (1) on obtient, après simplification :

$$\frac{e'}{e} = \frac{x'}{x} \text{ ou } e' = e \frac{x'}{x} \quad (5)$$

e est connu, 1^m,434 pour un Latimer Clark, x' et x sont mesurés par une règle graduée placée le long du fil AB.

Dans le potentiomètre, on s'arrange pour ne pas avoir à faire de calcul. Supposons que la pile étalon soit un Latimer Clark de f. é. m. 1^m,434 à 15°; mettons dans la première expérience, le curseur c à une distance Ac = 1^m,434 et réglons le rhéostat pour que le courant soit nul en G; l'équation devient

$$e' = \frac{1^m,434 \times x'}{1^m,434} \text{ ou } e' \text{ volts} = x' \text{ mètres.}$$

La f. é. m. en volts est donnée par la distance x' évaluée en mètres. Un fil AB de 2 mètres permettra de mesurer jusqu'à 2 volts.

85. **Calcul théorique de la f. é. m. d'un élément de pile.** — Un calcul analogue à celui qui a été fait à l'exercice 4 de la page 78, permettrait de calculer la f. é. m. d'un élément de pile. Mais, pour les raisons qui ont été exposées au n° 66, ce calcul ne

fournit que très rarement un résultat concordant avec l'expérience; le plus souvent, le résultat expérimental est plus petit que celui donné par le calcul (voyez, comme exemple, les exercices à la fin de ce chapitre).

84. Résistance d'une pile. — La résistance intérieure d'une pile dépend de ses dimensions; elle diminue lorsqu'on augmente les surfaces des électrodes ou lorsqu'on diminue la distance qui les sépare. Les éléments à grandes dimensions dans lesquels les électrodes sont très rapprochées ont une faible résistance. Cette résistance dépend aussi de la nature et de la concentration des liquides. Nous avons vu que les vases poreux augmentent la résistance. Pour déterminer, grossièrement, la résistance d'une pile (formée d'un seul ou de plusieurs éléments), on la met en court-circuit sur un ampèremètre, c'est-à-dire qu'on réunit ses pôles aux bornes d'un ampèremètre et on lit le courant produit I . Comme la résistance d'un ampèremètre est très faible et négligeable à côté de celle de la pile, on peut supposer que la résistance totale du circuit n'est formée que par la résistance r de la pile et si l'on a mesuré à l'aide du voltmètre la f. é. m. (en circuit ouvert) e , on a :

$$e = rI \text{ d'où } r = \frac{e}{I}$$

Cette méthode est peu précise : la pile se polarise très vite à cause de la grande valeur de I . Il vaut mieux fixer à l'un des pôles une bobine de fil de résistance R , l'autre bout de la bobine est mis en communication avec un ampèremètre dont la borne est réunie à l'autre pôle de la pile; on lit l'intensité i du courant. La résistance de l'ampèremètre étant supposée négligeable.

$$i = \frac{e}{R + r}$$

formule dans laquelle on connaît i , e et R , il est facile de calculer r ;

Exemple. Soit $e = 1^{\text{vol}}, 8$; $R = 2^{\text{ohm}}$ et $i = 0^{\text{a}}, 5$.

$$0,5 = \frac{1,8}{2+r} \text{ ou } 0,5 \times 2 + 0,5 \times r = 1,8$$

$$0,5 r = 1,8 - 0,5 \times 2 = 0,8$$

$$r = \frac{0,8}{0,5} = 1^{\text{ohm}}, 6$$

85. Puissance d'une pile. — Puissance utile maxima. — La puissance totale d'une pile, comme celle d'un générateur quelconque est égale au produit de sa f. é. m. par l'intensité du courant qu'elle débite.

$$P_{\text{watts}} = E^v \times I^a$$

Si, par exemple, un élément, au bichromate de f. é. m. 2 volts donne dans son circuit un courant de 4 amp., la puissance totale est 8 watts.

Cette puissance n'est pas toute utilisable, une partie est dépensée dans la pile et, ce qui est intéressant à connaître, c'est la **puissance utile** qui se produit dans le circuit extérieur. Soit E' la diff. de pot. aux bornes *en circuit fermé*; la puissance que l'on peut recueillir dans le circuit extérieur est $P_u^{\text{watts}} = E'I$.

$$\text{Le rendement est égal à } \frac{P_u}{P} = \frac{E'I}{EI} = \frac{E'}{E}.$$

On démontre que la puissance utile maxima est obtenue lorsque la résistance de la pile est égale à celle du circuit extérieur. Dans ce cas, qui n'est pas le plus économique, le rendement n'est que 0,50.

86. La loi de Faraday s'applique aux éléments de pile. — La loi de Faraday, relative à l'électrolyse, s'applique à chaque élément de pile, comme elle s'applique à une cuve électrolytique. *Pour chaque valence-gramme (ou équivalent électrochimique) qui entre en réaction dans l'élément, celui-ci est traversé par une quantité d'électricité égale à 96.600 coulombs.*

Exercice numérique. — *Quel est le poids de zinc*

dépensé dans un élément Daniell qui a produit pendant une heure un courant continu de 1^a,5? Le poids atomique du zinc est 65,5 et sa valence 2.

La quantité d'électricité débitée dans une heure est :

$$1^a,5 \times 3600^s = 5400 \text{ coulombs.}$$

Le poids de zinc consommé est :

$$\frac{65,5}{2} \times \frac{5400}{96.600} = 1^g831$$

87. Capacité d'un élément. — On appelle *capacité* d'un élément la quantité d'électricité qu'il peut produire par la dépense complète de l'un des produits chimiques qu'on y a introduit. On peut calculer cette capacité par rapport aux poids des électrodes, mais il est plus naturel de rapporter au poids des corps dissous dans les liquides excitateur ou dépolarisant. La capacité s'évalue en ampères-heure.

Exercice numérique. — *Quelle est la capacité d'une pile Leclanché qui contient un litre d'une solution de sel ammoniac, la quantité de sel dissoute est 267^g,5?*

Le chlorure d'ammonium, AzH^+Cl , a pour poids moléculaire 53^g,5; chaque fois que 53^g,5 de ce corps sont consommés, il y a production de 96.600 coulombs.

Le poids 267^g,5 de sel ammoniac produira donc :

$$\frac{96.600 \times 267,5}{53,5} \text{ coulombs.}$$

Mais un ampère-heure vaut 3600 coulombs; donc, capacité de la pile = $\frac{96.600 \times 267,5}{53,5 \times 3600} = 134$ ampères-heure.

GROUPEMENT DES ÉLÉMENTS — USAGES DES PILES.

88. Groupement en tension ou en série. — Nous avons déjà indiqué que dans le groupement en série (ou tension) les appareils sont reliés de façon à être traversés par

le même courant, sans qu'il y ait aucune dérivation. Dans le cas des piles, on réunit le pôle négatif du premier élément au pôle positif du second; le pôle négatif de celui-ci au pôle positif du troisième, etc. Le pôle positif de la série est formé par le pôle positif du premier élément et le pôle négatif par le pôle négatif du dernier élément (fig. 46). Ce groupement est caractérisé par les deux propriétés :



Fig. 46. — Groupement en tension.

1° La f. é. m. de la série est égale à la somme des f. é. m. des éléments.

2° La résistance de la série est égale à la somme des résistances des éléments (on suppose négligeable la résistance des conducteurs de jonction).

Si tous les éléments sont identiques et que e soit la f. é. m. d'un seul, r sa résistance et R la résistance extérieure qui joint les pôles de la série, on a, si n est le nombre des éléments :

$$\text{f. é. m. de la série} = n e$$

$$\text{résistance totale} = n r + R$$

Par suite, l'intensité i du courant est, d'après la loi d'Ohm,

$$i = \frac{n e}{R + n r} \quad (1)$$

Comparons cette intensité à celle que l'on obtiendrait, avec un seul élément, dans la même résistance extérieure :

$$i_1 = \frac{e}{R + r} \quad (2)$$

Pour comparer (1) et (2), divisons les deux termes de la fraction (1); par n on obtient :

$$i = \frac{e}{\frac{R + r}{n}} \quad (5)$$

Le courant est le même que celui qu'on obtiendrait avec

un seul élément, la résistance extérieure étant divisée par le nombre n des éléments.

Ce groupement est donc avantageux si R est grand par rapport à r . Dans le cas contraire, il faut employer un autre groupement.

Exemple numérique. — Cherchons l'intensité du courant fourni par 10 éléments Bunsen de f. é. m. 1^v,8 et de résistance 0^w,2; la résistance extérieure étant dans un premier cas 40^w, et, dans un second cas, 0^w,01.

Premier cas :

$$i = \frac{1,8 \times 10}{40 + 0,2 \times 10} = \frac{18}{42} = 0^a,45.$$

un seul élément donnerait :

$$i_1 = \frac{1,8}{40 + 0,2} = \frac{1,8}{40,2} = 0^a,0447.$$

Deuxième cas :

$$i = \frac{1,8 \times 10}{0,01 + 0,2 \times 10} = \frac{18}{2,01} = 8^a,95.$$

un seul élément donnerait :

$$i_1 = \frac{1,8}{0,01 + 0,2} = \frac{1,8}{0,21} = 8^a,57.$$

On voit que, dans le premier cas, il y a grand avantage à grouper en série puisque le courant est presque dix fois plus intense qu'avec un élément unique; dans le second cas, au contraire, le courant a une intensité très peu supérieure à celle que donnerait un seul élément.

89. Groupement en parallèle ou en quantité (ou en surface). — Dans ce genre de groupement, on réunit, d'une part, à un

même point tous les pôles positifs, ce point est le pôle positif de l'ensemble; d'autre part, on réunit à un autre point, qui

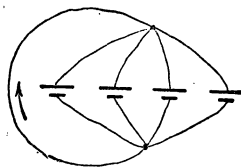


Fig. 47. — Groupement en parallèle.

sera le pôle négatif de l'ensemble, tous les pôles négatifs (fig. 47). Ce groupement possède les propriétés suivantes :

1^o *La f. é. m. est la même que s'il n'y avait qu'un seul élément.* — On ne groupe de cette façon que des éléments de même f. é. m. ---

2^o *La résistance de l'ensemble est égale à la résistance d'un seul élément divisée par le nombre n des éléments si on les suppose tous identiques.*

Ceci résulte de ce qui a été établi au n^o 46 : les éléments étant montés *en dérivation* ; chacun d'eux est traversé par la fraction $\frac{i}{n}$ du courant principal qui traverse le conducteur extérieur.

En conservant aux lettres la même signification que plus haut, on a :

$$i_2 = \frac{e}{R + \frac{r}{n}}$$

Le courant a la même intensité que si on avait employé un élément unique dont on aurait augmenté les dimensions de façon à diviser par n la résistance intérieure.

Exercice numérique. — Reprenons les mêmes données que plus haut.

1^{er} Cas. — Le groupement en parallèle donne :

$$i_2 = \frac{1,8}{40 + \frac{0,2}{40}} = \frac{1,8}{40,02} = 0^a,0449$$

intensité très peu supérieure à 0,0447 que donnerait un seul élément dans la même résistance.

2^e Cas.

$$i_2 = \frac{1,8}{0,01 + \frac{0,2}{40}} = \frac{1,8}{0,03} = 50^a.$$

On voit que, dans ce cas, le groupement donne un courant beaucoup plus intense qu'un seul élément.

Conclusion. — On emploie le groupement en série lorsque la résistance extérieure est grande par rapport à la résistance d'un élément; si la résistance extérieure est faible, on prend le groupement en quantité.

90. **Groupement mixte.** — On peut disposer les éléments comme le montre la figure 48; nous avons trois séries composées chacune de quatre éléments. Chaque série peut être regardée comme une pile de f. é. m. $4e$ et de résistance $4r$. Nous groupons donc, en parallèle, trois piles de f. é. m. $4e$ et de résistance $4r$. D'après ce qu'on vient de voir, ce groupement

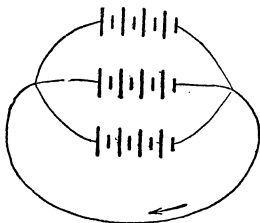


Fig. 48.
Groupement mixte.

a pour résultat de diviser par 3 la résistance de la pile qui devient $\frac{4r}{3}$. On aura donc, dans ce cas particulier :

$$I = \frac{4e}{R + \frac{4r}{3}}$$

On généraliserait facilement; s'il y a p éléments par série et q séries, on aurait :

$$I = \frac{pe}{R + \frac{pr}{q}} = \frac{e}{\frac{R}{p} + \frac{r}{q}}$$

On démontre que le courant est maximum lorsque $\frac{R}{p} = \frac{r}{q}$. On établit le groupement de façon à se rapprocher de cette condition. A ce moment, $R = \frac{pr}{q}$, la résistance de la pile $\frac{pr}{q}$ est égale à la résistance extérieure (Voy. exercices).

91. **Analogie hydraulique.** — Pour fixer facilement dans l'esprit, les avantages des différents modes de groupement, on peut

chercher une analogie hydraulique. Rappelons d'abord que l'on peut comparer une pile à une pompe qui élève de l'eau.

1° Considérons une pompe aspirante qui ne peut élever l'eau qu'à une hauteur de 8 m; si nous voulons atteindre une hauteur de 24 m, nous pourrions disposer 3 pompes semblables en les étageant de 8 m en 8 m. La première amènera l'eau dans un réservoir situé à 8 m où une deuxième la puisera pour l'élever 8 m plus haut. Le même courant d'eau traverse toutes les pompes et la différence de niveau réalisée est la somme des hauteurs que peut atteindre chaque pompe. Ce cas est l'analogie du montage en tension.

2° Supposons que nous voulions élever à 8 m une quantité d'eau trois fois plus grande que le débit d'une seule pompe, nous en grouperons trois semblables au niveau inférieur; elles élèveront l'eau toutes à la même hauteur, le débit total sera triplé et chaque appareil élève une quantité d'eau égale au $\frac{1}{3}$ du débit total.

3° Un couplage mixte pourra s'obtenir en disposant, par exemple, 5 groupes de 2 pompes; le 1^{er} groupe élevant à 8 m, le 2^e de 8 à 16 m, etc.

92. Usages des piles. — Coût de l'énergie qu'elles fournissent. — Les piles sont des générateurs commodes, n'exigeant pas de grands frais d'installations; mais elles fournissent l'énergie électrique à un prix trop élevé qu'on peut évaluer à 4 francs environ par kilowatt-heure (voy. exercices) ou 0,40 par hectowatt-heure (près de 6 fois le prix de vente de l'énergie à Paris). Malgré ce défaut économique, elles sont utilisées dans les applications domestiques (piles Leclanché pour les sonneries); on les emploie dans la télégraphie et la téléphonie; cependant, dans les grands bureaux, on les remplace par des accumulateurs. Les piles sont fréquemment employées dans les laboratoires.

EXERCICES

1. Un élément Leclanché de f. é. m 1,5 et de résistance 1ω , actionne une sonnerie dont la résistance, y compris les conducteurs est de 5ω . Calculer : 1° l'intensité du courant; 2° le poids de zinc dépensé en une année de 360 jours en supposant que la pile fournisse du courant pendant 10 minutes par jour; 3° la dissolution de chlorure d'ammonium contenant 107 grammes de sel, pendant combien de temps la pile peut-elle fonc-

tionner? Poids moléculaire de $\text{Zn}^{2+}\text{Cl}^{-2} = 53,5$, poids atomique du zinc 65,5.

- Rép. 1° $I = 0,25$;
 2° poids du zinc dépensé 13,51;
 3° 3 ans $1/2$ environ.

Pour résoudre la 3^e partie, on cherche le nombre de coulombs qui correspond à 107 grammes de sel ammoniac et on divise le résultat par le nombre de coulombs que la pile débite par an, dans les conditions données. Le résultat du calcul suppose l'épuisement complet du sel; il est évident qu'il faut en ajouter avant d'arriver à ce résultat pour éviter une trop forte augmentation de la résistance.

2. On monte en série 4 éléments au bichromate; f. é. m. 2 v, résistance 0 ω , 2. La résistance extérieure est 10 ω . Calculer : 1° l'intensité du courant; 2° le poids total du zinc dépensé en 1 heure.

5. On groupe en quantité 6 éléments Daniell de f. é. m 1,07 et de résistance 2 ω , 4. Calculer : 1° l'intensité du courant dans une résistance extérieure de 0 ω , 5; 2° le poids total de cuivre déposé en 1 heure $\text{Cu} = 63,5$ (On remarquera que chaque élément n'est parcouru que par $1/6$ du courant principal).

* 4. On groupe en quantité 4 séries de 5 éléments Daniell ayant les mêmes constantes qu'au numéro précédent. — Mêmes questions.

* 5. On propose de grouper des éléments au bichromate, e = 2 volts, r = 1 ω , de façon à faire fonctionner 10 lampes de 5 bougies montées en parallèles; ces lampes exigent un courant de 0,4 sous 20 volts. Employer le plus petit nombre d'éléments.

R. 4 séries de 20 éléments.

Les 10 lampes en dérivation exigent en tout un courant de $0,4 \times 10 = 4$ a. La résistance d'une lampe est $\frac{E}{I} = \frac{20}{0,4} = 50 \omega$.

La résistance des 10 lampes est $\frac{50}{10} = 5 \omega$. On a donc, avec les notations du n° 90.

$I = 4$ a, $R = 5 \omega$ et $r = 1 \omega$, p et q sont les inconnus;

$$(1) \quad 4^2 = \frac{2^2}{\frac{1}{p} + \frac{1}{q}}$$

$$(2) \quad \frac{5}{p} = \frac{1}{q} \text{ pour le courant maximum.}$$

La résolution de ces équations donne $p = 20$ et $q = 4$.

Remarque. — Il est à remarquer que le groupe des lampes ne peut être alimenté par un nombre quelconque d'éléments montés en quantité puisque la f. é. m. exigée est 20 volts et que le montage n'en donne que 2

Il est plus curieux de constater que le groupe de lampes ne peut pas non plus être alimenté par des éléments en nombre quelconque montés en tension, car l'équation

$$4^a = \frac{n \times 2}{5\omega + n \times 1}$$

n'admet pas de valeur positive pour n. Si on voulait alimenter les lampes par des éléments montés en tension il faudrait donner aux lampes un autre groupement; les monter elles-mêmes en tension par exemple.

6. Calculer le prix du kwt-heure fourni par une pile Daniell; la f. é. m. sera prise égale à 1 volt pour simplifier. Le zinc est compté à 0^r,60 le kg. le sulfate de cuivre à 0^r,50 et le cuivre impur recueilli est vendu 0^r,75 le kg. (le sulfate de zinc n'est pas utilisable).

Lorsque la pile a débité 96 600 coulombs, sous une f. é. m de 1 volt, l'énergie produite est 96 600 joules, et elle a dépensé une valence-gramme de chaque produit, c'est-à-dire : $\frac{65,5}{2}$ de zinc, $\frac{249}{2}$ de sulfate de cuivre [il faut prendre le sulfate bleu du commerce $\text{SO}^4\text{Cu} \cdot 5 \text{H}^2\text{O} = 249$] et on a récupéré $\frac{65}{2}$ grammes de cuivre. Or, 1 kwt-heure = 3 600 000 joules

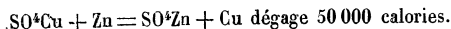
Poids de zinc dépensé =	$\frac{65,5 \times 3\,600\,000}{2 \times 96\,600} = 1^k,22$ à 0 ^r ,60	0 ^r ,75
» Sulfate de cuivre =	$\frac{249 \times 3\,600\,000}{2 \times 96\,600} = 4^k,64$ à 0 ^r ,50	2 ^r ,52
	Total	3 ^r ,05
» Cuivre récupéré =	$\frac{65}{2} \times \frac{3\,600\,000}{96\,600} = 1^k,18$ à 0 ^r ,75	- 0 ^r ,88
	Dépense	2 ^r ,17.

Nous avons ainsi le prix du kw-heure; mais une partie de cette énergie est dépensée dans la pile : il faut donc compter, environ, 4 fr. le kw-heure utile. Les autres piles conduisent à des prix de même ordre de grandeur.

7. Une série de 10 piles au bichromate de f. é. m 2 v. donne un courant de 4 a. dans une résistance de 3 ω . Quelle est la résistance intérieure de chaque élément?

8. Une pile de f. é. m. 2 v. donne un courant de 1 a. lorsqu'on réunit ses pôles par une résistance de 1 ω . Si l'on porte la résistance extérieure 4 ω , le courant n'est plus que 0 a. 4. Quelle est la résistance de la pile?

* 9. Calculer la f. é. m d'un daniell sachant que la réaction



Lorsque la pile débite 96 600 coulombs, il y a dissolution d'une valence de zinc. La dissolution d'un poids atomique débitera $96\,600 \times 2$, puisque le zinc est bivalent.

Si x est la f. é. m. de l'élément, l'énergie correspondante produite par les $96\,600 \times 2$ coulombs est $96\,600 \times 2 \times x$ joules.

Cette énergie doit être équivalente à l'énergie des 50 000 calories de la réaction qui, évaluée en joules, vaut $50\,000 \times 4,18$.

On a donc, pour calculer x , l'équation :

$$96\,600 \times 2 \times x = 50\,000 \times 4,18.$$

d'où l'on tire $x = 1,08$.

Le résultat concorde, dans ce cas, avec l'expérience. Mais nous avons dit plus haut que le plus souvent, il en est autrement.

CHAPITRE VII

ACCUMULATEURS

93. *Définition.* — On appelle accumulateur ou pile secondaire un générateur chimique d'électricité dans lequel les produits actifs, au lieu d'être introduits tout préparés dans les récipients, comme on le fait pour les piles ordinaires, sont formés dans les vases mêmes par le passage du courant électrique. Dans ces appareils il y a lieu de distinguer deux opérations :

1° *La charge*, pendant laquelle on fait passer un courant dont l'énergie électrique produit des composés chimiques qui *s'accumulent* sur les électrodes (lesquelles sont fortement polarisées).

2° *La décharge*, pendant laquelle les électrodes polarisées, étant réunies à travers un circuit conducteur, produisent un courant secondaire que l'on utilise.

Ces appareils sont donc des *piles réversibles* ; pendant la charge, il y a absorption d'énergie électrique et production d'énergie chimique qui reste en réserve (énergie potentielle) sous forme de produits adhérents aux électrodes ; pendant la décharge, l'énergie chimique régénère de l'énergie électrique avec une certaine perte. La seule réaction chimique qui donne de bons résultats pratiques est l'électrolyse de l'eau acidulée entre des électrodes de plomb. Bien d'autres réactions ont été essayées, mais aucun type d'accumulateur n'a pu remplacer, jusqu'ici, l'accumulateur au plomb, découvert par Planté en 1860.

94. *Théorie de l'accumulateur de Planté.* —

Nous avons vu (67) que si l'on fait l'électrolyse de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, en prenant comme électrodes des lames de plomb, il y a une forte polarisation et on obtient un courant secondaire dont la durée est plus grande que dans la plupart des autres électrolyses ; de plus, *les lames de plomb ne se dépolarisent pas d'elles-mêmes en circuit ouvert.*

Nous appellerons plaque positive, la lame de plomb qu'on relie au pôle positif de la source électrique, et plaque négative celle que l'on réunit au pôle négatif.

Première charge. — Lorsqu'on fait passer le courant, l'eau acidulée devrait donner un dégagement d'oxygène sur la lame positive et un dégagement d'hydrogène sur la lame négative. A la positive, le plomb absorbe l'oxygène et se transforme, à la surface, en une couche mince de bioxyde de plomb PbO^2 de couleur brune (on l'appelle aussi oxyde puce, à cause de sa couleur) ; lorsque cette couche a atteint une certaine épaisseur, *d'ailleurs très petite*, elle protège le métal qui est au-dessous et l'oxygène se dégage : il est inutile de prolonger plus longtemps le courant de charge.

A la lame négative, l'hydrogène se dégage, sauf tout à fait au début de l'électrolyse où une partie de ce gaz réduit (¹) la petite couche d'oxyde qui recouvre toujours le métal du commerce.

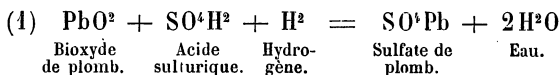
On arrête donc cette première charge lorsque l'oxygène commence à se dégager en abondance sur la positive. Les lames qui étaient, au début, d'une couleur grise un peu blanchâtre sont devenues : l'une, la positive, brune, à cause du bioxyde de plomb ; l'autre, grise, à cause du plomb non oxydé.

Première décharge. — Les lames étant polarisées à *refus*, on les réunit par un fil conducteur ; il se produit un courant de sens inverse au premier qui, en agissant sur l'eau acidulée, *aurait* pour conséquence un dégagement d'oxygène sur la plaque négative (où se produisait l'hydrogène pendant la charge) et un dégagement d'hydrogène sur la positive. Mais ces

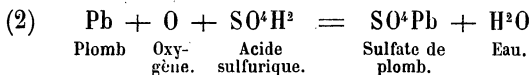
1. Rappelons que réduire, au sens chimique du mot, signifie prendre de l'oxygène à un corps qui en contient ; dire que l'hydrogène réduit l'oxyde de plomb signifie que l'hydrogène prend l'oxygène de cet oxyde pour faire de l'eau et mettre le métal en liberté.

produits de l'électrolyse, au lieu de se dégager, réagissent sur les électrodes.

Sur la lame positive, l'hydrogène réduit le bioxyde de plomb PbO^2 à l'état de protoxyde PbO qui, avec l'acide sulfurique du liquide, forme du sulfate de plomb



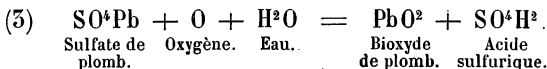
A la négative, l'oxygène oxyde le plomb, mais l'action ne va que jusqu'au protoxyde qui donne également avec l'acide sulfurique du sulfate de plomb.



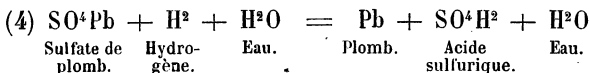
Après décharge, les deux lames sont recouvertes d'une petite couche de sulfate de plomb.

95. **Formation naturelle ou directe.** — Le courant de décharge que l'on obtient après une seule charge est de durée trop courte pour être utilisable, car la couche de matière active qui s'est formée pendant la charge n'est pas assez importante.

Planté a remarqué qu'en répétant un grand nombre de fois les opérations précédentes, les lames s'attaquent de plus en plus profondément, la couche superficielle devient poreuse et il se forme, pendant la charge, une couche de plus en plus épaisse de bioxyde de plomb à la positive et une couche spongieuse de plomb à la négative. Les réactions qui représentent les charges successives (autres que la première expliquée plus haut) sont : pour la positive.



et pour la négative



Pendant la décharge, les réactions sont représentées, comme plus haut, par les équations (1) et (2).

Nous verrons qu'on ne doit pas pousser le courant de décharge jusqu'à fond de façon que les couches actives ne soient pas transformées complètement en sulfate (1); lorsque les lames sont trop sulfatées, elles sont blanches et le sulfate, insoluble dans le liquide, forme une couche de très grande résistance électrique.

Il est évident que les durées des courants de charge et de décharge augmentent avec le nombre des opérations; toutefois, il ne faut pas dépasser une certaine limite car, au delà d'une certaine épaisseur, la couche active ne serait plus adhérente à la carcasse de plomb. De plus, les lames de plomb éprouveraient de grandes déformations pendant la charge et la décharge et elles pourraient arriver à se toucher, ce qui établirait des courts-circuits dans l'intérieur de l'accumulateur. On arrête la formation lorsque les plaques ont une certaine *capacité* (voy. 101) qui correspond à un poids de matière active égale à 3 ou 4 pour 100 du poids du plomb.

La formation d'un accumulateur est très longue, deux mois environ; on peut la réduire à quelques jours en faisant séjourner les plaques de plomb dans l'acide azotique pendant un ou deux jours et en les lavant ensuite; ce traitement qui a pour effet de dissoudre une partie du plomb rend poreuse la surface des plaques.

96. Formation artificielle. — Formation mixte.
Faure a proposé, en 1880, de remplacer la formation si lente des accumulateurs par une **formation artificielle** qui consiste à fixer à la surface des plaques de plomb les matières actives. Pour les plaques positives, on emploie une pâte formée de minium Pb^2O^4 et d'acide sulfurique et, pour les négatives, une pâte de litharge (protoxyde de plomb PbO) et du même acide. Ces pâtes sont maintenues dans des cavités de formes très variées creusées dans les électrodes. Il suffit d'une

1. Si on examine, avant que la décharge soit complète, la couche active au microscope, on voit qu'elle est formée d'un mélange spongieux d'oxyde et de sulfate à la positive, de plomb et de sulfate à la négative.

seule charge : sous l'action du courant le minium est transformé en bioxyde de plomb et la litharge en plomb spongieux. La charge est, évidemment, prolongée assez longtemps. La matière active reste suffisamment adhérente à la plaque négative ; mais, souvent, sur la positive, l'oxyde de plomb *foisonne*, se détache de son support et tombe au fond du bac.

Aussi, dans un assez grand nombre de types d'accumulateurs on emploie une *formation mixte* : les positives sont des lames de plomb dont la surface est augmentée en y creusant des rainures assez rapprochées, on les *forme* par le procédé Planté ; les négatives sont recouvertes d'une pâte de litharge et acide sulfurique. Il y a d'ailleurs avantage à avoir une couche active plus épaisse sur les négatives.

97. *Quelques types d'accumulateurs.* — Dans les accumulateurs *Tudor*, très répandus, les positives sont des

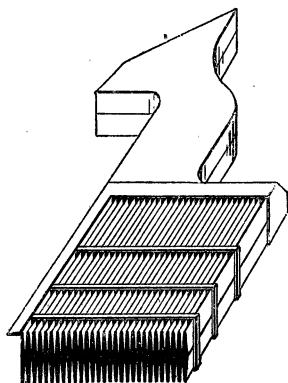


Fig. 49. — Plaque d'accumulateur Tudor. Positive.

lames de plomb assez épaisses dont la surface porte des rainures nombreuses et profondes (représentées en perspective et en coupes figure 49). Elles sont formées par la méthode Planté. Les négatives, qui sont formées artificiellement, affectent plusieurs dispositions : tantôt c'est une sorte de quadrillage en plomb dans les creux duquel on introduit par pression la pâte formée de litharge et d'acide sulfurique étendu ; dans un autre modèle la pâte est placée à l'intérieur de l'espace compris entre deux lames de plomb percées de nombreux orifices.

Ces accumulateurs sont très robustes et surtout employés pour les batteries fixes. Les éléments de grandes dimensions sont placés dans des bacs en bois doublés de plomb à l'intérieur.

Pour les modèles plus petits on peut employer des vases en verre ou en ébonite.

Les accumulateurs *Union* sont analogues, mais les rainures des plaques positives, au lieu d'être obtenues par fusion et coulées, sont pratiquées dans une plaque épaisse à l'aide d'une machine spéciale munie d'une partie tranchante. Il en est de même des plaques *Sirius* de la compagnie pour le travail des métaux (*accumulateurs TEM*). Cette Compagnie fabrique aussi

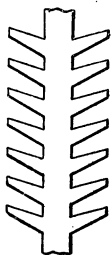


Fig. 50.
Plaque à augets.

des accumulateurs dont les positives sont à formation artificielle et, pour éviter la chute de la matière active, on emploie différentes dispositions parmi lesquelles nous indiquerons les *plaques à augets* (fig. 50).

Dans les accumulateurs *Fulmen* employés pour la traction, on cherche surtout à diminuer le poids en perdant un peu sur la durée; les plaques sont formées de lames de plomb peu épaisses et grillagées; la matière active est appliquée sur les faces de la lame et dans les cavités; elle est maintenue en place par des lames de celluloid percées d'un grand nombre d'orifices (fig. 51). La matière active est du plomb spongieux pour la négative et de l'oxyde pour les positives. Les bacs sont en ébonite.

On fabrique aussi des accumulateurs dans lesquels le liquide est immobilisé comme dans les piles sèches. A cet effet, on introduit dans le liquide acide des matières poreuses : amiante, coton de verre, pierre ponce; ou une substance gélatineuse, de la silice en gelée que l'on produit en ajoutant du silicate de soude à l'eau acidulée⁽¹⁾.

98. *Disposition des plaques. — Groupement. —*

1. Le silicate de soude traité par l'acide sulfurique donne un précipité de silice gélatineuse et du sulfate de soude qui se dissout.



Fig. 51. — Plaque d'accumulateur Fulmen. Coupe.

Installation d'une batterie. — Dans l'accumulateur primitif de Planté, les lames de plomb étaient roulées en spirale et séparées, de distance en distance, par des cales isolantes. On emploie exclusivement, maintenant, des plaques planes séparées par des cales de verre afin d'éviter les courts-circuits, au cas

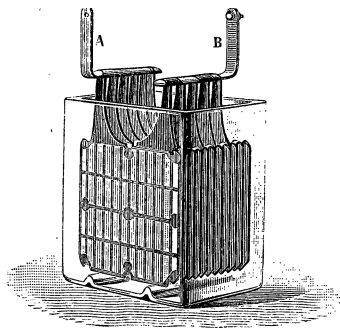


Fig. 52. — Accumulateur.

où les lames viendraient à se déformer. La figure 52 représente un petit modèle avec bac de verre; il comprend 5 plaques positives réunies à une lame B et 6 plaques négatives réunies à la lame A. — En général, les plaques extrêmes sont toujours des négatives, qui se déforment moins que les positives. — Les lames étant à grande surface, assez rapprochées, et le liquide, eau acidulée par l'acide sulfurique, étant bon conducteur, la résistance d'un élément d'accumulateur est faible et ces éléments dans la pratique, *sont toujours groupés en tension*⁽¹⁾. Pour les batteries fixes, les bacs en bois doublés intérieurement de plomb sont placés sur une charpente en bois; ils sont isolés par des supports de porcelaine ou de verre. Cette précaution est nécessaire parce que le bâti peut, à certains moments, être rendu conducteur par les gouttelettes d'eau acidulée qui y sont projetées par le dégagement des gaz et des courts-circuits pourraient s'établir. La communication d'une lame positive d'un bac avec la lame négative du suivant est souvent établie par soudure des lames.

Toutes les boiseries doivent être recouvertes d'un vernis isolant et inattaquable aux acides⁽²⁾, de plus les pièces de bois

1. On a vu (88) que ce groupement est le plus avantageux lorsque la résistance de la pile est faible.

2. On emploie un vernis composé de coltar (ou goudron) et de térébenthine (parties égales).

sont assemblées avec des chevilles; il faut éviter les clous qui seraient rapidement usés par les gouttelettes d'acide.

Pour installer une batterie, on met les bacs en place, on introduit ensuite les lames, les cales isolantes et on établit les connexions par soudure ou par des pinces à vis. On verse ensuite dans les bacs le mélange acide, formé de 5 volumes d'eau et de 1 volume d'acide sulfurique à 66°.

Pour une bonne conservation des plaques, il faut employer de l'eau distillée (ou de l'eau de pluie) et de l'acide sulfurique au soufre (exempt d'arsenic). Le mélange acide s'obtient en versant, peu à peu, l'acide dans l'eau et en agitant. Pendant cette opération, le liquide s'échauffe; il faut attendre qu'il soit refroidi pour le verser dans les bacs.

La charge doit se faire presque aussitôt après qu'on a rempli les bacs; si on laissait quelques heures l'acide en contact des matières actives, il y aurait sulfatation des plaques.

99. Variation de la f. é. m. pendant la charge et la décharge. — 1° Charge. Considérons un accumulateur

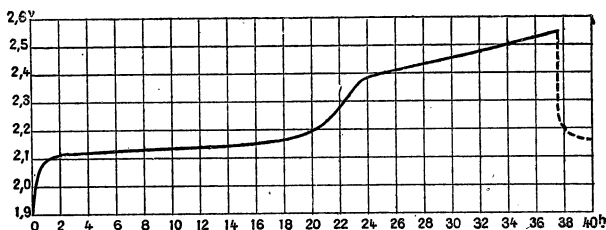


Fig. 53. — Charge d'un accumulateur. Variation de la f. é. m.

que l'on charge par un courant d'intensité à peu près constante; au début, la f. é. m.⁽¹⁾ (de sens contraire à celle du générateur)

1. Pour mesurer la f. é. m. d'un élément d'accumulateur on peut se servir d'un voltmètre que l'on réunit aux bornes de l'élément — en supprimant pendant le temps de la mesure le courant de charge. — La mesure serait plus précise avec une batterie en tension puisqu'on aurait à mesurer une f. é. m. égale à celle d'un élément multiplié par le nombre des éléments. On peut aussi mesurer la diff. de pot. aux bornes pendant le passage

croît très rapidement jusqu'à $2^{\text{v}},1$ environ, elle varie ensuite très lentement jusqu'à $2^{\text{v}},3$ ou $2^{\text{v}},4$, puis croît assez brusquement jusqu'à $2^{\text{v}},6$; pendant cette dernière période, il y a dégagement assez abondant de gaz (oxygène et hydrogène). Si l'on abandonne au repos l'élément chargé, la f. é. m. retombe assez vite à $2^{\text{v}},1$ environ. Ces variations sont représentées graphiquement dans la figure 55 : on a porté en abscisse les temps évalués en heures et en ordonnées, les f. é. m. en volts.

2° **Décharge.** — Si l'on décharge l'élément aussitôt après la charge, la f. é. m. décroît brusquement en quelques secondes

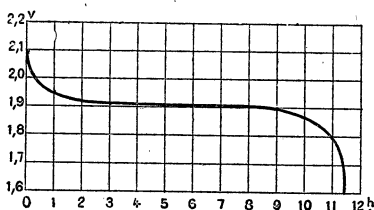


Fig. 54. — Variation de la f. é. m. pendant la décharge.

de $2^{\text{v}},6$ à $2^{\text{v}},1$ (coup de fouet); mais si la décharge est faite un peu plus tard, on part de la f. é. m. $2^{\text{v}},1$ environ et la décroissance est assez lente, la f. é. m. se maintient très longtemps au voisinage de $1^{\text{v}},9$ puis, vers la fin de la décharge, elle décroît rapidement vers $1^{\text{v}},8$; $1^{\text{v}},7$ On arrête la décharge lorsque le voltmètre indique $1^{\text{v}},8$ par élément. Cette variation est représentée par le graphique de la figure 54 (1).

100. **Variations de la résistance et de la densité.** — Pendant la charge et pendant la décharge, la nature et les dimensions des couches actives changent; il en est de même de

du courant. Si V est cette diff. de pot., E la f. é. m. de l'élément, r sa résistance et I l'intensité du courant; on a $V = E + r I$. On pourrait calculer E connaissant V , r et I ; mais r , la résistance de l'élément pendant la charge est variable. Dans le cas où r est très faible, ce qui est fréquent, V diffère peu de E .

1. Comme précédemment, la f. é. m. devrait se mesurer en circuit ouvert; en circuit fermé, c'est-à-dire pendant que le courant se produit, on a en toute rigueur $V = E - r I'$; V étant la diff. de pot., E la f. é. m., r la résistance de l'élément et I' l'intensité du courant. Si r est très faible, ce qui est fréquent, V est peu différent de E .

la concentration du liquide; pour toutes ces raisons, la résistance électrique est variable. La résistance moyenne pour un accumulateur à grille atteint environ $0^{\omega},1$ pour 1^{dm^2} de plaque; elle serait évidemment s fois plus petite pour une surface de s dm^2 et, dans la pratique, cette résistance peut être de l'ordre $\frac{1}{100}$ d'ohm. A cause de cette faible résistance, il faut éviter avec soin les courts-circuits.

Les équations chimiques des nos 94 et 95 qui expliquent la charge et la décharge d'un accumulateur montrent que, pendant la charge, le liquide s'enrichit en acide sulfurique, *la densité est donc maxima à la fin de la charge*; pendant la décharge, une partie de l'acide étant employée à faire du sulfate de plomb, il y a diminution de la densité. En plongeant un densimètre dans le liquide, on peut suivre la charge ou la décharge. La densité décroît pendant la décharge de 24° Baumé à 22° ou 20° ; ce qui correspond à des densités de 1,20; 1,18 et 1,16.

101. Capacité d'un accumulateur. — Capacité spécifique. — On appelle *capacité d'un accumulateur* la quantité d'électricité qu'il peut fournir lorsqu'il a été chargé. Cette capacité garde la même valeur quel que soit le régime de décharge, pourvu qu'on ne s'écarte pas trop du régime qui est compatible avec la nature de l'accumulateur. Un accumulateur qui se décharge en 10 heures, sous un régime de courant de 6 ampères, possède une capacité de 60 ampères-heure (un a.h. = 3600 coulombs). Si on le déchargeait sous un régime de 4^{a} , il mettrait 15 heures à se décharger, la capacité serait encore $4 \times 15 = 60^{\text{a.h.}}$ ⁽¹⁾.

La capacité dépend des dimensions et du nombre des plaques de l'élément; les plus petits modèles industriels ont des capacités de 20 à $30^{\text{a.h.}}$; certains éléments industriels fixes ont des capacités qui dépassent $1000^{\text{a.h.}}$.

On appelle *capacité spécifique* la capacité rapportée à 1 kg de plomb; pour les accumulateurs fixes, on a des capacités de 5 à $10^{\text{a.h.}}$ par kg; les accumulateurs employés dans la traction,

1. Si on le déchargeait sous un régime de courant beaucoup plus intense, 30 à 40 a., on trouverait une capacité un peu plus petite.

et dont les deux plaques sont à oxydes rapportés, ont des capacités spécifiques à peu près doubles; mais leur durée est moins grande.

Cas d'une batterie. — Ce qu'on vient de dire se rapporte à un seul élément. Si l'on considère une batterie montée en tension, comme tous les éléments sont traversés par le même courant et, par suite, par la même quantité d'électricité, *la capacité d'une batterie en tension est égale à celle d'un seul élément; mais la f. é. m. est égale à celle d'un élément multiplié par le nombre des éléments.*

Si l'on montait les accumulateurs en surface, toutes les quantités d'électricité fournies par les différents éléments viendraient s'ajouter dans le circuit unique qui réunit les pôles de la batterie et *la capacité d'une batterie montée en quantité (ou surface) est égale à la somme des capacités des éléments; mais la f. é. m. de la batterie est égale à celle d'un élément unique.*

102. Énergie disponible. — Si nous considérons un seul élément de capacité $Q^{a.h.}$, comme la f. é. m. moyenne à la décharge est environ $1^v,9$, l'énergie qu'il peut fournir est égale à $Q^{a.h.} \times 1,9$ watts-heure⁽¹⁾.

Pour un accumulateur de $60^{a.h.}$, cette énergie est de $60 \times 1,9 = 114^{w.h.}$. On peut aussi considérer l'énergie emmagasinée par kg de plaque: elle est égale, évidemment, à la capacité spécifique multipliée par 1,9. Pour les accumulateurs fixes, cette énergie par kg de plomb varie de $1,9 \times 5$ à $1,9 \times 10$ watts-heure et elle est à peu près double pour les éléments employés à la traction.

Considérons maintenant 10 accumulateurs de $60^{a.h.}$ montés en tension; l'énergie qu'ils peuvent fournir par leur décharge est égale à la capacité $60^{a.h.}$ multipliée par la f. é. m. de la batterie qui est $1,9 \times 10 = 19^{volts}$ c'est-à-dire $60 \times 19 = 1140$ w. h.

Si l'on groupe les éléments en quantité, la capacité est $(101) 60 \times 10 = 600^{a.h.}$ et la f. é. m. $1^v,9$. L'énergie disponible est

1. Rappelons que 1 watt-heure = 3600 joules; $Q^{ah} = Q \times 3600$ coulombs. Or, $Q \times 3600$ coulombs $\times 1^v,9 = Q \times 3600 \times 1,9^{joule} = Q \times 1,9$ watts-heure

donc $600 \times 1,9 = 1140$ w.h.; elle a la même valeur que précédemment.

105. Rendements. — 1° **Rendement en quantité.**

Le rendement en quantité est égal au quotient de la quantité d'électricité rendue à la décharge par la quantité absorbée pendant la charge. Ce rendement atteint 80 à 90 pour 100.

Exemple : un accumulateur est chargé sous un régime de courant de 6 a, il faut 10 h. pour le charger, il a donc absorbé 60^{a.h.}. La décharge, sous un régime de 9^a, dure 5 heures et demie et produit $9 \times 5,5 = 49^{\text{a.h.}},5$.

$$\text{Le rendement en quantité} = \frac{49,5}{60} = 0,825.$$

2° **Rendement en énergie.** — *C'est le quotient de la quantité d'énergie que peut rendre l'accumulateur par la quantité d'énergie qu'il a absorbée.*

Supposons dans l'exemple précédent que la charge ait eu lieu sous la f. é. m. moyenne de 2^v,2 environ; la décharge se produit sous 1^v,9 environ, on a :

Énergie dépensée pour la charge = $60^{\text{a.h.}} \times 2^{\text{v}},2$ (watts-heure).

Énergie recueillie à la décharge = $49,5 \times 1,9$ (watts-heure).

$$\text{Rendement en énergie} = \frac{49,5}{60} \times \frac{1,9}{2,2} = 0,825 \times 0,864 = 0,71.$$

Les accumulateurs donnent des rendements voisins de ce nombre.

104. Régime de charge et de décharge. — La conservation de l'accumulateur exige certaines précautions pendant la charge; un courant trop intense produit des déformations de la matière active, surtout sur la plaque positive et pour les accumulateurs à oxyde rapporté. On utilise pour les appareils fixes, des courants de 1 à 2 ampères par kg de plaques et on emploie des courants plus forts, pouvant atteindre une valeur presque double de la précédente pour les accumulateurs employés à la traction; mais si l'on utilise mieux de cette façon l'appareil (puisque la durée de la charge représente un temps pendant lequel l'appareil ne rend pas de services) c'est aux dépens de la durée des plaques. La chute des matières actives a non seulement pour inconvénient l'usure des plaques, mais il

peut arriver que cette matière établisse un court-circuit entre deux plaques voisines.

A la décharge, on peut employer un courant un peu supérieur à celui de la charge. D'ailleurs les *intensités maxima à employer sont indiquées par les constructeurs et il faut se conformer à leurs indications.*

REMARQUE. — Le poids de plomb que l'on compte est celui d'un seul accumulateur si ces appareils sont montés en tension puisque le même courant les traverse tous. Si les appareils étaient groupés en quantité, on prendrait pour poids le *poids total* de tous les éléments.

105. **Charge et décharge.** — Elle se fait à l'aide d'une dynamo à *courant continu* et il faut employer une dynamo excitée en dérivation. Nous reviendrons sur cette question à propos des dynamos.

On reconnaît la fin de la charge ;

1° A l'aide du voltmètre qui atteint 2^v,5 par élément.

2° A l'aide d'un densimètre qui marque 24° Baumé (ou une densité de 1,20).

3° Au dégagement assez abondant des gaz (oxygène et hydrogène).

La fin de la décharge est indiquée :

1° par le voltmètre, on s'arrête lorsque la f. é. m. atteint 1^{volt},8 par élément ;

2° par le densimètre, la densité tombe au-dessous de 1,18 (20° Baumé).

106. **Entretien. — Sulfatation des électrodes.** — Il faut se conformer pour la charge et la décharge aux indications fournies par le constructeur ; il est bon que ces indications soient inscrites sur un tableau voisin de la batterie ; on y indiquera : la f. é. m. maximum de charge de la batterie, la f. é. m. minimum de la décharge, les densités, les intensités de régime, etc. La batterie doit être maintenue très propre et on doit éviter d'une façon absolue les courts-circuits sous peine de réduire sa durée à quelques mois.

Vérifier de temps en temps, tous les quinze jours, la batterie élément par élément ; à cet effet, on se sert d'un petit voltmètre qui va de 0 à 3 volts à l'aide duquel on mesure la f. é. m. de chaque élément

chargé. Si la f. é. m. est plus petite que la normale, on regarde s'il n'est pas tombé entre les plaques un peu de matière active qui établit un court-circuit (il suffit de la faire tomber au fond avec une tige de verre) ou si deux plaques déformées ne se touchent pas — dans ce cas il faut les retirer et les redresser, puis remonter l'élément. — Il est bon de donner tous les mois une surcharge de deux heures avec un courant faible.

La batterie ne doit jamais rester déchargée; lorsqu'elle n'est pas utilisée, il faut la charger au moins une fois par semaine. Si elle doit rester longtemps sans être employée, il faut enlever l'électrolyte et le remplacer par l'eau pure que l'on renouvelle deux ou trois fois pour qu'il ne reste plus d'acide.

Pour mettre de nouveau la batterie en service il suffit de remplacer l'eau pure par l'acide à la concentration indiquée précédemment (5 vol. d'eau pour 1 vol. d'acide à 66° B).

Sulfatation. — Lorsqu'une batterie déchargée est abandonnée pendant quelque temps, le sulfate de plomb pulvérulent répandu dans la matière active subit une modification, il s'agglomère et forme des croûtes blanches, dures, qui recouvrent les électrodes. Cette couche présente une assez grande résistance électrique. Pour remettre la batterie en état, on peut la charger avec un courant faible et prolonger assez longtemps la surcharge. Si cette opération ne suffit pas pour faire disparaître les croûtes blanches, on remplace l'électrolyte par de l'eau pure et on fait une charge prolongée avec une faible intensité. Enfin il peut arriver que cette opération soit elle-même insuffisante; dans ce cas, il faut démonter les plaques, les laver dans l'eau pure en les frottant avec une brosse. On remonte ensuite les éléments et on fait d'abord une charge prolongée, à faible intensité, dans l'eau pure. On remplace ensuite l'eau par l'électrolyte. Lorsque les éléments sont bien entretenus, les plaques négatives doivent durer une dizaine d'années, les positives ne durent guère que deux ou trois ans.

107. Autres systèmes d'accumulateurs. — L'accumulateur au plomb a l'inconvénient d'avoir un poids mort considérable, car la matière active ne correspond guère qu'à 3 ou 4 pour 100 du poids des plaques. A cause de leur poids considérable, ils sont peu transportables. De nombreux systèmes ont été essayés, un seul a donné des résultats intéressants et cependant il n'a pas remplacé l'accumulateur au plomb: c'est l'élément d'Edison. Les plaques sont en tôle d'acier et portent, dans des cavités, un mélange aggloméré de fer et de graphite, pour les négatives, et un mélange d'oxyde de

nickel et de graphite pour les positives. L'électrolyte est une solution de potasse. La f. é m. est plus petite que celle de l'élément Planté.

108. **Usages des accumulateurs.** — 1° Les accumulateurs jouent le même rôle que les réservoirs d'eau dans une distribution d'eau ou que les gazomètres dans une distribution de gaz. Ils permettent de fournir l'énergie électrique malgré une consommation irrégulière en utilisant des machines génératrices à production à peu près constante. C'est ainsi que les *batteries-tampon* permettent d'emmagasiner, pendant le jour, la production des dynamos et de la distribuer, le soir, au moment de la consommation pour l'éclairage.

On évite de cette manière l'emploi de machines à très grande puissance, capables de fournir l'énergie qui correspond au maximum de consommation (voy. applications des dynamos).

2° Dans les ateliers, on peut, pendant le jour, employer une partie de la force motrice à la mise en marche d'une dynamo dont le courant charge des accumulateurs; ceux-ci servent le soir pour l'éclairage.

3° On les utilise toutes les fois qu'on ne peut pas employer directement le courant des dynamos : traction des tramways dans certaines villes où les conducteurs aériens sont interdits; toutefois, on tend à employer dans ce cas d'autres dispositions, en particulier, le trolley souterrain. On utilise les accumulateurs sur les automobiles pour le fonctionnement de la bobine d'allumage; on les emploie dans les sous-marins pendant la marche en plongée, etc...

4° On pourrait les utiliser comme transformateurs, en les chargeant en tension et en les déchargeant en surface ou inversement (voy. exercices ci-dessous).

EXERCICES.

1. Une batterie de 50 accumulateurs montés en tension est chargée en 8 heures par une dynamo qui produit un courant de 10 a.; le rendement en quantité étant de 0,82, calculer la durée de la décharge, celle-ci étant produite avec une intensité de 12 a. Calculer aussi le rendement en éner-

gie en admettant que pendant la charge la f. é. m. moyenne est 2^r,1 et pendant la décharge 1^r,9.

R. 1° 5^h28^m. — 2° 0,74.

* 2. Après la charge, on dispose les 50 éléments en 5 séries de 10; calculer la f. é. m. moyenne du groupement, à raison de 1^r,9 par élément. Les pôles sont réunis par une résistance de 10 ohms; quelles seront: la durée de la décharge et l'intensité du courant dans la résistance? On admet le même rendement en quantité, par élément et on suppose négligeable la résistance de l'accumulateur.

R. 19 volts. — 1^r,9 — 127^h 12/19.

3. On propose d'installer une batterie d'accumulateurs capable de fournir le courant à 20 lampes de 16 bougies qui exigent pour leur fonctionnement 110 volts et 0^a,5; les lampes devant être allumées pendant 5 heures, quel doit être le nombre des éléments de la batterie et quelle est la capacité de chacun d'eux? La résistance de la batterie est négligeable.

Solution. — Les éléments doivent être montés en tension et les lampes sont montées en parallèle; de sorte qu'il faut prendre assez d'éléments pour avoir 110^r; soit $\frac{110}{1,9} = 58$ pendant la plus grande partie de la décharge et $\frac{110}{1,8} = 62$ vers la fin. Il faudra 62 éléments dont 4 ne seront mis en circuit que vers la fin.

La quantité d'électricité utile est $0,5 \times 20 \times 5 = 50$ a-h.

Telle sera la capacité de chaque élément.

4. Quelle est l'énergie disponible emmagasinée dans une batterie de 60 accumulateurs de capacité 80 a-h? Donner le résultat en hectowatts-h et en kgm.

5. Une batterie de 10 accumulateurs, montés en tension, fait passer le courant dans une résistance inconnue. La batterie se décharge en 8 heures; calculer l'intensité du courant et la résistance du circuit, la capacité étant 28 a.-h. On prend pour f. é. m. moyenne 1^r,9.

CHAPITRE VIII

LES AIMANTS

CHAMP MAGNÉTIQUE DES COURANTS

109. *Aimants naturels et aimants artificiels.* — Le magnétisme est l'étude des propriétés des aimants ⁽¹⁾. On appelle aimant des corps qui ont la propriété d'attirer la limaille de fer.

Il existe *des aimants naturels* ou *pierres d'aimant*; ils sont formés par certains échantillons d'oxyde de fer Fe^{O}_4 qu'on appelle l'oxyde magnétique. Cet oxyde est un excellent minerai de fer; il n'y a que certains échantillons de ce minerai qui sont des aimants.

Lorsqu'on plonge un échantillon d'aimant naturel dans la limaille de fer, on constate, en le retirant, que cette limaille reste attachée en certains points et y forme des sortes de houppes plus ou moins longues. Les points où se forment ces petits amas sont appelés *des pôles*, le nombre en est toujours pair. Un pôle n'est d'ailleurs pas un point géométrique; nous entendons par ce mot une région où l'attraction du fer est plus grande que dans les régions voisines.

Les aimants artificiels sont de deux sortes :

1° Les **aimants permanents**; ce sont ceux qui conservent la propriété d'attirer le fer et le temps ne leur fait pas perdre sensiblement cette propriété. Les aimants permanents ne peuvent être fabriqués qu'en *acier trempé*. On leur donne différentes formes, les plus usités sont :

1. Le mot magnétisme vient de ce que les anciens retiraient les aimants naturels dans les environs de la ville de Magnésie (Asie Mineure).

a) *Les barreaux prismatiques allongés*; la fig. 55 représente un barreau suspendu;

b) *Les aiguilles en forme de losanges très allongés*: la fig. 56

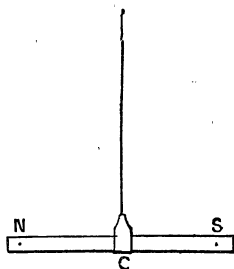


Fig. 55.
Barreau aimanté.

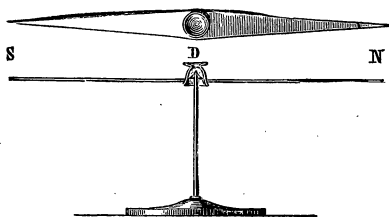


Fig. 56.
Aiguille aimantée.

représente une aiguille reposant sur un pivot vertical. Les aiguilles aimantées sont surtout utilisées dans les boussoles;

c) *Le fer à cheval*, que l'on peut regarder comme un barreau que l'on aurait courbé (fig. 57).

2° *Les aimants temporaires*; on les fait en *fer doux* (le mot fer doux est employé pour désigner le fer presque pur par opposition avec l'acier qui est du fer dur) et on leur donne le nom d'*électro-aimants*. Ils sont formés d'un noyau de fer doux autour duquel est enroulé un fil dans lequel on peut faire passer un courant électrique. Lorsque le courant passe, le fer doux prend des propriétés magnétiques qui disparaissent, à peu près complètement, quand on supprime le courant. Les électro-aimants sont employés dans les sonnettes électriques, les récepteurs télégraphiques, les machines dynamos, etc.; ils seront étudiés plus loin.

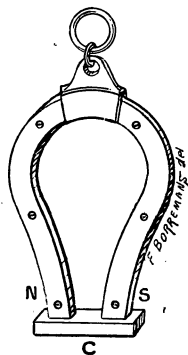


Fig. 57. — Aimant en fer à cheval.

110. *Pôles*. — Lorsqu'on plonge un barreau aimanté dans

la limaille de fer (fig. 58), on constate que la limaille s'accumule vers les extrémités et qu'il y en a de moins en moins à mesure qu'on se rapproche du milieu. La ligne MN, où il n'y a

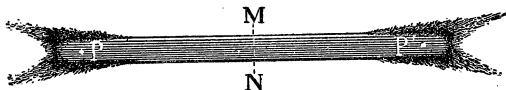


Fig. 58. — Attraction de la limaille de fer par un aimant.
L'action est nulle au milieu.

pas d'attraction, s'appelle la *ligne neutre*; les régions voisines des extrémités où cette attraction est maximum s'appellent les *pôles*. Dans un aimant en fer à cheval, les pôles sont aussi aux extrémités et la ligne neutre au milieu, comme si l'on avait replié en forme de fer à cheval un barreau aimanté.

111. Action de la Terre. — Déclinaison et inclinaison.

— Considérons une aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité de façon à être mobile dans tous les sens; elle est soustraite à l'action de son poids (puisque le centre de gravité est fixé) et prend, dans l'espace, une direction déterminée. On réalise cette suspension en fixant l'aiguille à un axe OO' passant par le centre de gravité (fig. 59); l'axe est soutenu par un étrier de cuivre E suspendu à un fil très fin. L'aiguille prend une position ns , l'extrémité n , qui plonge vers le bas, est en même temps dirigée vers le nord. Si on retourne l'aiguille, ou si on lui donne une autre orientation, elle revient d'elle-même à sa position primitive après avoir exécuté un certain nombre d'oscillations. Cette orientation est due à l'action de la Terre sur l'aiguille. L'extrémité qui se dirige vers le Nord est appelée pôle nord; l'autre est le pôle sud (1).

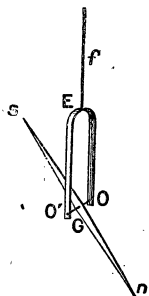


Fig. 59. — Aiguille suspendue par son centre de gravité.

1. Les constructeurs recuisent les aiguilles de boussole jusqu'au bleu et

Le mode de suspension de la fig. 59 n'est pas commode pour les usages ; il manque de stabilité. On détermine, plus facilement, la direction de l'aiguille aimantée par deux opérations.

1° *Déclinaison*. — Dans un premier appareil, appelé *boussole de déclinaison*, on suspend l'aiguille sur un pivot vertical de façon qu'elle

soit mobile dans un plan horizontal, comme l'aiguille de la figure 56.

Pour repérer la direction, on place

au-dessous de l'aiguille un cercle

divisé. Si l'on a eu soin de déterminer,

par une opération astronomique, la direction

sud-nord et qu'on place le diamètre

0—180 dans cette direction, on voit

que l'aiguille fait un certain angle

(fig. 60) avec ce diamètre.

L'angle que fait l'aiguille avec la

direction sud-nord (cette direction s'appelle la *méridienne* du lieu)

est appelé la *déclinaison*. Elle vaut un peu moins de 15° à Paris.

— La déclinaison varie avec le lieu et elle varie aussi avec le temps (1).

— Pour se diriger avec une boussole, il faut connaître la déclinaison du lieu où l'on se trouve.

2° *Inclinaison*. — Une *boussole d'inclinaison* se compose

d'un cercle divisé vertical au centre duquel est fixé un pivot horizontal sur lequel on fait reposer, par son centre de gravité,

enlèvent sur la partie sud l'oxyde qui produit la coloration. De sorte que le côté bleu est la partie nord.

1. Voyez pour plus de détails, cours de Physique.

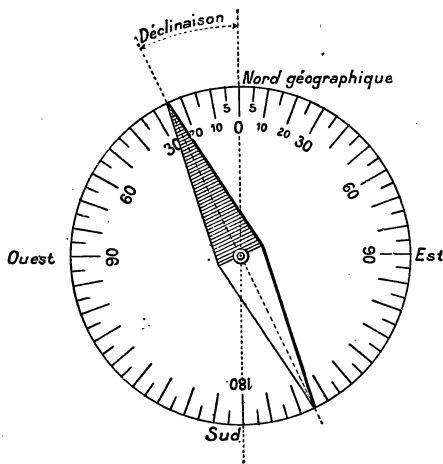


Fig. 60. — Boussole de déclinaison.

une aiguille aimantée; cette aiguille est donc mobile dans un plan vertical. Si l'on mesure l'angle qu'elle fait avec le diamètre horizontal, qui passe par son centre, on trouve que cet angle varie avec la direction qu'on donne au cercle gradué. *L'angle est minimum lorsque le plan du cercle est dans la direction de l'aiguille de déclinaison* (cette direction est appelée *méridienne magnétique* et l'on désigne sous le nom de *méridien magnétique* le plan vertical qui passe par cette direction); cet angle minimum, qui vaut 65° à Paris, est appelé *l'inclinaison du lieu*. L'inclinaison varie avec le lieu et avec le temps.

112. **Actions réciproques des aimants.** — Si on approche du pôle nord N (fig. 61) d'une aiguille aimantée

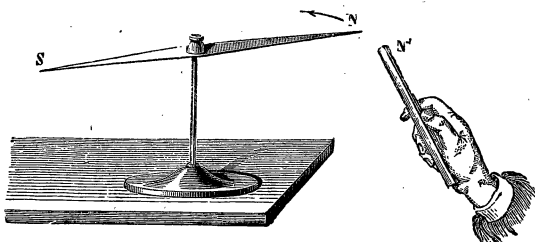


Fig. 61. — Actions réciproques des pôles.

mobile sur un pivot le pôle nord N' d'un autre aimant, il y a répulsion; le pôle nord N' attirerait, au contraire, le pôle sud de l'aiguille mobile. Le pôle sud du barreau produirait des effets contraires. Donc : *les pôles de même nom se repoussent et les pôles de noms contraires s'attirent.*

REMARQUE. — On applique cette règle pour reconnaître si un corps est aimanté : l'une de ses extrémités doit produire des actions contraires sur les pôles d'une aiguille mobile. Un morceau de fer ou d'acier non aimanté attire les deux extrémités.

115. **Quantité de magnétisme.** — *Idée de la loi de Coulomb.* — Sans faire aucune hypothèse sur la nature des phénomènes que nous étudions, nous pouvons appeler magnétisme le « quelque chose » qui donne aux pôles d'un

aimant les propriétés que nous venons d'étudier qualitativement. Il est naturel de chercher à faire des mesures et d'évaluer l'intensité des forces d'attraction ou de répulsion que nous venons d'observer. Nous nous bornerons à l'expérience suivante. Sur l'un des plateaux d'une balance (fig. 62), assez sensible, plaçons une longue aiguille aimantée SN et faisons la tare.

Approchons ensuite, au-dessous, une seconde aiguille N_1S_1 de façon que les pôles N_1 et N qui se repoussent soient à une distance d . La balance est soulevée du côté des barreaux; on la ramène au zéro en mettant des poids.

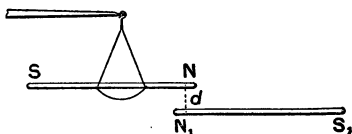


Fig. 62. — Définition de la quantité de magnétisme.

Soit m grammes ⁽¹⁾ la masse mise dans le plateau; la force répulsive f des pôles N et N_1 que l'on évalue en dynes, est égale à $f = m \times 981$ dynes. Il est bon de remarquer que les actions réciproques des autres pôles sont à peu près négligeables par rapport à l'action principale de N sur N_1 , et cela, non seulement, à cause des distances des autres pôles, mais surtout parce que les forces que ces pôles exercent sont presque horizontales et, par suite, sans action sur la balance.

Si nous remplaçons le barreau $N_1 S_1$ par un autre $N_2 S_2$ que nous placerons à la même distance d , nous constaterons une autre force répulsive f' qui sera mesurée par la masse m' qu'on aura employée pour rétablir l'équilibre.

Nous conviendrons de dire, par définition, que les pôles N_1 et N_2 ont des quantités de magnétisme qui sont entre elles comme f et f' . Les forces magnétiques sont donc, par définition, proportionnelles à la quantité de magnétisme des pôles (on dit aussi intensité d'un pôle, au lieu de quantité de magnétisme).

Reprenons la première expérience, et supposons que nous

1. La masse que l'on met ainsi, pour $d = 1$ ou 2 cm., est assez petite, de l'ordre du décig. ou du g. : il faut donc une balance assez sensible. De plus, il ne faut pas que le fléau soit en fer.

ayons rétabli l'équilibre avec une masse m pour une distance $d=1$ cm. Si nous doublons la distance, la répulsion sera plus petite et mesurée par une masse $\frac{m}{4}$, environ. Nous déduirons de cette expérience un peu grossière que

Les forces magnétiques qui s'exercent entre deux pôles sont inversement proportionnelles aux carrés des distances qui les séparent.

Ce résultat, connu sous le nom de loi de Coulomb, se vérifie par d'autres expériences et surtout par ses conséquences. On trouverait d'ailleurs la même loi pour le cas des attractions.

114. Unité de quantité de magnétisme. — Quantité totale de magnétisme dans un aimant. — On dit qu'un pôle a une charge d'une unité, lorsque placé à un centimètre d'un pôle égal, la force répulsive est une dyne.

Supposons qu'on puisse mettre en regard, à un centimètre de distance, un pôle nord de 15 unités et un pôle nord égal à 1, la force répulsive serait 15 dynes. Si nous donnons au second pôle une charge 12, la force est multipliée par 12 d'après la définition même de la quantité de magnétisme, et la force sera (15×12) dynes. Enfin, si la distance est 5 cm, la force est rendue 5^2 fois plus petite, on aura donc pour la force :

$$f = \frac{15 \times 12}{5^2}.$$

Nous pouvons généraliser cette formule; la force répulsive qui s'exerce entre deux pôles qui ont des masses ou quantités magnétiques m et m' et qui sont à une distance r est :

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

Si l'un des pôles est de signe contraire à l'autre, on considère sa masse magnétique comme négative et le signe — pour la force indique une attraction.

Si dans la première expérience du n° 113 on avait mis au-dessous du pôle N le pôle S_1 du second bareau, on aurait trouvé, à la même distance d , une force attractive de même grandeur

que la force répulsive ; ce qui prouve que les pôles N_1 et S_1 contiennent des quantités égales et de signes contraires de magnétisme. Il en est de même pour tout corps aimanté ; par suite, *la quantité totale de magnétisme d'un aimant est nulle, c'est-à-dire qu'il contient des quantités égales, en valeur absolue, des deux sortes de magnétismes.*

115. Constitution des aimants. — Prenons une aiguille à tricoter que nous aimanterons par les procédés qui seront indiqués plus loin. Si on la plonge dans la limaille de fer, elle se couvre de limaille à ses deux extrémités ; de plus,

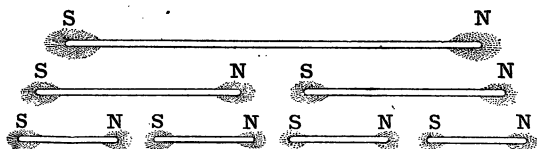


Fig. 63. — Constitution des aimants. Expérience de l'aimant brisé.

si on l'approche d'une aiguille aimantée mobile, on peut constater la position de ses deux pôles N et S (fig. 63). Ceci fait, nous brisons l'aiguille en deux parties suivant la ligne neutre ; nous aurons ainsi deux tronçons, et nous pourrions constater que chacun d'eux est un aimant ayant ses pôles placés de la même manière que l'aimant primitif. La même opération pourra être répétée sur chaque fragment obtenu, si petit qu'il soit. Il résulte de cette expérience, l'impossibilité d'avoir un pôle unique.

Il faut conclure de cette expérience capitale qu'un aimant doit être regardé comme un assemblage d'un très grand nombre de petits aimants orientés tous de la même manière. Ces petits aimants sont appelés *aimants particuliers*. L'effet que l'on observe avec un barreau aimanté est la résultante des actions que produisent ses aimants particuliers. On peut d'ailleurs faire l'expérience inverse ; coller sur une règle plate des petits aimants en les appliquant les uns contre les autres, les pôles contraires en contact : l'effet total est identique à celui d'un aimant unique ; l'attraction de la limaille n'a lieu que vers les extrémités.

116. **Champ magnétique. — Lignes de force.** — On appelle *champ magnétique* une portion de l'espace dans laquelle une aiguille aimantée est soumise à des forces. — On est dans un champ magnétique quand on est dans le voisinage d'un aimant ; on est aussi dans un champ magnétique à la surface de la terre puisque l'aiguille aimantée prend une direction déterminée : c'est le champ magnétique terrestre. On étudie, qualitativement, les champs magnétiques assez intenses à l'aide des *spectres magnétiques*.

Prenons une feuille de carton, ou mieux une lame de verre

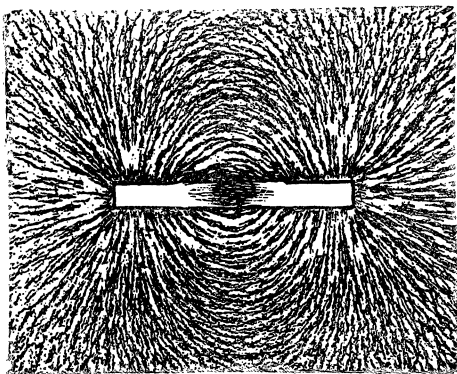


Fig. 64.

Lignes de force d'un barreau aimanté

(vitre) sur l'une des faces de laquelle on colle une feuille de papier blanc ; cette lame de verre est posée sur la table et repose sur des morceaux de bouchons de façon qu'il reste un intervalle suffisant, sous le verre, pour y passer un barreau aimanté.

Projetons, d'assez haut, à l'aide d'un petit tamis, de la fine limaille de fer : nous la verrons se disposer, comme le montre la figure 64, suivant certaines lignes très nettement dessinées.

Le barreau se trouve figuré par l'absence de limaille, il apparaît en blanc, sauf au voisinage de la ligne neutre où la limaille reste en place où elle est tombée. De part et d'autre de cette ligne neutre, on voit des lignes qui partent d'un point du barreau et viennent aboutir à un autre point placé symétriquement par rapport à la ligne neutre. Les lignes de limaille

sont plus serrées vers les extrémités, elles partent en divergeant de l'un des pôles et *il semble* qu'elles reviennent à l'autre pôle après avoir décrit un chemin qu'on peut suivre sur toute sa longueur, comme on peut le faire pour les lignes qui partent de points plus voisins de la ligne neutre. On donne à ces lignes, tracées par les grains de limaille de fer, le nom de *lignes de force* ; nous allons justifier cette expression.

Pour cela, nous prenons une petite aiguille aimantée (un fragment d'aiguille à coudre que l'on a aimanté par les procédés qu'on verra plus loin) ; nous la suspendons à l'aide d'un

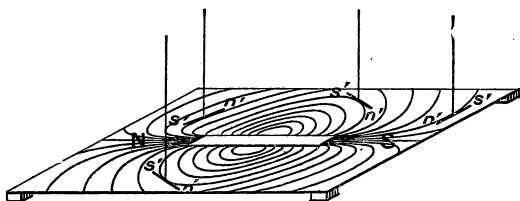


Fig. 65. — Une petite aiguille aimantée se place suivant la tangente à la ligne de force.

fil de façon qu'elle soit horizontale et nous la promenons au-dessus de la lame de verre sur laquelle se trouve un *spectre magnétique*. Dans chaque position, l'aiguille se place suivant la tangente à la ligne de limaille, son pôle nord étant tourné du côté du pôle sud du barreau aimanté (fig. 65). Si l'aiguille employée est assez petite, et qu'on la fasse voyager le long d'une ligne de force, elle dessine en quelque sorte cette ligne.

Or, il est évident que la petite aiguille aimantée prend la direction de la force magnétique dans la région où elle se trouve ; par conséquent, en un point quelconque d'une ligne de force, la direction de la force magnétique est tangente à cette ligne, d'où une définition plus précise :

On appelle ligne de force d'un champ magnétique une ligne telle que la tangente en un quelconque de ses points donne la direction de la force magnétique.

117. **Intensité d'un champ magnétique.** — **Sens**

des lignes de force. — Considérons une aiguille aimantée ns (fig. 66) placée dans un champ magnétique ; son pôle nord n est soumis à une certaine force nF dont la grandeur dépend, à la fois, de la quantité de magnétisme qui est au pôle et de la

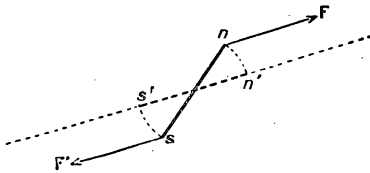


Fig. 66. — Action d'un champ magnétique sur une petite aiguille aimantée.

nature du champ. Supposons que le pôle n soit un pôle unité, la force nF représente, dans ce cas, ce qu'on appelle l'intensité du champ magnétique au point n :

L'intensité d'un champ magnétique en un point est donc la

force exercée par le champ sur l'unité de pôle nord. L'unité d'intensité de champ magnétique est appelée gauss⁽¹⁾ ; c'est l'intensité d'un champ magnétique qui produit une force de 1 dyne sur un pôle nord égal à l'unité.

Si l'aiguille ns est assez petite, l'intensité du champ en s est la même qu'en n et l'action sF' sur le pôle sud est une force égale, parallèle et de sens opposé à nF . La petite aiguille est soumise à un couple⁽²⁾ et elle tourne autour de son point d'appui jusqu'à ce qu'elle ait pris la position $n's'$ de façon que les forces qui agissent soient directement opposées et se fassent équilibre. L'aiguille se place donc, comme nous l'avons admis, dans la direction de la ligne de force.

Les grains de limaille jouent, d'ailleurs, le rôle de très courtes aiguilles ; nous verrons, plus loin, que le fer s'aimante dans un champ magnétique : chaque grain de limaille se met donc dans le sens de la ligne de force et une file de grains dessine cette ligne.

On convient de prendre pour sens d'une ligne de force le sens

1. GAUSS (1777-1855), célèbre mathématicien allemand.

2. On appelle couple un groupe de deux forces parallèles égales et opposées ; un tel système, en agissant sur un corps mobile autour d'un axe, a pour effet de produire la rotation (voy. mécanique).

que l'on suit en partant du pôle nord du barreau pour aller vers le pôle sud le long de la ligne de force (fig. 67); ce sens est donné en chaque point par une petite aiguille aimantée, c'est celui que l'on suit en allant du pôle sud au pôle nord de la petite aiguille exploratrice. C'est aussi

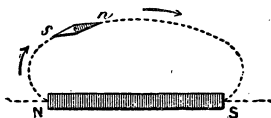


Fig. 67.
Sens des lignes de force.

le sens suivant lequel se déplacerait un pôle nord *supposé isolé*.

118. **Champ uniforme.** — **Autres exemples de champs.** — On dit qu'un champ magnétique est uniforme dans une certaine région de l'espace lorsque, dans cette région,

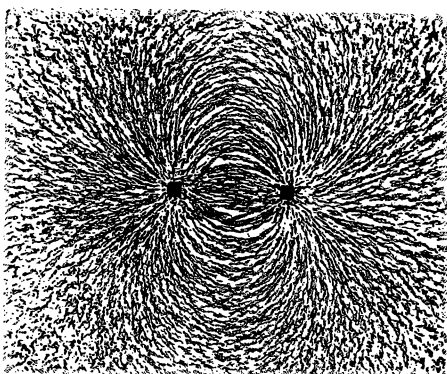


Fig. 68. — Champ produit par deux pôles de noms contraires.

le champ a, en tous points, même direction et même intensité. Le champ magnétique terrestre dans un espace peu étendu est uniforme; l'aiguille aimantée prend en tous les points la même direction [définie par la déclinaison et l'inclinaison] et l'intensité est partout la même. A Paris,

cette intensité est de $0^{\text{gauss}},46$, c'est-à-dire que la force exercée par la Terre, sur un pôle de masse magnétique égale à 1, a pour valeur $0^{\text{dync}},46$.

Nous verrons (123) qu'on réalise facilement des champs uniformes plus intenses à l'aide de bobines parcourues par un courant.

La figure 68 représente les lignes de force du champ produit par deux pôles de noms contraires et la figure 69 le champ produit par deux pôles de même nom.

Le champ d'un aimant en fer à cheval est représenté figure 70 ;

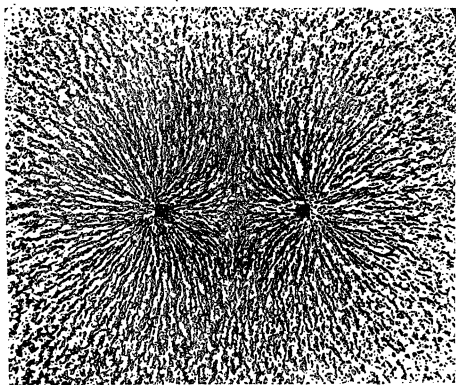


Fig. 69.

Champ produit par deux pôles de même nom.

— 1° **Méthode des oscillations.** — On place dans le champ un barreau aimanté suspendu par un fil vertical, sans torsion, on écarte le barreau de sa position d'équilibre et on détermine la durée de son oscillation. Cette durée permet de calculer l'intensité du champ si l'on connaît une certaine constante du barreau appelé son *moment magnétique*.

2° **Méthode de déviation (magnétomètre).** — Le champ à mesurer est employé à produire la déviation d'une aiguille aimantée ; la mesure de la déviation et la connaissance du champ magnétique terrestre permettent de calculer l'intensité du champ.

3° **Méthode d'induction.** — La mesure de la quantité d'électricité induite produite par le déplacement d'un cadre dans le champ peut servir à déterminer l'intensité de ce champ (voy. induction).

120. **Écran magnétique.** — L'ac-

on remarquera que, dans une partie de la région comprise entre les pôles, le champ est à peu près uniforme, car les lignes de forces y sont parallèles.

119. **Pre-mière idée des méthodes employées pour mesurer l'intensité d'un champ magnétique.**

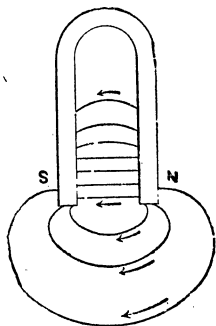


Fig. 70. — Lignes de force d'un aimant en fer à cheval.

tion magnétique se propage à travers tous les corps, sauf le fer et les corps analogues. Pour le prouver, reprenons l'expérience du n° 116 et interposons entre le barreau aimanté et la lame de verre sur laquelle se produit le spectre, des plaques de différents corps : bois, carton, feuilles de différents métaux, etc. ; les lignes de force se produiront toujours de la même façon ; tous les corps laissent passer l'action magnétique. Mais, si nous mettons une lame de tôle un peu épaisse, elle absorbe en quelque sorte les lignes de force et le champ est presque nul au-dessus. On voit que le fer, sous une épaisseur suffisante, peut jouer le rôle d'écran pour l'action magnétique.

CHAMP MAGNÉTIQUE D'UN COURANT

121. *Champ magnétique d'un courant rectiligne de grande longueur.* — Nous avons vu (15) qu'un courant agit sur l'aiguille aimantée pour la dévier de sa position d'équilibre et nous avons indiqué (16) la règle d'Ampère qui donne le sens de cette déviation. Il faut conclure de cette expérience qu'un courant crée, dans son voisinage, un champ magnétique.

Les lignes de force de ce champ sont des circonférences dont le plan est perpendiculaire au courant, et le centre sur le courant. On met en évidence ces lignes de force en prenant une feuille de carton (fig. 71) : un petit trou laisse passer le fil xy qui conduit le courant

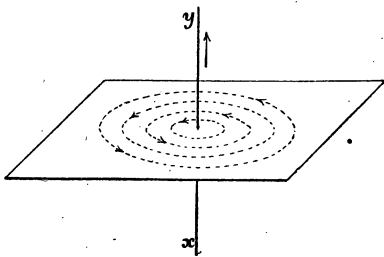


Fig. 71. — Lignes de force du champ produit par un courant rectiligne très long.

(assez intense 15 ou 20 ampères) ; on projette la limaille qui se dispose comme le montre la figure. Le sens des lignes de force est donné par la règle d'Ampère : elles sont dirigées à gauche de l'observateur

d'Ampère (puisque c'est la direction que prend le pôle nord d'une aiguille aimantée).

122. Champ d'un courant circulaire ou d'un courant fermé quelconque. — La figure 72 montre la

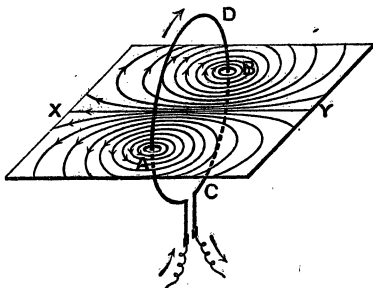


Fig. 72. — Lignes de force du champ produit par un courant circulaire.

direction des lignes de force. Leur sens est encore donné par l'observateur d'Ampère ; celui-ci, couché le long du courant, et regardant à l'intérieur du cercle, aura sa gauche à la gauche de la figure. Ces lignes se ferment sur elles-mêmes : on le voit sur la figure pour celles qui sont voisines du courant.

Il est quelquefois plus commode d'appliquer une autre règle, la règle du *tire-bouchon de Maxwell* : si on fait tourner un *tire-bouchon* dans le sens du courant, il s'enfonce dans le sens des lignes de force (fig. 73). On aurait, d'ailleurs, un résultat analogue avec un courant fermé quelconque.

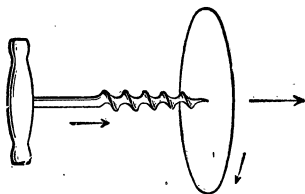


Fig. 73. — Règle de Maxwell.

Il est évident que le courant ne peut pas être complètement fermé ; il faut laisser un petit intervalle entre les bouts du fil qui communiquent avec les pôles du générateur : c'est ce que montre la figure.

On peut explorer le champ avec une petite aiguille aimantée suspendue à un fil fin, comme on l'a fait au n° 116. Le courant est supposé très intense, de sorte qu'au voisinage du courant l'action de la terre est à peu près négligeable.

123. Champ magnétique d'une bobine longue où

solénoïde. — Ampère a appelé *solénoïde* un ensemble de courants circulaires dont les plans sont parallèles. On réalise simplement, ce système en enroulant, en forme d'hélice, un fil conducteur dans lequel on fait passer un courant ; chaque spire équivaut sensiblement à une circonférence. Les lignes de force d'un *solénoïde* sont représentées (fig. 74) ; elles sont, à peu près,

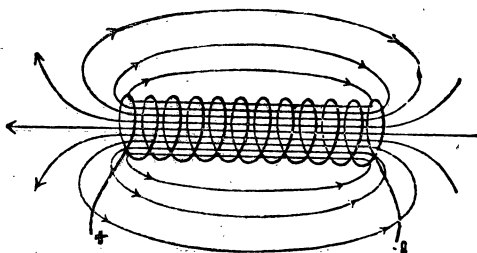


Fig. 74. — Champ produit par un solénoïde.

parallèles entre elles vers le milieu de la bobine et, par suite, *le champ y est uniforme* ; elles divergent aux extrémités. Elles rappellent les lignes de force d'un aimant, avec cette différence, qu'elles partent toutes d'une extrémité et rentrent par l'autre ; il ne part pas de lignes de force de la surface latérale de la bobine, pourvu que les fils soient assez rapprochés.

Pour réaliser ces expériences, on prend une feuille de carton que l'on place perpendiculairement au plan des cercles, de façon qu'elle passe par la ligne qui joint les centres. Des trous pratiqués dans le carton laissent passer les fils. On projette la limaille comme dans le cas des aimants.

Si l'on ne veut que les lignes de force, à l'*extérieur* du solénoïde, il suffit de prendre une bobine quelconque sur laquelle est enroulé du fil isolé parcouru par le courant ; on place au-dessus de la bobine une feuille de carton ou de verre, et on opère comme avec un aimant.

124. **Intensité du champ à l'intérieur d'une bobine.** — On démontre que, dans l'intérieur d'une bobine,

assez loin des extrémités pour que le champ soit uniforme, l'intensité du champ a pour valeur :

$$H = 1,25 \frac{N}{l} i = 1,25 n_1 i.$$

Dans cette formule, H est l'intensité du champ évaluée en gauss, i l'intensité du courant en ampères, N le nombre de spires de fil, l la longueur de la bobine en centimètres. Le quotient $\frac{N}{l} = n_1$ représente le nombre de spires par centimètre de longueur. Le produit $n_1 i$ est appelé le nombre des *ampères-tours* par centimètre, et le produit Ni , le nombre total des ampères-tours. Le nombre 1,25 est la valeur approchée de $\frac{4\pi}{10}$.

L'intensité du champ, assez loin des extrémités, est indépendante de la longueur et de la section de la bobine; celle-ci peut avoir une forme et des dimensions quelconques, l'intensité du champ ne dépend que du nombre de tours par centimètre et de l'intensité du courant.

125. Analogie avec les aimants. — Les courants, produisant un champ magnétique, présentent donc une certaine analogie avec les aimants.

a. Un courant plan fermé ou un courant circulaire peut être comparé à une lame aimantée, de faible épaisseur, dont les faces constituent les pôles; une telle lame s'appelle un *feuillet magnétique*. La face nord est celle par laquelle sortent les lignes de force, et la face sud, celle par laquelle elles rentrent. Si on rend mobile, autour d'un axe vertical, un courant circulaire, ou un courant plan fermé quelconque, ce courant s'oriente dans le champ magnétique terrestre : sa face nord se dirige vers le nord et, par suite, le plan du courant se place perpendiculairement à la direction du méridien magnétique, c'est-à-dire à peu près *est-ouest*.

La règle du tire-bouchon ou celle d'Ampère montrent que le courant est descendant du côté est, montant du côté ouest et qu'il va de l'est à l'ouest dans la partie inférieure. *Un obser-*

vateur qui regarde la face nord, y voit le courant marcher en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Un courant fermé a, d'ailleurs, toutes les autres propriétés d'un feuillet magnétique de même contour; en particulier, l'action d'un aimant ou d'un autre courant est la même.

Différentes dispositions sont utilisées pour rendre un courant mobile; la disposition la plus commode est représentée

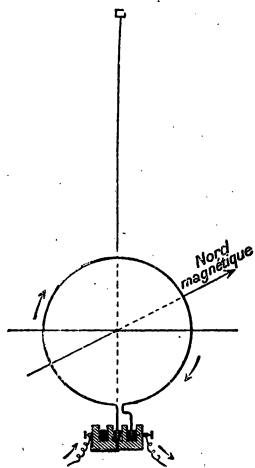


Fig. 75. — Disposition permettant de rendre mobile un courant.

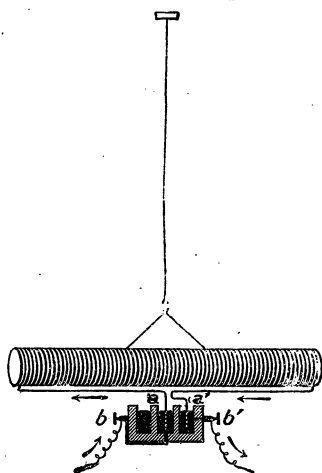


Fig. 76. — Solénoïde mobile autour d'un axe vertical.

figure 75. Deux godets concentriques en bois contiennent du mercure, le mercure extérieur est réuni à l'un des pôles du générateur et le mercure intérieur à l'autre pôle. Dans ces godets plongent les extrémités, convenablement recourbées, du circuit métallique circulaire que l'on veut rendre mobile; un fil de soie fin et long supporte le système. On voit que l'appareil peut tourner autour de l'axe vertical déterminé par le fil (celui-ci étant fin et long ne s'oppose pas sensiblement au mouvement; sa torsion ne serait sensible que si on tournait de plusieurs tours).

Il est facile de vérifier que le plan du cercle s'oriente à peu près est-ouest, la face sud est en avant de la figure et la face nord en arrière.

b. SOLÉNOÏDE. — Les expériences sont plus nettes avec un solénoïde suspendu comme le montre la figure 76. Cet appareil présente toutes les propriétés d'un aimant :

1° Il s'oriente de façon que son axe soit dans le méridien magnétique. On reconnaît le pôle nord, à ce qu'un observateur y voit le courant marcher en sens inverse des aiguilles d'une montre ;

2° Si on le suspend à un axe horizontal, de façon que son axe soit dans le méridien magnétique, le pôle nord plonge vers le bas, comme une aiguille d'inclinaison ;

3° Les pôles de même nom de deux solénoïdes se repoussent et les pôles de noms contraires s'attirent ;

4° Un aimant agit sur un solénoïde, comme il agit sur un aimant mobile ;

5° La seule différence entre un aimant et un solénoïde est que, dans ce dernier, les lignes de force ne sortent que par les extrémités : il n'en sort pas des points de la surface latérale.

EXERCICES.

1. Calculer en grammes-poids la force répulsive qui s'exerce entre deux pôles nord ayant des masses de 100 et 200 unités, leur distance étant 5 centimètres.

R. 800 dynes = 0^{gr},815.

2. A quelle distance faut-il placer les pôles précédents pour que la force répulsive ne soit plus que 1 dg. poids ?

R. 14^{cm},1.

* 3. Une aiguille aimantée, très longue, 40 centimètres, est supposée avoir ses pôles exactement à ses bouts ; ces pôles contiennent une masse magnétique de 100 unités. Calculer le moment du couple qu'il faut lui appliquer pour la maintenir dans une position perpendiculaire aux lignes de force d'un champ uniforme de 10 gauss.

Solution sommaire. — A chaque pôle est appliquée une force égale à $100 \times 10 = 1000$ dynes, ces forces sont parallèles, égales et de sens contraires ; elles forment un couple dont le bras de levier est 40 centimètres.

Le moment du couple est donc :

$1000 \times 40 = 40\,000$ ergs (le produit d'une force par une longueur est de même espèce qu'un travail et s'évalue en ergs).

Remarque. — On appelle moment magnétique d'un barreau le moment du couple auquel il est soumis lorsqu'on le place dans un champ de 1 gauss. Le barreau précédent aurait pour moment magnétique 4000 unités.

4. Calculer l'intensité du champ à l'intérieur d'une bobine longue de 40 centimètres sur laquelle on a enroulé 4 couches de 500 fils parcourus par un courant de 2 a.

R. 125 gauss.

CHAPITRE IX

AIMANTATION FLUX D'INDUCTION MAGNÉTIQUE

126. *Aimantation du fer doux.* — Un morceau de fer doux placé dans un champ magnétique s'aimante dans le même sens que le champ, c'est-à-dire qu'il prend un pôle sud à l'extrémité par laquelle entrent les lignes de force et un pôle nord où elles sortent. De plus, lorsqu'on supprime le champ qui produisait cette aimantation, le fer doux revient à l'état naturel à peu près complètement et d'autant mieux qu'il est plus doux (plus pur, bien exempt de carbone).

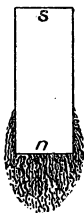
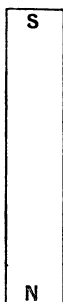


Fig. 77. — Aimantation du fer doux par un aimant.

Nous allons établir ces faits par différentes expériences.

1° **Le champ magnétisant est produit par un aimant.** — Plongeons un petit barreau de fer doux *ns* (fig. 77) dans la limaille de fer, il ne l'attire pas. Répétons l'expérience en plaçant au-dessus et à faible distance, ou encore mieux au contact, un barreau aimanté *NS*; si nous soulevons l'ensemble *NS*, *ns*, sans augmenter la distance *Ns*, le fer doux emporte de la limaille de fer. Écartons assez loin l'aimant *NS*, la limaille retombe. Le fer doux a donc été

aimanté, temporairement, pendant le temps qu'il était soumis à l'influence du barreau NS.

L'expérience est plus intéressante à faire en produisant le spectre magnétique d'un barreau aimanté NS placé à une petite distance d'un morceau de fer doux *ns*; on place une petite cale de bois entre *ns*

et NS pour empêcher l'attraction de produire le contact. La figure 78 montre ce spectre qu'il faut comparer à celui que donnerait l'aimant NS placé seul au-dessous de la plaque de verre. On voit que les lignes de force partant de N ont été modifiées dans leur forme, au lieu de

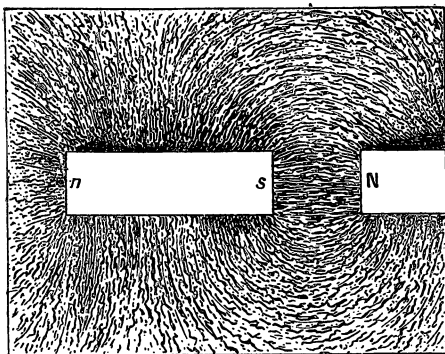


Fig. 78. — Modification produite dans la répartition des lignes de force d'un aimant par l'approche d'un morceau de fer.

diverger en sortant du pôle, elles tendent à venir passer dans le morceau de fer doux. Si *s* est assez près de N, il y a, entre les deux, un champ très intense et en partie uniforme. Il est évident que *s* est un pôle sud puisque les lignes de force parties de N entrent en *s*. D'ailleurs une petite aiguille aimantée mobile (une petite boussole), approchée de *s*, est déviée et son pôle nord se dirige du côté *s* qui est bien un pôle sud. Le petit morceau de fer doux *ns* s'est donc bien aimanté dans la direction du champ.

Si on retire l'aimant NS et qu'on donne quelques chocs à la plaque sur laquelle repose la limaille, toutes les lignes disparaissent : il n'y a plus d'aimantation.

Conséquences. — Attraction du fer. — L'attraction du fer par un aimant se produit parce que le fer s'aimante avec

un pôle de nom contraire en regard de celui de l'aimant. De même, les grains de limaille de fer dont on se sert pour produire les spectres s'aimantent et jouent le rôle de très petites aiguilles aimantées qui dessinent les lignes de force.

Un morceau de fer doux, aimanté par influence, peut aimanter un autre morceau de fer, et celui-ci à son tour peut en aimanter un troisième. C'est ainsi qu'un clou qui est en contact avec un aimant attire un autre clou qu'il peut porter aussi, etc.

2° **Le champ magnétique est produit par un courant.** — Prenons une bobine sur laquelle est enroulé du fil isolé dans lequel on peut faire passer un courant (fig. 79) et

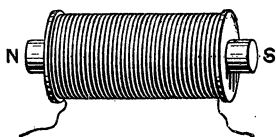


Fig. 79. — Électro-aimant.

introduisons à l'intérieur un barreau de fer doux. Si nous faisons passer le courant, il est facile de vérifier qu'un morceau de fer est fortement attiré par les pôles N et S. On pourra reconnaître les pôles en approchant une aiguille aimantée mobile. Le fer doux placé dans le champ magnétique produit par la bobine s'est donc aimanté, et si on avait eu soin de déterminer au préalable, les pôles du solénoïde formé par la bobine seule (avant l'introduction du fer) on constaterait que le fer doux s'est aimanté dans le même sens. On peut prévoir, d'après le sens du courant, à quelle extrémité se produit le pôle nord : *on sait qu'un observateur qui regarde un pôle nord y voit le courant circuler en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre.*

Lorsqu'on supprime le courant, le fer doux revient à peu près à l'état naturel, mais il peut conserver un peu de magnétisme qu'on appelle *magnétisme rémanent*. Les chocs et les vibrations font disparaître le magnétisme rémanent. Le système formé d'une bobine contenant un noyau de fer doux est appelé *électro-aimant* (voy. plus loin).

127. **Aimantation de l'acier.** — Un morceau d'acier soumis aux mêmes expériences que celles que nous venons de

faire avec du fer s'aimante également, mais beaucoup moins que le fer; l'aimantation est facilitée par les chocs et le frottement du barreau d'acier. Mais, lorsqu'on supprime le champ magnétisant, l'acier conserve une forte proportion de *magnétisme rémanent* : il est devenu un *aimant permanent*. Il semble que pour aimanter l'acier, il y ait à vaincre une certaine résistance et que cette résistance particulière, appelée *force coercitive* s'oppose à l'aimantation, cette résistance est d'autant plus forte que l'acier est mieux trempé. Les aimants permanents sont donc faits avec de l'acier trempé.

REMARQUE. — Le champ magnétique terrestre peut aimanter différents objets, et en particulier, les outils; il est rare que ces derniers ne soient pas légèrement aimantés, ce que l'on constate en approchant leurs différents points d'une petite boussole.

128. *Procédés d'aimantation*. — On emploie exclusivement l'aimantation par les courants. Supposons que le morceau d'acier ait la forme d'un barreau (fig. 80); on enroule, sur une partie,

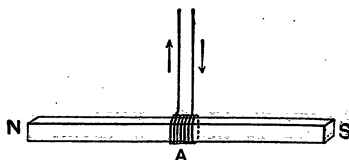


Fig. 80.
Aimantation d'un barreau d'acier.

on enroule, sur une partie, une vingtaine de tours de gros fil de cuivre isolé et on fait passer le courant. On fait glisser cette petite bobine de A vers N, puis on revient en S, on retourne en N et ainsi de suite. La dernière passe se fait de S vers A; on supprime ensuite le courant.

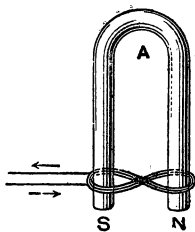


Fig. 81. — Aimantation d'un noyau d'acier, en fer à cheval.

Pour un aimant en fer à cheval, on enroule le fil comme le montre la figure 81, en sens inverses sur les deux branches. On fait passer le courant et on fait glisser la double bobine vers le haut; on redescend, et ainsi de suite un certain nombre de fois. On termine par une descente de A vers NS.

La position des pôles est déterminée par le sens du courant comme précédemment.

On peut aussi aimanter en frottant le barreau d'acier avec le

pôle d'un aimant ou d'un électro : l'aimantation obtenue est moins régulière. Si l'on veut aimanter faiblement une aiguille, on la frotte avec le pôle d'un petit barreau aimanté de droite à gauche, toujours dans le même sens : l'aiguille présente un pôle de nom contraire à celui du barreau du côté gauche où l'on fait la séparation.

129. **Conservation des aimants permanents.** — Les aimants d'acier perdent peu à peu leur aimantation, si on ne les con-

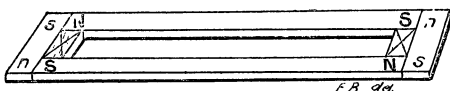


Fig. 82. — Conservation des aimants.

serve pas avec certaines précautions. On doit d'abord éviter les chocs et les actions mécaniques; en outre, on munit les aimants de pièces de fer doux qu'on appelle des contacts qui ont pour but de fermer le circuit magnétique. Les barreaux sont réunis par deux dans une boîte (fig. 82), les pôles de noms contraires en regard et des pièces de fer doux, *ns*, *ns*, servent de contacts. Un tel système laisse échapper au dehors de lui très peu de lignes de force et il n'a qu'une action très faible sur une aiguille aimantée. On munit aussi d'armatures en fer doux les aimants en fer à cheval (fig. 57).

130. **Corps magnétiques et corps diamagnétiques.** — Le fer, la fonte, l'acier, le nickel, le cobalt et certains alliages de ces métaux sont les seuls corps qui donnent lieu aux phénomènes magnétiques importants que nous avons étudiés jusqu'ici; ce sont les seuls qui, placés dans un champ magnétique, sont soumis à des forces dont la grandeur est facilement appréciable.

Si on place dans des champs magnétiques très puissants (on réalise actuellement entre les pôles assez voisins de forts électros des champs de 30 000 à 40 000 gauss) des corps quelconques, on constate que tous subissent une certaine action. Les uns sont attirés par l'aimant, les autres sont repoussés : on en conclut que les premiers, comme le fer,

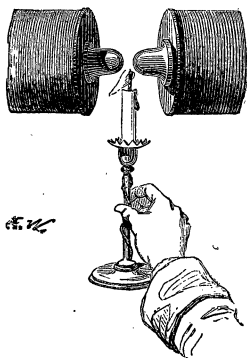


Fig. 83. — La flamme d'une bougie est diamagnétique.

s'aimantent dans le sens des lignes de force et les autres en sens opposé. Les premiers sont appelés des corps peu magnétiques (ou paramagnétiques) et les seconds, des corps diamagnétiques. Les forces exercées sur ces corps par des champs magnétiques sont de 100 000 à 1 000 000 de fois plus petites que celles que l'on observe dans le cas du fer. Citons quelques exemples : l'oxygène est magnétique; un ballon d'oxygène placé *au-dessus* d'un puissant électro est attiré et son poids augmente; si on verse de l'air liquide sur les pôles d'un électro, l'oxygène reste sur les pôles et l'azote tombe.

Le corps le plus diamagnétique est le bismuth : une balle de bismuth, suspendue à un fil, est repoussée par un pôle d'électro. L'eau, le gaz carbonique, sont diamagnétiques. La flamme d'une bougie, à cause du gaz carbonique et de la vapeur d'eau qu'elle contient, est diamagnétique; si on l'approche des pôles d'un électro puissant, elle est repoussée (fig. 83).

FLUX D'INDUCTION MAGNÉTIQUE

151. Flux dans un liquide en mouvement. —

Avant de définir le flux magnétique, il est bon de dire quelques mots de l'analogie hydraulique qui a conduit à cette notion.

1^{er} Cas. — **Conduite à section constante.** — Considérons une conduite d'eau qui a partout la même section, le liquide y est en mouvement et le régime permanent est supposé atteint (1).

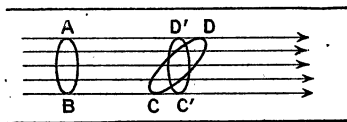


Fig. 84. — Flux liquide dans un canal de section constante.

Les lignes de courant, c'est-à-dire les lignes suivies par les molécules d'eau, sont évidemment des droites parallèles et la vitesse est nécessairement la même en tous les points de la conduite. Plaçons dans le liquide un cerceau AB (fig. 84) dont le plan est perpendiculaire aux lignes de courant; ce cerceau est

1. Nous avons déjà indiqué (25) que, lorsque le régime permanent est atteint, en un point donné du liquide, la pression garde la même valeur et la vitesse du liquide en ce point est toujours la même.

traversé par l'eau : nous appellerons *flux liquide* à travers la surface du cerceau le volume de liquide qui le traverse en un certain temps, une seconde par exemple. Il est évident que ce flux est égal à la vitesse du liquide multipliée par la surface du cerceau.

Si le cerceau CD est incliné sur la direction des lignes de courant, le flux ne se calcule pas aussi simplement ; il est égal à celui qui traverse la projection C'D' de CD sur un plan perpendiculaire au courant. Si le cerceau était couché le long du courant le flux serait nul. Il n'est pas nécessaire de considérer un cerceau à contour circulaire ; les définitions s'appliquent, évidemment, pour un contour fermé quelconque.

2^e CAS. — **Conduite à section variable.** — Considérons, maintenant, une conduite d'eau à section variable ABC A'B'C' (fig. 85) ; lorsque le régime permanent est atteint, il passe, dans le même temps, la même quantité d'eau dans les sections AA', BB', CC' (voy. 20) et, comme ces sections sont

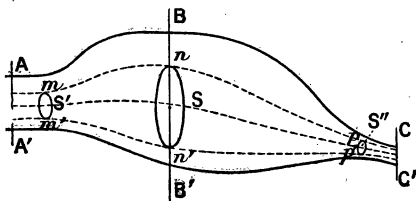


Fig. 85. — Flux liquide. Cas d'une conduite à section variable.

inégaux, les vitesses sont aussi inégales. La vitesse augmente nécessairement quand la section diminue pour qu'il passe le même flux de liquide. Le flux liquide à travers une surface S est

toujours le volume de liquide qui traverse cette surface en une seconde ; mais ce flux ne peut plus se calculer aussi simplement que plus haut, car les différents filets liquides qui traversent S ont des directions différentes. On conçoit qu'en partageant la surface S en un grand nombre de petites parties on puisse, par le calcul, évaluer le flux liquide.

Considérons encore les lignes de courant telles que mnp et $m'n'p'$ qui s'appuient sur tout le contour S, ces lignes limitent dans le liquide une sorte de tube qu'on appelle *tube*

de flux, il est évident que, à travers les sections S' , S et S'' de ce tube, le flux a la même valeur, c'est-à-dire qu'il passe autant de liquide, dans une seconde, à travers les surfaces S' , S et S'' .
Il y a conservation du flux le long d'un tube de flux.

3^e CAS. — **Conduite dont les différentes parties ne sont pas également perméables.** — Considérons, enfin,

une conduite remplie de sable assez fin, sauf la partie ABCD (fig. 86) dans laquelle il y a du gros gravier ; cette partie sera beaucoup **plus perméable** à l'eau et les lignes de courant tendront à passer dans cette région de moindre ré-

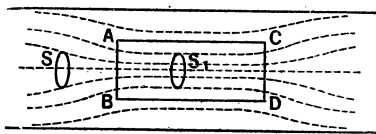


Fig. 86. — Flux liquide. Cas d'une conduite dont les différentes parties ne sont pas également perméables.

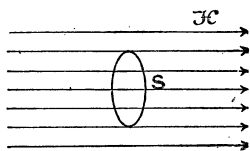
sistance. La vitesse du liquide sera plus grande dans la partie ABCD et le flux liquide à travers une surface S_1 sera plus grand qu'à travers la surface S de même grandeur placée dans la région la moins perméable.

Il est évident que les lignes de courant s'écarteraient au contraire dans la partie ABCD si elle était moins perméable que le reste du tuyau.

132. **Flux de force magnétique.** — Au lieu de considérer les lignes de force d'un champ magnétique comme de simples lignes géométriques qui donnent en chaque point la direction de l'intensité de ce champ, il est commode de les matérialiser, dans une certaine mesure, et d'imaginer que « quelque chose » se propage le long de ces lignes, de même que l'eau s'écoule le long des lignes de courant ; ce « quelque chose », on l'appelle le **flux magnétique**. Il n'est pas nécessaire, d'ailleurs, que ce flux ait une existence réelle ; il suffit qu'il nous fournisse une représentation commode, permettant de retrouver facilement les faits expérimentaux.

Si nous assimilons l'intensité d'un champ magnétique à la vitesse d'un liquide, nous pourrions donner la définition suivante :

On appelle **flux de force magnétique** à travers une surface S (fig. 87) **perpendiculaire aux lignes de force d'un champ uniforme le produit de l'intensité H du champ par la surface.**



Si l'on représente le flux par la lettre Φ (phi) on a

$$\Phi_{\max} = H_{\text{gauss}} \times S_{\text{cm}^2}$$

Fig. 87. — Flux magnétique à travers une surface.

H est évalué en gauss, S en cm^2 et le flux est exprimé avec une unité appelé *maxwell* (en l'honneur de l'illustre physicien anglais). **Le maxwell est égal au flux produit par un champ de 1 gauss à travers une surface de 1 cm^2 .**

Comme dans le cas du flux liquide, si la surface est inclinée sur la direction des lignes de force, on devra considérer la surface S' projection de S sur un plan perpendiculaire aux lignes de force, dans ce cas on a :

$$\Phi = H \times S \times \cos \alpha$$

α étant l'angle de la surface S avec le plan perpendiculaire aux lignes de force.

Le flux serait nul si la surface S était couchée le long des lignes de force.

Lorsque le champ n'est pas uniforme, le calcul du flux est plus difficile parce que les lignes de force ne sont plus parallèles, le calcul peut se faire dans certains cas simples ; mais pour la pratique, il suffit, souvent, de se rendre compte *grossièrement* de sa valeur. On arrive à ce résultat par la considération **du nombre des lignes de force qui traversent la surface.**

Cette expression nécessite une convention car, en toute rigueur, *le nombre des lignes de force qui traversent une surface est infini ; puisqu'il passe une ligne de force en chaque point.* Mais on convient de figurer un nombre de lignes proportionnel à l'intensité du champ.

Prenons par exemple un solénoïde (fig. 88), les lignes de force qui sortent par sa face nord divergent.

Supposons que l'intensité du champ au point M soit 4 gauss; au point M traçons un cercle AB de rayon tel que sa surface soit 1cm^2 et dont le plan soit normal (perpendiculaire) à la ligne de force qui passe en M. Nous réglerons l'espacement des lignes de force de façon qu'il en passe 4 dans le cercle AB. Si une surface quelconque C est traversée, par exemple, par 6 lignes de force, le flux à travers C aura pour valeur 6 maxwells environ.

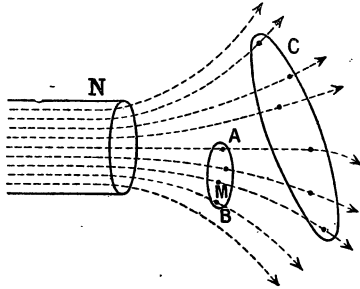


Fig. 88. — Évaluation grossière du flux par le nombre des lignes de force.

Mais il faut bien remarquer que ces lignes de force sont tracées dans l'espace et que celles que l'on produit par les spectres de limaille sont dans un plan; il faut donc se représenter, approximativement, les lignes dans l'espace d'après la forme des spectres de limaille pour se rendre compte grossièrement de la valeur du flux à travers une surface. Bien que cette représentation soit très grossière, elle rend de très grands services et il faut s'habituer à voir les lignes de force dans l'espace.

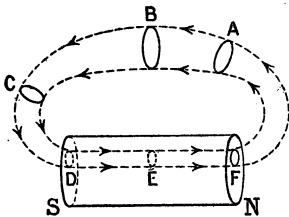


Fig. 89.

Flux produit par un solénoïde.

135. **Remarque.** — Dans le cas d'un solénoïde, les lignes de force se ferment sur elles-mêmes et le **flux de force magnétique forme un circuit fermé** comme un courant électrique. Il y a conservation du flux le long d'un tube de

force. Comme au n° 131, le tube est défini par les lignes circonscrites à une surface telle que A (fig. 89). La figure montre un tube de force ABCDEF. Chaque surface est traversée par le même flux (ou par le même nombre de lignes de force — on ne les a pas tracées pour simplifier la figure). Lorsque le tube s'élargit, l'intensité du champ diminue puisqu'il y a le même flux pour une surface plus grande.

134. Flux d'induction. — Induction. — Dans le cas d'un aimant, les lignes de force sont limitées à la surface du métal, mais il semble naturel de supposer qu'elles se continuent à l'intérieur de façon à former encore un circuit fermé. On appelle *lignes d'induction* les lignes qui continuent les lignes de force, à l'intérieur d'un aimant. **Le flux d'induction** continue, à l'intérieur de l'aimant, le flux de force extérieur. Si nous supposons que la figure 89 représente un aimant SN, au lieu d'un solénoïde, le flux de force dans le tube de force ABC se retrouve, dans l'aimant sous le nom de tube d'induction et la surface E est traversée par un flux d'induction qui a même grandeur, *en valeur absolue*, que le flux de force à travers B.

Nous disons *en valeur absolue*, parce que le flux en E est de sens contraire à celui de B : puisque B est traversé de droite à gauche et E de gauche à droite.

Induction. — On appelle *induction* en un point E d'un aimant une grandeur analogue à l'intensité d'un champ magnétique ; elle a pour valeur le *flux d'induction à travers une surface de 1^{cm}²*.

Le flux d'induction, comme le flux de force, s'évalue en maxwells, on le représente ordinairement par Φ comme un flux de force. L'induction se représente par B et s'évalue en gauss comme une intensité de champ.

Lorsque les lignes d'induction sont parallèles et qu'une surface S est perpendiculaire aux lignes d'induction on a, comme pour le flux de force,

$$\Phi_{\text{maxwells}} = B_{\text{gauss}} \times S_{\text{cm}^2}.$$

La supposition que nous venons de faire, sur l'existence d'un flux d'induction à l'intérieur d'un aimant, se trouve justifiée par

l'expérience de l'aimant brisé (fig. 90). Si l'on brise un aimant NS et qu'on écarte légèrement les extrémités *n* et *s*, on vérifie, facilement, en faisant le spectre de limaille, que les lignes de force sont très serrées et à peu près parallèles entre *n* et *s*. Le calcul montre que, si *s* et *n* sont très rapprochés de façon à laisser entre eux une fente étroite, l'intensité du champ magnétique dans cette fente est égale à l'induction *B* définie plus haut. On voit bien que l'induction est, en quelque sorte, l'intensité du champ à l'intérieur de l'aimant.

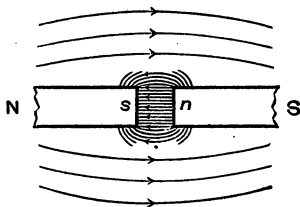


Fig. 90. — Champ entre deux portions d'un aimant brisé.

Il résulte, de ce qui précède, que la valeur de l'induction sert de mesure à l'aimantation.

Nous verrons dans la suite, qu'au point de vue pratique, il n'y a pas de différence entre le flux de force et le flux d'induction et, ordinairement, nous ne distinguerons pas ces deux flux; nous les réunirons tous deux sous le nom de **flux magnétique**. Les variations de ces flux produisent les courants d'induction qui sont presque les seuls utilisés dans l'industrie électrique.

135. Perméabilité magnétique.

— Nous avons montré que lorsqu'on approche d'un morceau de fer doux *n s* le pôle N d'un aimant (fig. 78), le fer s'aimante parce que les lignes de force parties de N tendent à venir passer, en grand nombre, dans le fer *n s* (comparer les lignes de force de la

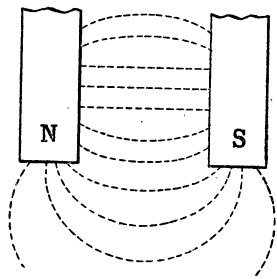


Fig. 91.

figure 78 à celles d'un aimant (fig. 64). On peut dire, par analogie avec le flux liquide (131,3°) **que le fer est plus per-**

méable que l'air au flux magnétique. La figure 91 représente le champ magnétique, en partie uniforme, compris entre les pôles d'un aimant en fer à cheval.

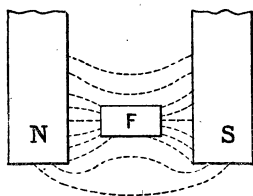


Fig. 92. — Le fer doux est plus perméable que l'air.

Si on introduit un petit morceau de fer doux F (en évitant avec des cales de bois, qu'il ne se précipite sur l'aimant) on voit, en faisant le spectre, les lignes de force se déformer et venir passer en grand nombre dans le fer (fig. 92).

Coefficient de perméabilité magnétique ou perméabilité. — Considérons un solénoïde à l'intérieur duquel le champ magnétique a une certaine valeur H (égale à $1,25 n_1 i$) si $S \text{ cm}^2$ est la section du solénoïde, le flux magnétique est $\Phi = HS$.

Introduisons un barreau de fer qui remplit complètement l'intérieur du solénoïde, ce barreau s'aimante et le flux magnétique est considérablement augmenté, soit Φ' sa nouvelle valeur, on appelle *coefficient de perméabilité* du fer, ou simplement *perméabilité*; le rapport $\frac{\Phi'}{\Phi}$, que l'on représente par μ (mû), donc :

$$\mu = \frac{\Phi'}{\Phi} \text{ ou } \Phi' = \mu \Phi$$

On voit que l'introduction du fer a pour effet de multiplier le flux par la perméabilité μ .

Il faut aussi remarquer que, si la section du solénoïde était 1 cm^2 , le flux, avant l'introduction du fer, était égal numériquement à H et, qu'après, il est égal à l'induction B (flux d'induction par cm^2); on a donc aussi :

$$\mu = \frac{B}{H} \text{ ou } B = \mu H$$

136. **Courbes d'aimantation.** — **Saturation ma-**

gnétique. — Si le coefficient de perméabilité μ était un nombre constant pour un même échantillon de fer, le problème de l'aimantation serait très simple parce que, connaissant le champ H dans lequel on introduit le morceau de fer, on pourrait calculer très simplement par la formule $B = \mu H$, l'induction qui caractérise l'aimantation et lui sert de mesure. Malheureusement, le coefficient μ varie considérablement avec l'intensité du champ, *il est une certaine fonction de H* , fonction qui ne peut pas se représenter par une formule simple. On est obligé de faire usage de tables ou de courbes. De plus, le coefficient μ , pour un même échantillon, dépend des actions magnétiques que cet échantillon a subies précédemment, comme nous verrons un peu plus loin (hystérésis). La composition chimique du métal et son état physique ont une influence considérable sur ses propriétés magnétiques; la présence dans le fer : de carbone, de manganèse, de nickel, etc., apportent des variations souvent énormes dans la perméabilité (un acier à 8 pour 100 de manganèse n'est plus magnétique, c'est-à-dire qu'il n'est plus attiré par les aimants). On voit combien la question qui nous occupe est complexe. Les courbes représentées fig. 93 et 94 montrent la

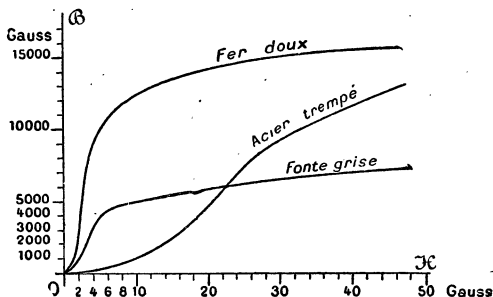


Fig. 93. — Variation de l'aimantation avec le champ magnétisant.

marche générale du phénomène; elles se rapportent à des échantillons qui sont aimantés pour la première fois; elles ne tiennent pas compte de l'hystérésis (157). La figure 95

représente les variations de l'induction en fonction du champ magnétisant. Sur l'axe des abscisses, on a porté les valeurs du champ magnétisant et en ordonnées, les valeurs correspondantes de l'induction B . On voit facilement, sur ce graphique, que l'induction du fer doux augmente rapidement lorsque H croît; et, à partir de $H = 10$ gauss, l'accroissement de B est très lent et correspond surtout au champ magnétique produit par le courant magnétisant.

Toutes ces expériences sont faites en plaçant un cylindre de fer doux à l'intérieur d'un solénoïde et l'induction B peut être regardée comme la somme de deux grandeurs; l'une due à

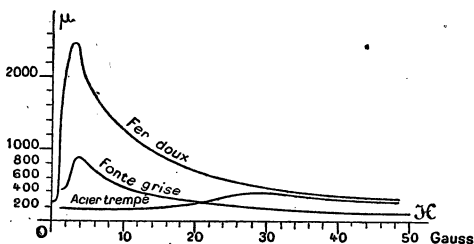


Fig. 94. — Variation du coefficient de perméabilité.

l'aimantation du fer, l'autre au champ produit par le courant. A partir d'une certaine valeur du champ magnétisant — qui varie avec l'échantillon — *l'aimantation n'augmente plus*, quelle que soit l'intensité du champ : on dit qu'il y a *saturation magnétique du fer*; à partir de la saturation, l'induction B ne croît plus que de la même quantité dont croît H . Pour les valeurs élevées de H , le fer possède la même perméabilité que l'air, c'est-à-dire que $\mu = 1$.

La figure 94 montre la variation du coefficient μ ; on voit que μ croît très vite; il est maximum, et égal à 3000 environ, pour un champ assez petit, 2 gauss environ; puis μ décroît très rapidement.

Les autres courbes se rapportent à la fonte et à l'acier trempé. La perméabilité de ces corps est plus petite que celle du fer et

l'induction maximum, à saturation, est plus petite aussi que pour le fer. Le nickel, le cobalt et quelques alliages de fer donnent des résultats analogues.

Le tableau suivant contient les *valeurs moyennes* des inductions et des perméabilités pour les métaux employés dans la construction des dynamos. Ces nombres n'ont pas une signification absolue puisqu'ils peuvent varier d'un échantillon à un autre; c'est pour cette raison que nous disons *valeurs moyennes*.

Tableau donnant les valeurs moyennes de H et de μ pour des valeurs données de l'induction B.

FONTE GRISE.			FER FORGÉ.			FER FONDU OU ACIER DOUX.			TÔLES DE FER OU D'ACIER DOUX RECUTES.		
B	H	μ	B	H	μ	B	H	μ	B	H	μ
5.000	10,69	470	5.000	1,68	2.980	5.000	1,45	3.500	5.000	1,11	4.540
5.500	13,6	404	6.000	2,07	2.900	6.000	1,75	3.450	6.000	1,59	4.520
6.000	17,3	347	7.000	2,50	2.800	7.000	2,12	3.500	7.000	1,68	4.165
6.500	24,0	252	8.000	3,02	2.650	8.000	2,57	3.110	8.000	2,05	3.900
7.000	34,0	206	9.000	3,64	2.470	9.000	3,04	2.960	9.000	2,51	3.460
7.500	48,5	155	10.000	4,53	2.200	10.000	3,76	2.660	10.000	3,08	3.200
8.000	64,5	124	11.000	5,77	1.900	11.000	4,70	2.535	11.000	3,85	2.870
8.500	85,5	99	12.000	7,85	1.550	12.000	5,95	2.015	12.000	4,77	2.520
9.000	102,5	88	13.000	11,25	1.155	13.000	8,00	1.625	13.000	6,58	2.040
9.500	125,7	76	14.000	17,2	814	14.000	11,74	1.190	14.000	8,9	1.570
10.000	149,5	67	14.500	23,4	620	14.500	15,5	935	14.500	11,44	1.270
10.500	178,0	59	15.000	37,1	404	15.000	22,5	667	15.000	15,7	955
11.000	207,0	53	15.500	59,1	262	15.500	40,2	586	15.500	26,4	587
11.500	235,0	49	16.000	81,7	196	16.000	65,0	246	16.000	44,5	560
			16.500	112,5	147	16.500	92,8	178	16.500	73,5	224
			17.000	140,0	121	17.000	122,0	159	17.000	101,5	168
			17.500	182,5	96	17.500	161,0	108,5	17.500	156,5	128
			18.000	216,2	85	18.000	198,0	91	18.000	173,5	104
			18.500	262,5	70,5	18.500	242,0	76,4	18.500	221,5	87,5
									19.000	264,0	72

137. Hystérésis. — Nous avons dit que le fer doux qui a été aimanté sous l'action d'un champ magnétique perd cette aimantation lorsqu'on supprime le champ; ce résultat n'est qu'approximatif. Lorsqu'on supprime le champ, si le fer est bien à l'abri des chocs et des trépidations, il peut conserver une forte proportion de *magnétisme rémanent*, il peut garder jusqu'à près de moitié de son induction. Ce magnétisme est peu stable et disparaît presque complètement sous l'action d'un choc. Le fer conservant une partie de l'aimantation qui lui a été donnée, il va résulter de là le phénomène suivant : supposons qu'un morceau de fer, placé dans un solénoïde, soit soumis à des champs magnétisants croissants, qu'on réalise en faisant croître l'intensité du courant dans le solénoïde; si l'on mesure un certain nombre de valeurs du champ et les inductions correspondantes, on peut tracer la courbe OA (fig. 95) qui est une portion de la courbe d'aimantation de la figure 93. Pour un champ magnétisant de 4 gauss environ, l'induction est environ 9000 gauss. Après avoir poussé l'aimantation jusqu'au point A, supposons qu'on fasse décroître le champ magnétisant, le barreau de fer ne reprendra pas les mêmes inductions : ainsi, lorsque le champ magnétisant aura repris la valeur 4 gauss, environ, l'induction sera représentée par $B\beta'_1$, supérieure à 12000. Lorsque le champ sera nul (courant nul dans le solénoïde) l'induction ne sera pas nulle, elle aura pour valeur OC (environ 10 000 sur la figure). Cette longueur OC mesure le *magnétisme rémanent*.

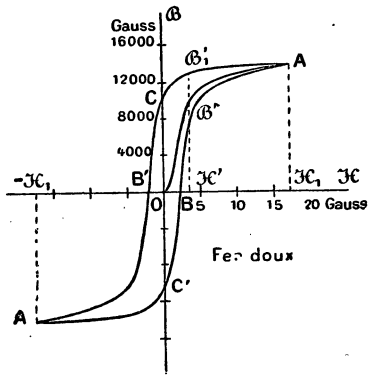


Fig. 95. — Courbes d'hystérésis.

Si l'on veut réduire à zéro l'aimantation du fer (sans choc), il faut appliquer un champ de sens contraire au premier — il

suffit de changer le sens du courant dans le solénoïde. — Lorsque le *champ démagnétisant* aura pris une valeur OB' — que nous considérons comme négative — le barreau n'aura plus d'aimantation. *Le champ de sens contraire* OB' *qu'il faut appliquer pour réduire l'aimantation à zéro mesure ce que nous avons appelé la force coercitive.*

En continuant à augmenter le champ démagnétisant, on arrivera à une aimantation de sens contraire à la première et on atteint le point A' symétrique de A par rapport à O . Si on ramène le champ à zéro, puis de zéro à la première valeur maxima, on revient en A par une courbe $A'C'BA$ différente de OA . On voit que, lorsque le champ est décroissant, l'induction est, pour chaque valeur du champ, plus grande que celle obtenue pour la première fois; inversement, pour les champs croissants, l'induction est plus petite. *L'induction est en retard par rapport à la valeur du champ magnétisant* parce que le fer conserve une partie de son état antérieur; on donne à ce phénomène le nom d'*hystérésis*.

Lorsqu'on fait varier le champ d'aimantation d'une manière alternative, comme le montre la figure, entre deux valeurs égales et contraires, on dit que le fer parcourt un *cycle d'aimantation*.

L'hystérésis correspond à une perte d'énergie; lorsque le fer est soumis à une série d'aimantations alternatives, comme cela a lieu dans les dynamos, il s'échauffe et la perte d'énergie, sous forme de chaleur, est d'autant plus grande que la surface comprise à l'intérieur de la courbe $ACB'A'C'A$ est elle-même plus grande. Pour l'acier, la courbe est plus large et la perte est beaucoup plus grande que pour le fer; de plus, la force coercitive et le magnétisme rémanent sont aussi beaucoup plus grands. Pour cette dernière raison, les aimants permanents sont en acier trempé, le choc ne fait pas, dans ce cas, disparaître l'aimantation.

Formule de Steinmetz. — On peut calculer la perte d'énergie par hystérésis à l'aide d'une formule due à Steinmetz

$$W_{\text{joules}} = \frac{k B^{1,6}}{10^7}$$

Dans cette formule, W est la perte d'énergie en joules, par cm^3 de métal, B est l'induction, elle est élevée à une puissance fractionnaire 1,6; k est une constante qui dépend de l'échantillon.

Les industriels ont réussi à fabriquer pour les induits de dynamos des tôles pour lesquelles ce coefficient est très réduit : $k=0,002$ à $0,003$.

Les calculs relatifs à la formule de Steinmetz se font évidemment à l'aide des logarithmes (voy. exercices).

138. Force portante d'un aimant ou d'un électroaimant. — Application à la mesure de la perméabilité. — La théorie établit que la force qui s'exerce entre un aimant (ou un électroaimant) et une pièce de fer qui est en contact avec lui, est donnée par la formule :

$$F^{\text{dynes}} = \frac{B^2 s}{8 \pi}$$

dans laquelle F est la force évaluée en dynes, B l'induction exprimée en gauss et s la surface de contact en cm^2 .

Exemple numérique. — Un électro en fer à cheval dans lequel l'induction est 10 000 gauss soutient par ses deux surfaces polaires une armature de fer; quelle force faut-il exercer pour arracher l'armature? Surface de chaque pôle, 5cm^2 .

La surface portante est $5 \times 2 = 10\text{cm}^2$, on a donc :

$$F^{\text{dynes}} = \frac{10\,000^2 \times 10}{8 \times 3,1416} = 39\,795\,000 \text{ dynes environ.}$$

Pour avoir la force en kg-poids, il suffit de se rappeler que $1\text{kg-poids} = 981\,000 \text{ dynes}$.

$$F^{\text{kg}} = \frac{39\,795\,000}{981\,000} = 40 \text{ kg environ.}$$

Bien que la formule qui donne la force portante soit approchée, on peut s'en servir pour mesurer approximativement l'induction; c'est le principe de certains *perméamètres*.

L'appareil se compose d'une bobine B sur laquelle est enroulé un fil isolé dans lequel on fait passer un courant dont on mesure l'intensité; dans l'axe de la bobine, on place un cylindre C (fig. 96) fait

avec le métal dont on veut mesurer la perméabilité. Ce cylindre est fixé à une balance ou à un dynamomètre qui mesure la force d'arrachement. Le cylindre C est en contact avec une masse de fer doux AA qui enveloppe tout le système de façon que les lignes de force ne se perdent pas dans l'air, — circuit magnétique à peu près fermé, — condition nécessaire pour que la formule soit à peu près applicable.

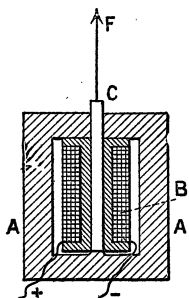


Fig. 96. — Mesure de l'induction par arrachement.

On fait plusieurs mesures de la force d'arrachement afin d'établir différentes valeurs du coefficient μ suivant la grandeur du champ magnétisant (voy. exercices).

159. **Remarque.** — **Autres méthodes.** — La méthode précédente, basée sur la force d'arrachement, n'est pas très précise, elle suffit cependant, dans la pratique, pour juger les qualités d'un métal au point de vue magnétique et elle a permis de trouver des procédés de recuit qui ont

élevé le coefficient de perméabilité.

Pour des études plus précises, on utilise dans les laboratoires la *méthode d'induction*. Une bobine est placée autour de l'échantillon à étudier, elle est reliée à un galvanomètre qui permet de mesurer la quantité d'électricité induite par la suppression de l'aimantation. On déduit de cette mesure la valeur du flux magnétique (voy. induction). On peut aussi utiliser une *méthode de déviation* ou méthode du *magnétomètre*. Une aiguille aimantée est placée à une assez grande distance du solénoïde dans lequel est placé l'échantillon de fer que l'on étudie. Lorsqu'on fait passer le courant, le fer s'aimante et produit une déviation de l'aiguille. De cette déviation on déduit l'induction magnétique dans le fer.

EXERCICES

1. Calculer le flux magnétique à travers un cadre rectangulaire dont les côtés sont 20 centimètres et 15 centimètres. Le cadre est placé perpendiculairement aux lignes de force d'un champ uniforme de 0,46 (champ terrestre).

R. 158 maxwells.

2. Le même cadre est incliné de 60° par rapport à sa première position. Que devient le flux?

R. Il est réduit à moitié.

3. A l'intérieur d'une grande bobine sur laquelle est enroulé un fil parcouru par un courant de 4 ampères, on place vers le milieu un fil circulaire de rayon 2 centimètres perpendiculairement à l'axe de la bobine. Quel est le flux magnétique à travers le cercle, sachant que la grande bobine a une longueur de 40 centimètres et qu'elle porte 3 couches de fil dont l'épaisseur, isolant compris, est 2 millimètres?

$$R. \Phi = Hs \times S^{\text{cm}^2} = 75 \times 2^2 \times \pi = 942^{\text{max}}, 48.$$

4. Même question en remplaçant le fil circulaire unique par une petite bobine formée de 50 spires de même rayon 2 centimètres.

R. Il suffit de multiplier par 50 le résultat précédent.

5. On donne un solénoïde formé de spires de 2 centimètres de rayon, au nombre de 6 par centimètre de longueur. Le solénoïde est rempli par un noyau de fer forgé. Quelle intensité faut-il donner au courant pour que le flux d'induction soit de 125 664 maxwells?

R. 0,6 environ.

Solution. — L'induction est égale à $\frac{\Phi}{S} = \frac{125\ 664}{2^2 \times \pi} = 10\ 000$ gauss.

Le tableau de la page 154 indique que pour avoir cette induction, il faut un champ $H = 4,53$.

$$4,53 = 1,25 n_1 i = 1,25 \times 6 \times i$$

$$i = \frac{4,53}{7,5} = 0,6 \text{ environ.}$$

6. Même question pour la production d'un flux de 206 000 maxwells.

R. 12 ampères environ.

Solution. — Induction = $\frac{206\ 000}{2^2 \times 3,1416} = 16\ 400$ environ.

(Il est inutile de calculer les chiffres des dizaines et des unités, les tableaux ne comportant pas cette précision, d'autant plus que les résultats changent avec les échantillons, il suffit donc de faire un calcul approché).

Le nombre 16 400 n'étant pas dans le tableau, on calcule le champ correspondant en remarquant que, lorsqu'on passe de 16 000 à 16 500, le champ doit augmenter de $112,5 - 81,7 = 30,8$.

Pour une augmentation d'induction de 500, il faut 50,8 d'accroissement du champ, pour une augmentation de 400 il faudra $\frac{50,8 \times 400}{500} = 24,6$.

Il faudra employer un champ magnétisant de $81,7 + 24,6 = 106,3$.

$$i = \frac{106,3}{7,5} = 14,1 \text{ environ.}$$

* 7. Calculer la perte d'énergie par hystérésis en 1 heure, dans un induit de dynamo qui fait 1200 tours par minute, le poids de la tôle est $61^k,6$ et la densité 7,7. Le coefficient d'hystérésis k est 0,002. Induction maximum 10 000.

R. 239 000 joules environ.

On calcule par logarithmes : $\log W = \log 0,002 + \log 8000 + 1,6 \log 10000 + \log 1200 + \log 60 - \log 10^7$.

Le $\log 10^7$ est évidemment 7.

Le nombre 8000 est le volume du fer en cm^3 .

* 8. Une éprouvette cylindrique de fer doux de 1 centimètre de diamètre est placée dans un perméamètre à arrachement. La bobine magnétisante porte 600 spires sur une longueur de 12 centimètres (il y a plusieurs couches de spires). Pour un courant de 0^a,5 la force d'arrachement est $7^k,2$. Calculer la perméabilité.

R. $\mu = 480$.

Solution. — $\mu = \frac{B}{H}$

$$H = 1,25 n_1 i = 1,25 \times 50 \times 0,5 = 31,25.$$

$$F \text{ dynes} = \frac{B^2 s}{8 \pi} \text{ ou } 7^k,200 \times 981\,000 \text{ dynes} = \frac{B^2 \times \pi 0,5^2}{8 \pi}$$

$B = 15\,000$ environ. — Il reste à diviser 15 000 par 31,25.

* 9. Calculer la perte d'énergie due à l'hystérésis, par minute, dans un transformateur qui contient 50 kilogrammes de tôle de densité 7,7. L'induction est 12 000, le coefficient de l'hystérésis 0,0025 et la fréquence est 40 par seconde.

10. Quel courant faut-il faire passer dans une bobine de 20 centimètres de long qui contient 400 spires pour obtenir à travers la surface de l'une des spires de la bobine un flux de 600 maxwells. Rayon de la bobine 2 centimètres.

* 11. Que devient le flux précédent, si l'on remplit de fonte le vide intérieur de la bobine [se servir du tableau de la page 154].

CIRCUIT MAGNÉTIQUE — ÉLECTROAIMANT

140. *Circuit magnétique parfait. — Analogie avec le circuit électrique.* —

Considérons un solénoïde en forme d'anneau (fig. 97) ; supposons que les spires soient régulièrement enroulées et que le diamètre des spires soit petit par rapport au diamètre de l'anneau.

Appelons i l'intensité du courant, N le nombre total des spires, l la longueur de la circonférence moyenne de l'anneau.

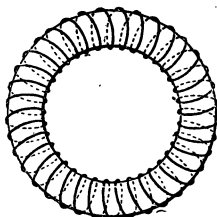


Fig. 97.

On démontre que le champ magnétique à l'intérieur de ce solénoïde est constant et que sa valeur est :

$$H_{\text{gauss}} = 1,25 \frac{N}{l} i = 1,25 n_1 i.$$

Comme dans le cas d'une longue bobine, le produit Ni est appelé le nombre total des *ampères-tours* et n_1 le nombre des *ampères-tours spécifiques* — ou par cm de longueur.

Remplissons la cavité formée par les spires avec un méta magnétique pour lequel la perméabilité est μ (lorsque le champ est H). L'induction B (flux à travers 1 cm^2) est :

$$B^g = \mu H = 1,25 \frac{Ni}{l} \mu = 1,25 n_1 i \mu.$$

et le flux, si la surface d'une spire est S , a pour valeur :

$$\Phi_{\max} = BS = 1,25 \frac{Ni}{l} \mu S \quad (1)$$

Ce qu'on peut écrire :

$$\Phi_{\max} = \frac{1,25 Ni}{\frac{l}{\mu S}} \quad (2)$$

Cette expression (2) rappelle la formule qui résume la loi d'Ohm dans le cas du courant électrique.

On sait que, dans ce cas :

$$\text{intensité du courant} = \frac{\text{force électromotrice}}{\text{résistance électrique}} \text{ ou } i = \frac{E}{R} \quad (3)$$

Or, pour un fil cylindrique,

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

formule dans laquelle l est la longueur du fil, S la section et ρ la résistivité. L'inverse de ρ , c'est-à-dire $c = \frac{1}{\rho}$ est la *conductivité*.

Si l'on remplace, dans (3), R par sa valeur on obtient :

$$i = \frac{E}{\frac{l}{c s}} \quad (4)$$

L'équation (4) est analogue à (2). Si donc on compare le flux magnétique au flux ou courant électrique, on est conduit à assimiler la quantité $1,25 Ni$ à E et on appelle cette quantité, $1,25 Ni$, produit des ampères-tours par $1,25$, la *force magnéto-motrice*.

La quantité $\frac{l}{\mu S}$ est l'analogie de $\frac{l}{c s}$, on l'appelle *résistance*

magnétique ou *réductance*. L'équation (2) peut donc s'écrire :

$$\text{flux magnétique} = \frac{\text{force magnétomotrice}}{\text{réductance}} \text{ ou } \Phi = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{R}} \quad (5)$$

La réductance est, comme la résistance électrique, proportionnelle à la longueur, inversement proportionnelle à la section et elle est en raison inverse de la perméabilité.

Unités. — L'unité de force magnétomotrice est appelée *gilbert*, elle vaut $\frac{1}{1,25}$ d'ampère-tour ou $\frac{4}{5}$ d'ampère-tour.

L'unité de réductance est appelée *œrsted*, c'est la réductance d'une masse d'air ayant 1^{cm} de long et 1^{cm}² de section.

De même que nous appelons *circuit électrique*, le chemin fermé sur lui-même, que suit un courant, nous désignerons sous le nom de *circuit magnétique* le chemin également fermé sur lui-même, que suivent les lignes d'induction magnétique. Le circuit magnétique est dit *parfait* lorsqu'il se présente comme celui que nous avons considéré, c'est-à-dire lorsque toutes les lignes d'induction restent dans le métal et qu'il ne s'en échappe pas dans l'air, comme nous verrons plus bas.

Dans le cas d'un circuit magnétique parfait, la formule (5) s'applique rigoureusement et il y a analogie très grande avec le circuit électrique qui est soumis à la formule (4). Mais il faut bien observer que cette analogie n'existe que dans les formules; elle est précieuse pour retrouver, par analogie, des résultats connus ou pour en prévoir de nouveaux, mais l'analogie n'existe pas dans la nature des deux phénomènes. D'abord, le coefficient de conductivité c est une constante pour un conducteur, il ne dépend pas de l'intensité du courant, tandis que la perméabilité μ d'un métal magnétique dépend de l'induction B et, par suite, du flux magnétique (courbe de la fig. 94).

D'autre part, l'entretien d'un courant dans un conducteur se fait avec une dépense d'énergie, dépense qui correspond à la chaleur dégagée par effet Joule. ($W = Ri^2$ par seconde). Le flux magnétique, une fois établi, ne dépense plus d'énergie, c'est un phénomène statique, il ne circule rien le long des lignes d'in-

duction, tandis qu'il y a circulation d'électricité le long d'un circuit électrique.

141. **Cas où il y a un entrefer assez étroit.** — Supposons que l'on fasse une coupure A dans le circuit précédent (fig. 98), l'intervalle d'air compris entre les extrémités coupées s'appelle un *entrefer*. — On donne ce nom à toute partie d'un circuit magnétique qui n'est pas formée par un métal magnétique ; cette partie peut être de l'air, du bois, du cuivre, etc.

Si l'entrefer est assez étroit, les lignes de force continuent dans l'air, sensiblement, le même chemin qu'elles suivaient

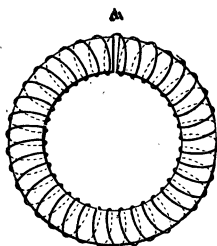


Fig. 98.

lorsqu'il y avait du fer dans la coupure et le circuit magnétique est sensiblement parfait comme précédemment. Mais la réluctance n'est plus la même, elle a considérablement augmenté parce que la perméabilité de l'air, qui est égale à 1, est beaucoup plus petite que celle du fer. La réluctance étant augmentée, le flux magnétique est diminué. Le résultat est analogue à celui qui se produirait dans un circuit électrique dans lequel on aurait coupé, en un point, le conducteur et introduit, entre les extrémités légèrement écartées, un corps peu conducteur du courant.

Si la coupure est étroite, et que le flux dans l'air ait à peu près la même section que dans le fer, la réluctance est égale à celle du fer plus celle de l'air :

$$\text{réluctance totale} = \frac{l-l'}{\mu's} + \frac{l'}{s}$$

l' étant la largeur de la coupure et μ' étant la nouvelle valeur de la perméabilité du fer, car elle a changé puisque le flux, et par suite l'induction, a changé.

$$\text{Dans le premier cas, le flux } \Phi = \frac{1,25 Ni}{\frac{l}{\mu S}} \quad (1)$$

et après coupure :

$$\Phi' = \frac{1,25 Ni}{\frac{l-l'}{\mu'S} + \bar{S}} \quad (2)$$

Si l'on connaît Φ , il semble qu'on peut calculer Φ' le nouveau flux après coupure ; mais une grosse difficulté se présente : on ne connaît pas μ' qui dépend précisément de Φ' que l'on cherche. On voit que le problème, qui serait extrêmement simple dans le cas d'un courant électrique, est ici très complexe et ne peut être résolu que grossièrement (voir exercices). Mais ce problème ne présente pas, en général, un intérêt pratique. Il suffit de voir, sans calcul, que Φ' est notablement plus petit que Φ même pour une petite largeur l' de la coupure, car le terme $\frac{l'}{\bar{S}}$ est relativement grand, à cause de la faible perméabilité de l'air.

Le problème qu'on doit résoudre se présente ordinairement d'une manière différente : on se donne l'induction et l'on demande le nombre des ampères-tours (ou la force magnétomotrice) qu'il faut réaliser pour l'obtenir (voy. exercices).

142. Conclusions pratiques. — Il résulte de ce qui précède que, pour obtenir des flux magnétiques intenses, il faut employer un circuit magnétique formé de métaux à grande perméabilité, rendre les entrefers aussi petits que le permet l'application que l'on se propose ; il faut en outre réduire la longueur du circuit et augmenter sa section. C'est ainsi que les électroaimants des dynamos modernes ont des formes larges et ramassées, tandis que dans les premières machines on utilisait des électros longs et étroits dont la réluctance est bien plus grande.

143. Généralisation. — Circuits imparfaits. — Extension des lois de Kirchhoff. — Le circuit magnétique est dit imparfait lorsqu'une partie du flux se répand dans le milieu extérieur. On donne à cette partie le nom de *flux perdu* ou de *flux de fuite*. Le milieu extérieur n'est plus assez *isolant* (grande réluctance) pour les lignes d'induction. On ne peut plus appliquer une loi analogue à la loi d'Ohm, puisqu'une partie du flux est *dérivée*

dans le milieu extérieur. L'expérience prouve que l'on peut appliquer les règles de Kirchoff établies dans le cas des courants dérivés (voy. 48) et que, de plus, la force magnétomotrice est toujours égale à $1,25Ni$ sans qu'il soit nécessaire que l'enroulement soit régulier et étendu à tout le circuit. Les résultats déduits de l'application de ces règles ne sont pas rigoureux (ils ne le sont que pour un anneau à enroulement régulier), mais ils sont suffisants au point de vue pratique.

144. **Exemple.** — Considérons un circuit hétérogène formé de quatre corps AB, BC, CD, DA (fig. 99) dont l'un DA peut être de l'air.

Soient $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}_3, \mathcal{R}_4$, les réluctances et supposons qu'il y ait deux systèmes de spires magnétisantes ayant N spires et un courant i et N' spires avec un courant i' ; et soient $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$, les flux qui circulent dans ces différentes parties (s'il n'y avait pas de pertes ou dérivations dans le milieu extérieur, ces quatre flux seraient égaux).

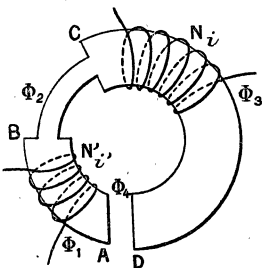


Fig. 99. — Circuit magnétique imparfait.

Rappelons que la deuxième règle de Kirchoff pour le circuit électrique est la suivante (48) :

Pour un circuit fermé quelconque, la somme algébrique des f. é. m. est égale à la somme algébrique des produits des résistances de chaque partie par l'intensité du courant qui la traverse.

De même nous pourrions admettre comme suffisamment exact que :

Si l'on parcourt un circuit magnétique fermé, la somme algébrique des forces magnétomotrices est égale à la somme algébrique des produits des réluctances de chaque partie par le flux qui la traverse.

Dans l'exemple précédent, nous avons deux forces magnétomotrices, $1,25Ni$ et $1,25N'i'$; si elles agissent dans le même sens pour produire le flux, on les ajoute; si elles agissaient en sens contraire, on affecterait du signe — celle qui tend à diminuer le flux. Supposons qu'elles agissent dans le même sens; on a :

$$(1) \quad 1,25Ni + 1,25N'i' = \mathcal{R}_1 \Phi_1 + \mathcal{R}_2 \Phi_2 + \mathcal{R}_3 \Phi_3 + \mathcal{R}_4 \Phi_4.$$

Dans le cas ordinaire des dynamos ou des électroaimants les bobines magnétisantes sont parcourues par le même courant, soit N le nombre

total des spires, le premier membre se réduit à $1,25Ni$ et l'équation devient :

$$(2) \quad 1,25Ni = \mathcal{R}_1 \Phi_1 + \mathcal{R}_2 \Phi_2 + \mathcal{R}_3 \Phi_3 + \mathcal{R}_4 \Phi_4.$$

Le problème à résoudre consiste à trouver le nombre total Ni des ampères-tours pour réaliser les flux donnés dans les réluctances également données.

Soient l_1 et S_1 la longueur moyenne et la section moyenne de la première partie AB; $l_2, S_2; l_3, S_3; l_4, S_4$; les quantités analogues pour les autres parties; $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ les perméabilités :

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 S_1}, \quad \mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 S_2}, \quad \mathcal{R}_3 = \frac{l_3}{\mu_3 S_3}, \quad \mathcal{R}_4 = \frac{l_4}{\mu_4 S_4}.$$

$$(3) \quad 1,25Ni = \frac{l_1 \Phi_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2 \Phi_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_3 \Phi_3}{\mu_3 S_3} + \frac{l_4 \Phi_4}{\mu_4 S_4}.$$

Or $\frac{\Phi_1}{S_1}$, quotient du flux par la section, n'est autre que ce que nous avons appelé l'induction B_1 :

$$\frac{\Phi_1}{S_1} = B_1; \quad \frac{\Phi_2}{S_2} = B_2; \quad \frac{\Phi_3}{S_3} = B_3; \quad \frac{\Phi_4}{S_4} = B_4.$$

L'équation devient, en divisant les deux membres par $1,25$:

$$(4) \quad Ni = \frac{l_1 B_1}{1,25 \mu_1} + \frac{l_2 B_2}{1,25 \mu_2} + \frac{l_3 B_3}{1,25 \mu_3} + \frac{l_4 B_4}{1,25 \mu_4}.$$

Or, nous avons vu (140) que pour entretenir une induction B_1 dans un circuit de perméabilité μ_1 il faut satisfaire à l'égalité :

$$B_1 = 1,25 n_1 i \mu_1$$

$n_1 i$ nombre d'ampères-tours spécifiques (par cm.).

De là on tire en posant $a_1 = n_1 i$:

$$a_1 = n_1 i = \frac{B_1}{1,25 \mu_1}.$$

On aurait de même :

$$a_2 = \frac{B_2}{1,25 \mu_2}, \quad a_3 = \frac{B_3}{1,25 \mu_3}, \quad a_4 = \frac{B_4}{1,25 \mu_4}.$$

Si on remplace dans l'équation (4) il vient :

$$Ni = l_1 a_1 + l_2 a_2 + l_3 a_3 + l_4 a_4.$$

Le nombre total des ampères-tours nécessaires (Ni) est égal à la somme des produits des longueurs (en cm) de chaque partie par

le nombre des ampères-tours indiqués au tableau ci-dessous qui contient le nombre des ampères-tours spécifiques nécessaires pour obtenir dans différents corps des inductions données.

Application numérique.

AB est du fer; $\Phi_1 = 320\,000^{\text{max}}$, $S_1 = 20^{\text{cm}^2}$, $B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = 16\,000^{\text{g}}$.

BC est de la fonte; $\Phi_2 = 80\,000^{\text{max}}$, $S_2 = 10^{\text{cm}^2}$, $B_2 = \frac{\Phi_2}{S_2} = 8000^{\text{g}}$.

CD est du fer; $\Phi_3 = 300\,000^{\text{max}}$, $S_3 = 20^{\text{cm}^2}$, $B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3} = 15\,000^{\text{g}}$.

DA est de l'air; $\Phi_4 = 160\,000^{\text{max}}$, $S_4 = 20^{\text{cm}^2}$, $B_4 = \frac{\Phi_4}{S_4} = 8000^{\text{g}}$.

Les longueurs étant : AB = 25^{cm}, BC = 30^{cm}, CD = 40^{cm}, DA = 2^{cm}.

On trouve en se servant du tableau :

$Ni = 25 \times 65 + 30 \times 51,6 + 40 \times 29,7 + 2 \times 6400 = 17161$ ampères-tours.

Tableau donnant le nombre des ampères-tours spécifiques nécessaires pour entretenir une induction donnée.

INDUCTIONS	AIR.	FONTE GRISE.	FER FORGÉ.	ACIER DOUX.	TOLES RECUITES.
1.000	800	1	0,27	0,24	0,16
2.000	1.600	2	0,52	0,45	0,32
3.000	2.400	3,6	0,80	0,68	0,49
4.000	3.200	5,6	1,05	0,90	0,65
5.000	4.000	8,6	1,36	1,15	0,88
6.000	4.800	13,8	1,65	1,40	1,12
7.000	5.600	27,2	2	1,70	1,35
8.000	6.400	51,6	2,4	2,06	1,64
9.000	7.200	82	2,9	2,43	2
10.000	8.000	120	3,6	3	2,47
11.000		165	4,6	3,76	3
12.000			6,3	4,76	5,80
13.000			9	6,4	5,10
14.000			138	8,4	7,10
15.000			29,7	18	12,5
16.000			65	52	35,6
17.000			112	98	81
18.000			173	160	139
19.000					211

REMARQUE. — Les nombres de ce tableau sont obtenus en multipliant par 0,8 (ou divisant par 1,25) les valeurs du champ du tableau de la page 154, puisque $H = 1,25 n_1 i$; $n_1 i = \frac{H}{1,25} = 0,8H$. Les nombres de la 2^e colonne sont obtenus en multipliant par 0,8 ceux de la 1^{re} colonne.

145. *Interprétation des attractions magnétiques. — Règles pratiques.* — On peut interpréter les attractions magnétiques et les forces qui s'exercent dans un système électromagnétique quelconque en se basant sur une remarque de Faraday, qui, matérialisant en quelque sorte les lignes de force du champ, les comparait à des fils élastiques tendus qui tendent toujours à se raccourcir.

1^{re} RÈGLE. — *Les mouvements qui se produisent dans un système électromagnétique, sont tels qu'il y ait diminution de la longueur des lignes de force.*

Ceci se vérifie aisément dans l'attraction d'un morceau de fer par un aimant : les lignes se raccourcissent jusqu'à ce qu'il y ait contact (ces lignes sont représentées fig. 78). Il serait facile de voir qu'il en est de même pour l'attraction qu'un électro exerce sur son armature. Dans ces expériences, on voit, surtout dans la dernière, que le déplacement a pour résultat la diminution de la réluctance du système, donc :

2^e RÈGLE. — *Dans le mouvement d'un système électromagnétique, la réluctance tend à prendre une valeur minima, de sorte que le flux tend à prendre une valeur maxima.*

REMARQUE. — Faraday expliquait les répulsions de pôles de même nom en admettant que les lignes de force voisines et de même sens tendent à s'écarter les unes des autres, c'est ainsi que cette répulsion des lignes de force (fig. 69) parties des deux pôles de même nom entraîne aussi la répulsion des pôles d'où elles partent.

ÉLECTROAIMANTS

146. *Définition. — Principales formes.* — Nous avons déjà dit qu'un *électroaimant* (ou simplement *électro*)

est un système formé d'un noyau de fer doux entouré plus ou moins complètement par des spires de fil de cuivre isolées dans lesquelles on peut faire passer un courant. Lorsque le courant passe, le fer est aimanté; si l'on supprime le courant, le fer perd *pratiquement* son aimantation. Les principales formes employées sont :

1° L'électroaimant droit (fig. 79).

2° L'électro en fer à cheval (fig. 100). Dans ce cas, ordinairement, on emploie deux bobines magnétisantes qui doivent être parcourues par le courant de façon que les extrémités soient des pôles de noms contraires — sens des aiguilles d'une montre pour l'observateur

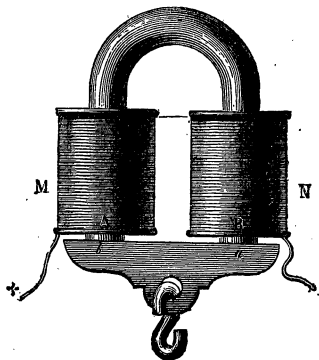


Fig. 100.
Électro en fer à cheval.

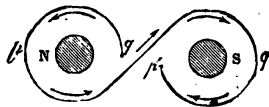


Fig. 101. — Sens du courant dans les bobines.

qui regarde le pôle sud, sens inverse pour le pôle nord (fig. 101).

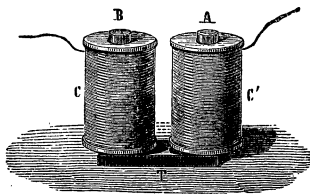


Fig. 102. — Électro à culasse.

3° L'électro à culasse dans lequel la partie courbe du précédent est remplacée par une culasse de fer (fig. 102).

4° L'électro en forme d'anneau (avec entrefer s'il y a lieu, fig. 97 et 98). Les induits des dynamos se rapprochent de ce type.

La forme et les dimensions à employer dépendent du but qu'on se propose; le calcul de ces dimensions se fait en appliquant les lois du circuit électrique

et celles du circuit magnétique. Dans certains cas, il y a lieu de tenir compte des phénomènes de self-induction qui seront étudiés plus loin. Prenons quelques exemples simples :

147. **Électro à force portante.** — Il est évident que la forme droite n'est pas avantageuse : elle ne permet d'utiliser qu'un seul pôle et, comme le circuit magnétique se ferme par l'air environnant, la réluctance est grande et l'induction peu élevée. On améliore cet électro en le *cuirassant*, c'est-à-dire en l'entourant d'une cuirasse de fer par laquelle les lignes d'induction vont d'un pôle à l'autre, ce qui diminue la réluctance comme dans modèle de la figure 96.

Mais on conçoit que l'électro en fer à cheval à noyaux courts et larges est bien plus avantageux. Pour fixer les dimensions à donner à l'appareil, on se donne l'induction qu'on se propose d'employer. $B=16\ 000$ est un nombre souvent adopté pour le fer, car au-dessus, comme le montre la courbe d'aimantation (fig. 95), il faut augmenter considérablement les ampères-tours pour gagner peu sur l'induction. Ayant admis $B=16\ 000$, on calcule la section des noyaux par la formule :

$$F_{\text{dynes}} = \frac{B^2 S_{\text{cm}^2}}{8\pi} \text{ d'où } S_{\text{cm}^2} = \frac{8\pi F_{\text{dynes}}}{B^2}$$

Il est évident qu'on prendra des noyaux aussi courts et aussi rapprochés que possible ; on est limité seulement par la condition de pouvoir loger les bobines magnétisantes.

Le calcul est assez complexe parce qu'il faut que le bobinage et l'intensité du courant soient tels que la chaleur dégagée par le passage du courant ne détériore pas l'isolant du fil ; on ne tolère guère des élévations de température supérieures à une cinquantaine de degrés. Le fil qui comprend plusieurs couches, est ordinairement enroulé sur une matière isolante, bois, fibre, etc., ou sur une bobine de cuivre recouverte d'un isolant.

Idée du calcul des noyaux et des bobines. — Considérons un électro (fig. 103) en fer forgé, dans lequel nous utiliserons une induction $B=16\ 000$ gauss. Chaque pôle portant 250 kg., on a, pour la sec-

tion des noyaux :

$$S^{cm^2} = \frac{8\pi F}{B^2} = \frac{8\pi \cdot 250 \times 981\,000^{dynes}}{16\,000^2}$$

Le calcul ne pouvant être qu'approché, on peut admettre que $8\pi = 25$ environ et remplacer 981 000 par 1 000 000.

$$S^{cm^2} = \frac{25 \times 250 \times 1\,000\,000}{256\,000\,000} = \frac{25 \times 250}{256} = 25^{cm^2} \text{ environ,}$$

ce qui entraîne un rayon égal à $\sqrt{\frac{25}{\pi}} = 2^{cm}8$ environ.

Nous prendrons 3 cm, c'est-à-dire un diamètre de 6 cm.

Nous donnerons un écart de 20 cm à la distance des axes des noyaux

et nous admettrons que le circuit magnétique n'a pas de fuites, c'est-à-dire que le flux reste tout entier dans le fer et qu'il conserve à *peu près* partout la même section 25 cm^2 .

La longueur de ce circuit est à *peu près* égale à la longueur de la ligne d'induction moyenne tracée sur la figure. Or, cette longueur est égale à :

2 fois l'écartement des noyaux
 $2 + 20 = 40\text{ cm}$;

+ 2 fois la longueur x de l'un des noyaux $2x$;

+ la longueur des 4 parties courbes A, B, D, E, estimons-la à 15.

Le problème consiste à trouver x en tenant compte de la source d'électricité dont on dispose et de la condition de loger les bobines magnétisantes. Ce problème se résout par tâtonnements. Supposons que nous donnions à x la valeur 15 cm, et calculons les ampères-tours nécessaires.

La longueur du circuit est $40 + 15 + 2 \times 15 = 85\text{ cm}$.

Or, le tableau de la page 168 indique que, pour entretenir une induction de $16\,000^{gauss}$ dans le fer, il faut 65 ampères-tours par centimètre de longueur, il faut donc un nombre total d'ampères-tours :

$$Ni = 65 \times 85 = 5525.$$

Nous pouvons obtenir ce nombre de différentes façons, suivant la source d'électricité.

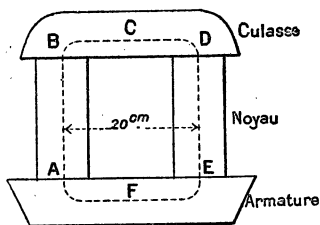


Fig. 103.

1^{er} CAS. — Supposons que nous nous donnions l'intensité du courant qu'on pourra régler par un rhéostat et soit 10^a cette intensité,

$$N \times 10 = 5525 \quad \text{d'où} \quad N = 553$$

et comme il y a deux bobines, il faudra 277 spires sur chaque bobine. Or, on admet, pour éviter un trop grand échauffement, qu'il y a lieu de prendre 1 à 2^a par mm² de section du fil, un courant de 10^a exige un fil d'environ 2^{mm}5 de diamètre, soit environ 5 mm., isolant compris.

Sur les 15 cm de noyau le fil n'occupera guère que 12 cm de longueur et nous pourrons mettre $12 : 0^{\text{cm}}3 = 40$ tours de fils. Avec 7 couches nous réaliserons 280 spires, ce qui correspond à peu près au nombre calculé.

Il est facile de voir qu'une longueur plus courte des noyaux ne serait guère pratique; car, en reprenant le calcul, on verrait qu'il faut employer un nombre trop grand de couches de fils, dans ce cas, la bobine s'échauffe trop. Il y aurait même avantage, dans notre problème, à donner aux noyaux une longueur supérieure à celle que nous avons adoptée : 20 cm par exemple.

2^o CAS. — On peut se donner la f. é. m. et la résistance intérieure de la source ainsi que la résistance de la ligne. On démontre, dans ce cas, que l'on obtient la plus grande puissance en donnant à l'électro une résistance égale à la somme des résistances de la ligne et de la source. Connaissant la f. é. m. et la résistance du circuit, on en déduit l'intensité du courant et l'on est ramené au problème précédent.

REMARQUE. — Supposons que l'électro soit formé de métaux différents : fonte pour la culasse, fer forgé pour les noyaux et l'armature.

L'induction adoptée étant 16 000 pour le fer et 8000 pour la fonte — pour des nombres plus élevés, l'entretien est trop coûteux — si nous supposons que le flux reste tout entier dans le métal, il faut donner à la culasse une section au moins double de celle des noyaux pour avoir le même flux avec une induction moitié moindre. Cette condition étant réalisée, il reste à chercher le nombre total des ampères-tours en essayant une certaine longueur, 20 cm par exemple, pour les noyaux. La section de ceux-ci est la même que plus haut, 25 cm².

La longueur du circuit dans le fer est égale à $2 \times 20 = 40$ cm pour les noyaux, 26 cm environ pour l'armature, en tout 66 cm. Dans la culasse en fonte, la longueur de la ligne moyenne d'induction est environ 30 cm.

Le tableau de la page 168 donne pour une induction 8000 dans la fonte 51,6^{a.t.} par cm, et pour 16 000 dans le fer 65^{a.t.}. Il faudra donc : nombre total d'ampères-tours, $Ni = 51,6 \times 30 + 65 \times 66 = 5838^{\text{a.t.}}$ à répartir sur les bobines, comme plus haut.

REMARQUE. — Les nombres obtenus dans les calculs précédents supposent que le flux reste tout entier dans le métal comme dans un anneau entouré d'une bobine; en réalité, il y a des pertes ou fuites de flux et les nombres doivent être majorés d'une quantité qui dépend de la forme des électros. Dans les électros de dynamos, cette majoration atteint 20 à 25 pour 100.

148. Attraction à distance. — Electro à noyau plongeur. — Lorsque l'on éloigne l'armature, la force attractive diminue très rapidement; parce que l'introduction d'un entrefer à grande réluctance diminue l'induction; avec des pôles un peu étroits, la force peut être réduite à $\frac{1}{10}$ de sa valeur à une distance de 1cm. Elle diminue moins vite avec de grandes surfaces polaires; et, dans ce cas, on peut utiliser des courses plus grandes de l'armature.

Mais, si l'on se propose d'avoir des courses de grande amplitude, avec une force qui reste grossièrement constante sur une certaine longueur, on emploie l'*électro à noyau plongeur ou électro à avalement*. Considérons une bobine creuse horizontale, parcourue par un courant assez intense, un noyau de fer présenté à l'ouverture est aspiré par la bobine et se place de façon que son milieu soit au milieu de la bobine — s'il est plus long que la bobine il dépasse d'une longueur égale de part et d'autre. — Cette position est celle pour laquelle la réluctance est minima. La course du noyau peut être assez longue, mais la force est faible. Pour l'augmenter, il suffit de mettre la bobine à l'intérieur d'une cuirasse de fer de façon que le circuit magnétique ait une faible réluctance, les lignes de force passant, à l'extérieur de la bobine, à travers la cuirasse plus perméable que l'air. On est ainsi conduit à l'*électro à noyau plongeur*, dont la forme est analogue à celle de la figure 96, très employée pour la manœuvre des aiguilles et des sémaphores sur les lignes de chemins de fer. On a imaginé un marteau-pilon basé sur ce

principe; les régulateurs de lampes à arc et de nombreux appareils de commande de machines sont faits avec des électros de ce genre. — On a réalisé, pour la manœuvre des aiguilles, des électros pouvant exercer un effort à peu près constant de 100 kg sur une longueur de 10 cm.

149. Autres types d'électros. — Nous étudierons plus loin les types usités dans les dynamos. Citons encore :

Les électros à champ puissant employés dans les laboratoires, avec lesquels on a réalisé, dans un espace assez restreint, des champs dépassant 50 000 gauss;

Les électros à action rapide, utilisés dans certains appareils de laboratoire et surtout dans la télégraphie. Pour que le déplacement de l'armature se fasse rapidement dans un sens ou dans l'autre, il faut réaliser un certain nombre de conditions que nous ne discuterons pas; en particulier, il faut établir un certain rapport entre le coefficient de self-induction (voy. ce mot) et la résistance des bobines. Les noyaux de fer sont choisis courts et assez larges, pour que le magnétisme rémanent disparaisse très rapidement et, en outre, on place dans les électros des récepteurs Morse une rondelle de cuivre entre les noyaux et la culasse pour augmenter la réluctance.

150. Applications des électroaimants. — Elles seront étudiées dans la suite : machines dynamos, alternateurs, etc. ; appareils divers de manœuvre à distance et transmission de signaux, télégraphe, etc.

EXERCICES

1. On considère un électro en forme d'anneau : la section est 4 cm^2 et la circonférence moyenne a pour rayon 10 cm : il porte 600 tours de fil. Quelle intensité de courant faut-il faire passer pour avoir un flux de 60 000 maxwells ?

Rep, 3,1.

Le problème peut se résoudre en utilisant le tableau de la page 168 ou en prenant la valeur de μ pour l'induction $\frac{60\,000}{4} = 15\,000$ dans le tableau de la page 154.

* 2. Même question si on pratique une fente de 1 cm de longueur sur l'anneau.

R. 25 ampères environ.

REMARQUE. — Le problème peut se résoudre en utilisant le tableau de la page 168 et la formule du n° 144. On peut aussi utiliser la formule du n° 141. On remarquera l'influence considérable d'un entrefer qui n'a cependant que 1 cm.

3. Un anneau de fer dont la section est 4 cm² et la circonférence moyenne 50 cm. est formé de deux moitiés d'anneaux mis en contact. Le système porte sur chaque moitié, une bobine de 400 tours de fil. Quelle intensité de courant faut-il faire passer dans les bobines pour que la force d'arrachement soit de 30 k. ?

Solution. — On cherche l'induction nécessaire :

$$\frac{30}{2} \times 981\,000 \text{ dynes} = \frac{B^2 \times 4}{8\pi},$$

$$B = 9700 \text{ environ.}$$

Ce nombre n'étant pas dans le tableau, on calcule approximativement en remarquant que pour 9000 il faut 2st,9 et pour 10000, 3st,6; il y a une augmentation de 0st,7 pour passer de 9000 à 10000, c'est-à-dire pour augmenter de 1000 gauss; pour augmenter de 700 gauss il faudra :

$$\frac{0,7 \times 700}{1000} = 0,5 \text{ environ.}$$

Le nombre des a-t sera donc 2,9 + 0,5 = 3,4.

Le reste de la question est facile à traiter, comme plus haut.

* 4. On donne le même anneau; dans l'une des bobines on fait passer un courant de 5 ampères; quel courant faut-il faire passer dans la seconde pour avoir la même force d'arrachement que plus haut? Sens de ce courant?

DÉPLACEMENT D'UN COURANT DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE TRAVAIL ÉLECTROMAGNÉTIQUE

151. *Action d'un champ magnétique sur une petite portion rectiligne de courant.* — *Règle des trois doigts.* — Nous avons déjà vu qu'un courant fermé possède les mêmes propriétés qu'un feuillet magnétique, c'est-à-dire qu'une lame d'acier mince aimantée dans le sens de son épaisseur; il résulte de là qu'un courant placé dans un champ magnétique est soumis à des forces qu'on appelle des forces électromagnétiques.

1^{re} Loi. — **Direction de la force.** — *Une petite portion rectiligne de courant, placée dans un champ magnétique, est soumise à une force perpendiculaire au plan déterminé par le courant et la direction du champ. Cette force est dirigée à la gauche de l'observateur d'Ampère qui regarde dans la direction des lignes de force.*

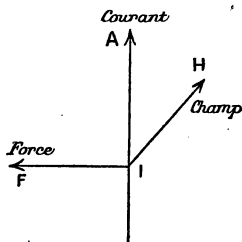


Fig. 104.
Règle des trois doigts.

On retrouve facilement cette direction en appliquant la règle des trois doigts (Fleming). Le pouce de la main droite représente le courant IA (fig. 104), l'index est dirigé suivant la ligne de force III et le

médius, replié à angle droit, donne la direction IF de la force.

Vérification expérimentale. — 1° Considérons un fil de cuivre AB (fig. 105) terminé en A par une boucle qui

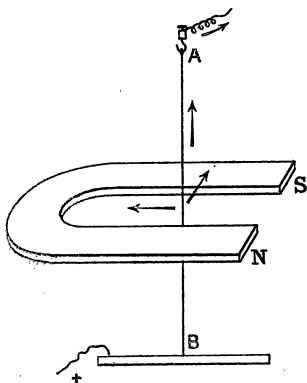


Fig. 105. — Action d'un champ magnétique sur un courant.

passé dans une autre boucle fixe reliée au pôle d'une source; l'extrémité B plonge dans une rigole contenant du mercure relié à l'autre pôle. On place les branches d'un aimant de part et d'autre du fil. Avec le sens du courant indiqué dans la figure, on voit le fil AB se déplacer vers la gauche. Si on change le sens du courant, le fil se relève vers la droite.

2° On peut prendre comme courant mobile le filament d'une lampe à incandescence; si on approche un aimant, on voit le filament lumineux se déplacer en suivant la règle précédente. Il en est de même d'un arc électrique (soufflage de l'arc).

152. Valeur de la force et du travail. — Règle de Faraday. — La grandeur de la force précédente est donnée par la formule suivante (formule de Laplace) :

$$F_{\text{dynes}} = \frac{1}{10} i_{\text{amp}} \times H_{\text{gauss}} \times l_{\text{cm}}$$

i est l'intensité du courant exprimée en ampères.

H — du champ — gauss.

l la longueur de l'élément.

Travail correspondant à un petit déplacement.

— Supposons que l'élément de courant AA' de longueur l , se déplace d'une longueur $OO' = a$ dans le sens de la force (fig. 106), le travail qui en résulte est égal au produit $F \times l$, on

a donc :

$$\text{travail (en ergs)} = F_{\text{dynes}} \times a^{\text{cm}} = \frac{1}{10} i^{\text{amp}} \times H_g \times l^{\text{cm}} \times a^{\text{cm}}.$$

Le produit $l \times a$ représente en cm^2 la surface du rectangle $ABA'B'$ et le produit de cette surface par H n'est autre que le flux de force à travers la surface du rectangle $ABA'B'$; on peut appeler ce flux, *le flux coupé par le courant dans son déplacement*, d'où l'énoncé suivant :

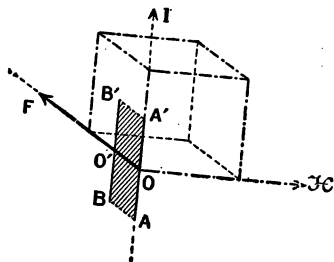


Fig. 106.

Travail électromagnétique.

Le travail produit par le déplacement d'une portion de courant dans un champ magnétique est égal au produit de l'intensité du courant par le flux de force coupé pendant le déplacement. Ce produit doit être divisé par 10 pour que le travail soit exprimé en ergs.

Si Φ est le flux coupé

$$W_{\text{ergs}} = \frac{1}{10} i^{\text{amp}} \Phi_{\text{amwells}} \quad (1)$$

Le joule, unité pratique de travail valant 10^7 ergs on aura,

$$W_{\text{joules}} = \frac{i^{\text{amp}} \Phi_{\text{max}}}{10^8} \quad (2)$$

Cette formule, que nous avons établie dans le cas le plus simple, est tout à fait générale, et s'applique dans tous les cas, le calcul de Φ pouvant être plus compliqué. Le résultat représenté par les formules (1) ou (2) est désigné sous le nom de règle de Faraday.

153. Règle du flux maximum ou règle de Maxwell. — Si l'on veut chercher l'action d'un champ magnétique sur un courant fermé, il faut décomposer le courant en un grand nombre d'éléments et chercher la résultante de toutes

les actions du champ sur ces éléments ; le calcul peut être extrêmement compliqué. Maxwell a démontré une règle comode qui permet de prévoir le sens du déplacement et le travail correspondant. Cette règle est d'ailleurs extrêmement générale et s'applique à tout système qui contient des aimants, des courants, des électros.

Dans un système électromagnétique quelconque, formé de courants, d'aimant, d'électroaimants, les déplacements qui se produisent tendent à augmenter le flux qui entre par les faces sud. Lorsque le flux total qui entre par les faces sud atteint sa valeur maxima, le système est en équilibre stable.

EXEMPLES. — Un barreau aimanté, mobile, s'oriente dans le champ terrestre de façon que le flux de force terrestre rentre par sa face sud et que le flux qui rentre par cette face soit le plus grand possible. Il en est de même d'un courant fermé ou d'un solénoïde mobile (voy. 125).

Si l'on approche un aimant d'un autre aimant mobile, ce dernier se déplace de façon que les lignes de force du premier entrent, en plus grand nombre possible, par le pôle sud du second. — On a donc, en regard, des pôles de noms contraires. — De même, avec un aimant et un solénoïde ou avec deux solénoïdes.

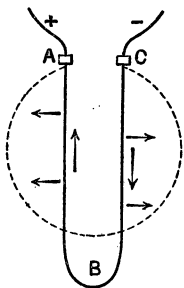


Fig. 107. — Sous l'action du champ, le fil flexible ABC prend la forme circulaire.

Un courant mobile, tel que celui de la figure 75, placé entre les branches d'un électro se déplace jusqu'à ce qu'il se soit mis en travers des lignes de force, le flux entrant par la face sud étant maximum. On pourra vérifier cette règle dans de nombreux cas particuliers.

Considérons encore un cas intéressant. Un fil de cuivre fin et flexible ABC (fig. 107) est parcouru par un courant ; on le place entre les pièces polaires assez larges d'un électro dont le pôle N est en avant de la figure, de sorte que les lignes de force soient dirigées d'avant en arrière. Les différentes parties du fil sont soumises

à des forces dont la direction est donnée par la règle des trois doigts. Si le champ est uniforme, le fil prend la forme d'un cercle de façon que le flux qui le traverse soit maximum (1). Cet exemple montre que la règle de Maxwell est une conséquence de celle des trois doigts.

Travail. — *Lorsqu'un circuit parcouru par un courant se déplace ou se déforme dans un champ magnétique en passant d'une position 1 dans laquelle le flux qui entre par sa face sud est Φ_1 , à une position 2 pour laquelle ce flux est Φ_2 , le travail produit a pour valeur :*

$$W_{\text{joules}} = \frac{i^{\text{amp}} \times (\Phi_2 - \Phi_1)_{\text{maxwells}}}{10^8} \quad (3)$$

Suivant les cas, il est plus facile d'appliquer la formule (3) que la formule (2); elles sont équivalentes.

154. **Action des courants sur les courants.** — Les lois précédentes permettent de trouver l'action d'un courant sur un autre courant : il suffit de considérer l'action que produit sur le deuxième courant le champ magnétique dû au premier. On retrouve ainsi les anciennes lois des courants parallèles et des courants angulaires.

1° *Deux courants parallèles s'attirent, s'ils sont de même sens; ils se repoussent s'ils sont de sens contraires.*

Le courant OA produit des lignes de force circulaires (fig. 108) en B, la direction du champ est celle de la tangente au cercle. Il est facile de voir que le courant BC, parallèle et de même sens que OA, est attiré par une force F. On voit aisément qu'il y aura répulsion si on change le sens de l'un des courants.

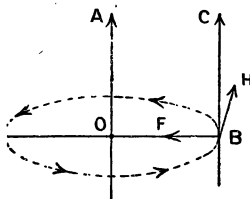


Fig. 108.

2° *Deux courants qui font entre eux un angle s'attirent s'ils s'approchent ou s'éloignent tous deux de leur point de croisement; ils se repoussent si l'un des deux se rapproche de ce point tandis que l'autre s'en éloigne.*

1. On sait que le cercle possède la surface maxima pour un périmètre donné.

On peut montrer aussi que cette loi est une conséquence des lois précédentes ; nous n'insisterons pas davantage, car cette loi n'a guère d'applications.

155. Rotations continues. — Pour obtenir des rotations continues d'aimants ou de courants, il faut employer des courants déformables, contenant des parties liquides ou des contacts glissants. Avec des courants rigides, on obtient une orientation, une position d'équilibre, mais pas de mouvements continus dans un champ fixe ; prenons un exemple simple :

Roue de Barlow. — Un disque de cuivre (fig. 109) est mobile autour d'un axe horizontal qui passe par son centre ; il plonge d'une très petite quantité dans une rigole DF contenant du mercure. Un aimant en fer à cheval a ses branches placées de part et d'autre du disque.

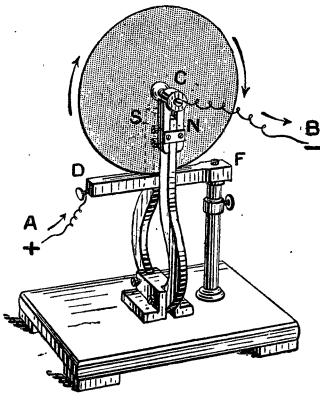


Fig. 109. — Roue de Barlow.

Le courant arrive par A, passe dans la roue et retourne à la pile par B. Il est ainsi dirigé du mercure vers le centre ; si N est un pôle nord, les lignes de force sont dirigées d'avant en arrière de la figure et la règle des trois doigts indique que la roue tourne dans le sens des aiguilles d'une montre.

Les principes précédents servent de base à l'étude des moteurs électriques : la roue de Barlow est le plus simple et le plus ancien de ces moteurs.

156. Exercice numérique. — *F. é. m. inversé d'un moteur.* — Une roue de Barlow de rayon 5cm est placée entre les pièces polaires d'un électroaimant, nous supposons ces pièces assez larges et assez rapprochées pour que le champ soit uniforme et égal à 4000 gauss. L'intensité du courant est 10^{a}

et le nombre de tours par seconde λ . Quel est le travail produit par seconde (ou puissance)?

Nous remarquons que, pour un tour, le flux coupé est égal au produit du champ par la surface de cercle de rayon 5cm .

$$\text{Flux coupé par tour} = 4000 \times 3,1416 \times 5^2.$$

Flux coupé par

$$\text{seconde} = 4000 \times 3,1416 \times 25 \times 4 = 1256640 \text{ maxw.}$$

$$\text{travail} = \frac{1,256,640 \times 10}{10^8} = 0 \text{ joule, } 125.$$

La puissance est donc $0 \text{ watt, } 125$ environ.

Ce travail est fourni par le courant et il a pour conséquence une *f. é. m. inverse* aux bornes du moteur. Nous avons vu (54) que la diff. de pot. aux bornes d'un récepteur mécanique est supérieure à celle qui correspond à la loi d'Ohm.

$$V = Ri + e$$

et la puissance dépensée par seconde est

$$P_{\text{watts}} = Ri^2 + ei.$$

Ri^2 correspond à l'énergie transformée en chaleur par effet Joule et ei correspond au travail mécanique produit par le moteur.

Dans notre exemple, $ei = e \text{ volts} \times 10^8 = 0 \text{ w, } 125$.

donc $e = 0 \text{ volt, } 0125$.

On peut généraliser ce résultat; si Φ désigne le flux coupé en 1 seconde, on a, pour la puissance du moteur :

$$P_{\text{watts}} = \frac{i^{\text{amp}} \times \Phi}{10^8} = e^{\text{v}} i^{\text{a}}.$$

Divisons par i , il vient :

$$e^{\text{volts}} = \frac{\Phi^{\text{maxw}}}{10^8}.$$

La f. é. m. inverse est égale au flux coupé par seconde divisé par 10^8 .

UNITÉS C.G.S. ÉLECTROMAGNÉTIQUES

157. — Les unités que nous avons employées jusqu'ici sont les *unités pratiques*; il est bon de montrer comment elles dérivent du système C.G.S. Il existe deux systèmes C.G.S. d'unités électriques: l'un, le *système électrostatique*, a pour point de départ la loi de Coulomb relative aux attractions et répulsions des corps électrisés, nous le laisserons de côté, ainsi que tout ce qui correspond à l'électricité statique. L'autre système est appelé *électromagnétique*, parce qu'il prend pour définir les unités la loi de Coulomb relative aux attractions et répulsions magnétiques et les lois de l'électromagnétisme.

Nous avons défini, dans ce qui précède, les unités suivantes du système électromagnétique.

L'unité de masse magnétique (voy. 113) : un pôle a une masse magnétique égale à 1 lorsqu'il exerce une force répulsive de 1 dyne sur un pôle égal placé à 1 cm.

Le gauss, unité de champ magnétique : un champ de 1 gauss exerce une force égale à 1 dyne sur un pôle égal à 1.

Le maxwell, unité de flux magnétique; c'est le flux produit par un champ de 1 gauss à travers 1^{cm²}.

L'unité C.G.S. d'intensité de courant se définit par la formule de Laplace dans laquelle le coefficient numérique est égal à 1 (au lieu de $\frac{1}{10}$).

$$F_{\text{dynes}} = i_{\text{(C.G.S.)}} H_{\text{gauss}} l_{\text{cm}}.$$

Cette unité est telle qu'un fil de 1 cm de longueur, parcouru par ce courant est soumis à une force de 1 dyne, dans un champ de 1 gauss (le fil est supposé perpendiculaire aux lignes de force).

L'unité C.G.S. d'intensité vaut 10 ampères, donc 1 ampère vaut $\frac{1}{10}$ (ou 10⁻¹) unité C.G.S.

L'unité C.G.S. de quantité d'électricité est la quantité débitée par un courant de 1 unité C.G.S. en 1 seconde; elle vaut 10 coulombs.

L'unité C.G.S. de f. é. m. est la f. é. m. d'un générateur qui produit un travail de 1 erg lorsqu'il débite une unité C.G.S. d'électricité. On démontre que l'unité pratique, le volt, vaut 10⁸ unités C.G.S. de f. é. m. (ou diff. de pot.)

L'unité C.G.S. de résistance est la résistance d'un con-

ducteur qui est parcouru par l'unité C.G.S. d'intensité lorsque la diff. de pot. à ses extrémités est égale à 1 unité C.G.S. On démontre que l'ohm, unité pratique, vaut 10^9 unités C.G.S. de résistance.

Nous n'insisterons pas davantage sur cette question purement théorique.

EXERCICES

1. Un fil rectiligne de 5 centimètres parcouru par un courant de 10 a., est placé perpendiculairement à un champ magnétique uniforme de 100 g. A quelle force est-il soumis?

Rep. 500 dynes.

2. Quel serait le travail produit par le courant ci-dessus pour un déplacement de 2 cm dans une direction parallèle au champ ou perpendiculaire au champ?

Rép. — Dans le premier cas le travail est nul, car il n'y a pas de flux coupé, le fil glissant le long des lignes de force. Dans le second cas,

R. = 1000 ergs.

3. Un cadre circulaire de 10 cm de rayon porte 20 spires de fil parcouru par un courant de 5 a. Ce cadre est d'abord maintenu dans le plan du méridien magnétique et il est suspendu par un fil de torsion négligeable. Qu'arrive-t-il si on l'abandonne à l'action du champ et quel est le travail produit par le déplacement? La composante du champ terrestre dans le sens horizontal est $0^s,2$.

Rép. $628^{\text{ergs}},52$.

4. Le même cadre, étant dans sa position d'équilibre, quel travail faut-il dépenser pour le faire tourner de $1/4$ de tour ou de $1/2$ tour?

Rép. — Pour $1/4$ de tour, le travail à dépenser est égal au travail moteur calculé à l'exercice précédent. Pour $1/2$ tour le travail est double.

5. Un moteur, dont la résistance est $0 \omega 5$, a une puissance de $1/2$ cheval-vapeur. Sachant qu'il est parcouru par un courant de 12^a , quelle est la diff. de pot. aux bornes?

R. $36^{\text{volts}},6$.

Solution :

$$\frac{1}{2} \text{ ch.} = \frac{736^{\text{watts}}}{2} = 368^{\text{w.}}$$

$$P^{\text{watts}} = Ri^2 + ei$$

Ri^2 est dû à l'effet Joule et $ei = 368$ w

$$e = \frac{368}{i} = \frac{368}{12}$$

$$V = Ri + e = 0,5 \times 12 + \frac{368}{12} = 56 \text{ volts, } 6.$$

* 6. Une bobine de section 4 cm^2 , portant 150 tours de fil parcouru par 2 a., est suspendue par un fil fin vers le milieu d'une grande et longue bobine portant 20 tours de fil par cm de longueur et parcourue par le même courant. Quelle est la position d'équilibre de la bobine mobile? Quel travail faut-il dépenser pour la faire tourner d'un demi-tour autour du fil de suspension?

CHAPITRE XII

MESURE DE L'INTENSITÉ, DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE ET DE LA PUISSANCE D'UN COURANT

158. *Méthodes employées pour mesurer l'intensité d'un courant.* — 1° **Électrolyse.** — Le poids d'hydrogène, d'argent ou de cuivre qui se forme à la cathode d'un voltamètre permet de calculer le nombre de coulombs qui ont traversé cet appareil (voy. 21, 22 et 65); le voltamètre peut donc servir de compteur d'électricité⁽¹⁾. Si le courant qui a traversé l'appareil est constant, son intensité s'obtient en divisant la quantité d'électricité par le temps exprimé en secondes. Cette méthode, trop longue et qui exige un courant constant, n'est pas usitée.

2° **Allongement d'un fil sous l'action de la chaleur dégagée par le courant qui le traverse.** — La chaleur dégagée ne dépendant pas du sens du courant, un fil s'échauffe et, par suite, s'allonge quand il est parcouru par un courant continu ou par des courants alternatifs. *L'ampèremètre thermique* utilisé pour les courants alternatifs est basé sur cette méthode.

3° **Déplacement d'un aimant dans un champ magnétique produit par le courant;** c'est le principe du galvanomètre ou ampèremètre à aimant mobile — qui ne servent que pour les courants continus.

4° **Déplacement d'un cadre parcouru par le courant à mesurer dans un champ magnétique produit par un aimant;** c'est le principe des appareils à cadre mobile utilisés pour les courants continus.

1. Les compteurs industriels ordinaires sont des compteurs d'énergie (voy. chap. XXVI).

5° **Déplacement d'un cadre parcouru par le courant à mesurer dans un champ magnétique produit par une bobine parcourue par le même courant;** c'est le principe de l'*électrodynamomètre* qui peut servir pour les courants alternatifs et qu'on transforme facilement en *wattmètre*.

6° **Emploi du fer doux.** — On peut remplacer l'aimant mobile par du fer doux qui s'oriente sous l'action du champ (ampèremètre à palette) ou remplacer l'aimant fixe des ampèremètres à cadre mobile par un électro excité par le courant; ces appareils peu précis, à cause de l'hystérésis, peuvent servir pour les courants alternatifs.

Nous donnerons seulement le principe des galvanomètres de laboratoire (1) et nous décrirons quelques ampèremètres industriels usuels.

159. Principe des appareils à aimant mobile. —

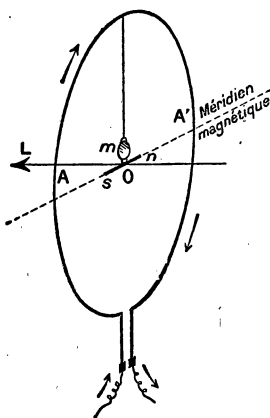


Fig. 110. — Principe du galvanomètre à aimant mobile.

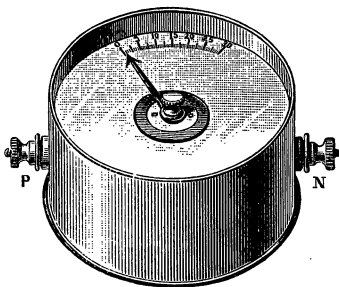
Considérons une aiguille aimantée *ns* (fig. 110) suspendue par un fil très fin au centre d'un cadre dans lequel on peut faire passer le courant à mesurer; le plan du cadre et l'aiguille sont d'abord orientés dans le plan du méridien magnétique. Si l'on fait passer le courant, il produit un champ dont les lignes de force sont, au voisinage du centre du cadre, à peu près perpendiculaires à celui-ci. L'aiguille est donc déviée d'un certain angle qui dépend de l'intensité du courant. Dans les appareils de laboratoire, on mesure cette déviation par une méthode optique. Certains galvanomètres de Lord Kelvin permettent d'ap-

précier des courants plus petits que $\frac{1}{1\ 000\ 000\ 000}$ d'ampère.

160. **Ampèremètre Carpentier.** — Les galvanomètres de précision ne portent pas de graduation, ils servent surtout

1. Voy. *Physique*, 3^e année.

pour reconnaître l'existence d'un courant ⁽¹⁾; les appareils industriels, qui sont gradués en ampères, sont appelés *ampèremètres*. L'aspect extérieur de ces appareils, qui doivent être portatifs et robustes, est celui d'une boîte, souvent circulaire, qui porte sur une de ses faces une graduation en ampères et une aiguille qui se déplace sur cette graduation. Deux bornes servent à fixer les fils conducteurs (fig. 111).



Un des modèles les plus anciens est celui de Carpentier dont le principe est analogue à celui du galvanomètre à aimant mobile.

Deux aimants AB et A'B' créent un champ magnétique qui dirige un petit barreau de fer doux *ab*, monté sur pivot, dans la direction de leurs pôles. Le courant à mesurer passe dans les bobines C et D; il dévie le barreau *ab* qui est solidaire de l'aiguille dont les déplacements se lisent sur le cadran extérieur.

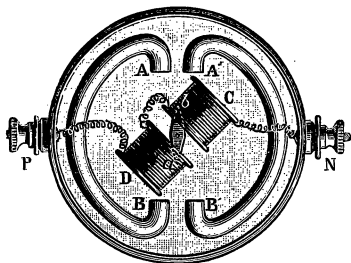


Fig. 111.
Ampèremètre Carpentier.

Cet appareil a généralement une faible résistance, de sorte que, introduit dans le circuit parcouru par le courant à mesurer, il ne modifie pas la résistance d'une manière appréciable et le courant conserve sa valeur.

Les divisions de la graduation ne sont pas égales, elles sont obtenues en comparant l'instrument à un ampèremètre étalon qui reste chez le constructeur. La graduation de l'ampèremètre étalon est ordinairement vérifiée par une expérience d'électrolyse

1. Ce sont, plutôt, des galvanoscopes très sensibles.

dans laquelle on fait passer le même courant, produit par des accumulateurs, dans l'ampèremètre et dans un voltamètre.

On maintient le courant constant, assez longtemps, à l'aide d'un rhéostat.

L'ampèremètre Carpentier est *apériodique* ⁽¹⁾, c'est-à-dire que son aiguille se fixe rapidement sur la division qu'on doit lire et sans exécuter, autour de cette division, une série d'oscillations qui rendraient les lectures très longues.

La graduation de cet appareil doit être vérifiée assez souvent à cause de la diminution du magnétisme des aimants AB et A'B'. Il est évident que l'appareil ne peut servir que pour les courants continus; car la déviation de l'aiguille change de sens avec le sens du courant; aussi, pour attacher les fils, il faut tenir

compte des signes + et — marqués aux bornes.

161. Principe du galvanomètre à cadre mobile Deprez et d'Arsonval. — Cet instrument est très répandu dans les laboratoires industriels;

il est employé pour la mesure des résistances et, dans ce cas, il porte un petit miroir pour observer les déviations par la méthode optique ⁽²⁾. Il présente l'avantage d'être apériodique (160).

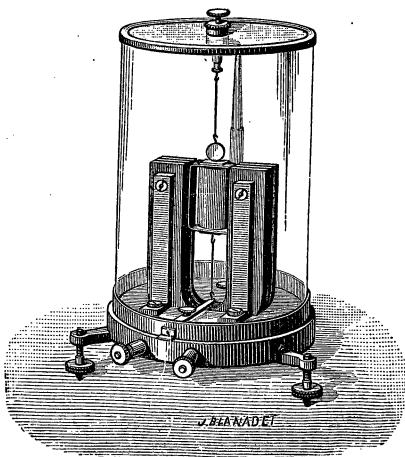


Fig. 112.
Galvanomètre Deprez et d'Arsonval.

Il se compose d'un aimant en fer à cheval (fig. 112 et 113)

1. Apériodique veut dire : qui n'a pas de période d'oscillation.

2. Voyez *Physique*, 3^e année, page 112.

entre les branches duquel se trouve un cadre parcouru par le courant. Ce cadre est fixé à deux fils verticaux placés dans le prolongement l'un de l'autre, ces fils servent pour l'admission du courant — ordinairement, le fil supérieur est double, suspension bifilaire. — Le champ magnétique est augmenté par un cylindre de fer doux F qui laisse au cadre juste l'entrefer suffisant à son déplacement. Lorsque le courant passe, le cadre tend à se mettre perpendiculairement aux lignes de force. Le sens de la rotation est facile à voir par l'application de la règle des trois doigts : le côté gauche du cadre vient en avant de la figure 113; mais la torsion du fil tend à le ramener dans sa position primitive (celle de la figure) : on a donc une déviation plus ou moins grande, suivant l'intensité du courant.

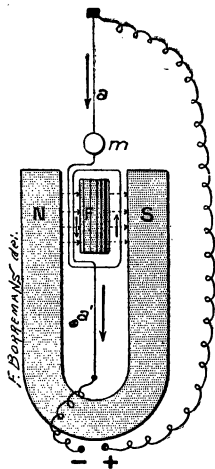


Fig. 113. — Principe du galvanomètre De- prez et d'Arsonval.

162. **Ampèremètres à cadre mobile.** — Ce sont des instruments portatifs basés sur le même principe que l'appareil précédent.

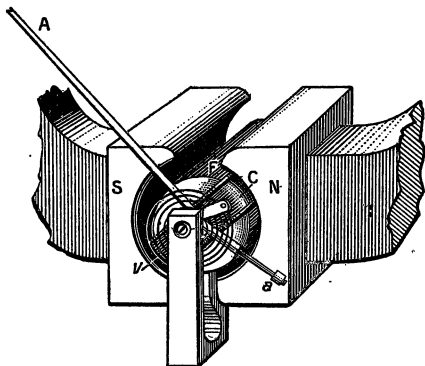


Fig. 114. — Ampèremètre à cadre mobile.

La figure 114 représente la partie essentielle de l'un de ces appareils. N et S sont les pôles d'un aimant puissant en forme d'anneau (dont on n'a représenté qu'une faible partie); entre N et S se trouve un

cyindre de fer doux F et dans l'entrefer se meut un cadre C parcouru par le courant. Celui-ci est amené par deux ressorts spiraux qui remplacent les fils de suspension a et a' de la figure 113 (un seul de ces spiraux v est représenté en avant de la figure, l'autre est à l'arrière). Lorsque le courant passe, le cadre C est dévié d'un certain angle qui est indiqué par l'extrémité A d'une aiguille.

Ces instruments sont gradués comme les ampèremètres à bobines fixes (160).

Le fil de ces appareils est assez fin et ne peut supporter que des courants d'intensité faible, ne dépassant pas $\frac{1}{20}$ d'ampère; de sorte que, pour la mesure des courants industriels qui sont supérieurs à cette quantité, on fait toujours usage d'un *shunt*. Nous avons expliqué au n° 45 le principe et la disposition de cet appareil de *réduction*, dans le cas des galvanomètres. Le shunt des ampèremètres, qui a une très petite résistance, est formé d'une lame de maillechort dont la résistance est réglée en y faisant de petites encoches. Avec un jeu de shunts, on peut mesurer, avec le même appareil, des intensités très différentes. La graduation porte ordinairement 100 divisions et ces divisions indiquent des ampères lorsqu'on fait usage du shunt sur lequel est inscrit le nombre 100 ampères. Avec le shunt sur lequel est marqué 1000 ampères, chaque division vaut $\frac{1000}{100} = 10$ am-

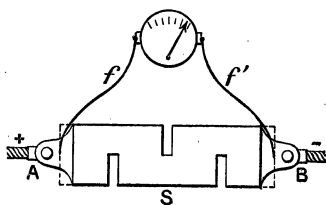


Fig. 115.

Shunt des ampèremètres.

pères. Si l'on prenait le shunt sur lequel est marqué 10^a, chaque division vaudrait $\frac{10}{100} = \frac{1}{10}$ d'ampère.

La figure 115 montre la disposition d'un shunt; elle indique aussi le montage de l'ampèremètre muni de son shunt. Le courant arrive par A sort par B, le shunt S est en série et l'ampèremètre, en

dérivation sur son shunt. Les fils f et f' ont une résistance déterminée, *il ne faut pas les remplacer par d'autres, car leur résistance est déterminée.*

163. Voltmètres. — Les voltmètres servent à mesurer la diff. de pot. entre deux points et, en particulier, la f. é. m. d'un générateur. On transforme un ampèremètre quelconque en voltmètre en donnant à cet instrument une très grande résistance — plusieurs milliers d'ohms. — *Le voltmètre est monté en dérivation entre les deux points dont on veut mesurer la diff. de pot., tandis que l'ampèremètre se monte en série de façon à être traversé par tout le courant.*

La figure 116 montre cette disposition : la résistance de l'ampèremètre étant petite, il ne change pas sensiblement la résistance totale du circuit et, par suite, ne modifie pas l'intensité qu'il doit mesurer. Le courant qui arrive en A se partage en deux parties qui sont inversement proportionnelles aux résistances (43), la

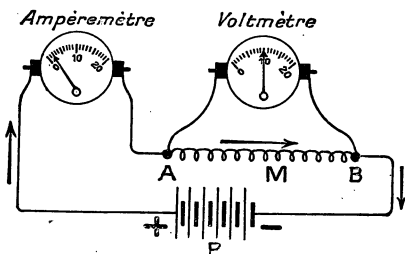


Fig. 116. — Montage d'un ampèremètre et d'un voltmètre.

portion qui passe dans le voltmètre, dont la résistance est très grande par rapport à celle de AB, est très faible et ne modifie pas d'une manière appréciable le courant dans AB. Il reste à montrer comment cet ampèremètre à grande résistance peut mesurer une diff. de pot.

Soit e la diff. de pot. entre A et B, le courant très faible qui traverse l'appareil a pour valeur $i = \frac{e}{R}$, d'où $e = Ri$ (R résistance du voltmètre). L'instrument mesure en réalité les valeurs de i , mais au lieu d'inscrire cette valeur, on peut inscrire les produits de i par la résistance R et l'appareil est gradué pour mesurer les valeurs de e , diff. de pot. entre A et B.

INSTRUMENTS POUVANT SERVIR POUR LES COURANTS
ALTERNATIFS

164. *Instruments à fer doux.* — Les appareils étudiés plus haut sont *polarisés*, c'est-à-dire qu'ils doivent être parcourus par un courant qui a toujours le même sens — courant continu — et leurs bornes portent les signes + et — ; si on les fait traverser par des courants alternatifs, c'est-à-dire par des courants qui changent de sens, un certain nombre de fois par seconde, leur aiguille oscille de part et d'autre du zéro si le nombre de changements de sens par seconde n'est pas trop grand ; si ce nombre est considérable, l'aiguille reste sensiblement immobile au zéro (voy. 255).

Il existe des appareils *non polarisés* dont la déviation est toujours dans le même sens quel que soit le sens du courant, ces appareils peuvent donc servir à la mesure des courants alternatifs, et aussi à celle des courants continus.

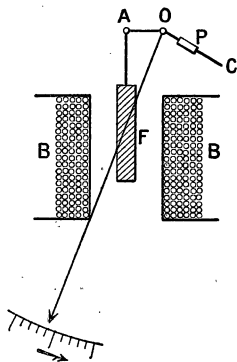


Fig. 117. — Principe des appareils à noyau plongeur.

Ampèremètre ou voltmètre à noyau plongeur. — Une tige de fer doux, placée à l'ouverture d'une bobine, est attirée vers l'intérieur de cette bobine quel que soit le sens du courant. La figure 117 montre le principe d'un ampèremètre basé sur cette propriété. La bobine B est parcourue par le courant à mesurer, un noyau de fer doux F est fixé à l'extrémité d'une tige qui tire sur l'extrémité A d'un levier AOC mobile autour de O ; un contrepoids P équilibre le système.

Lorsque le courant passe dans la bobine le fer doux descend et une aiguille OI se déplace sur un cadran divisé. On gradue en

comparant à un ampèremètre étalon. L'appareil doit être placé verticalement puisque la position d'équilibre est réglée par le poids des différentes pièces. Dans certains modèles le contre-poids P est remplacé par un ressort.

Si l'on donne une très grande résistance à la bobine, l'appareil peut servir de voltmètre.

Ampèremètre et voltmètre à palettes de fer doux.

— A l'intérieur d'une bobine B, représentée par un seul tour de fil (fig. 118), on place une lame de fer doux fixe P, une autre lame A, également en fer doux, est fixée à un axe qui est placé suivant l'axe de la bobine. Lorsque le courant passe, les deux lames s'aimantent, mais avec des pôles de même nom en regard, la lame P repousse donc la lame A qui communique son mouvement à une aiguille OI. Un ressort spiral agit pour ramener l'aiguille au zéro.

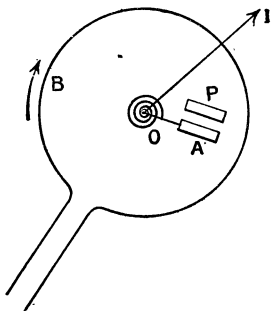


Fig. 118. — Principes des instruments à palettes de fer doux.

Les instruments à fer doux sont peu coûteux, mais ils ne sont pas très précis à cause de l'hystérésis et du magnétisme rémanent (voy. 264).

165. Ampèremètre et voltmètre thermiques. —

Ils sont basés sur la dilatation qu'éprouve un fil métallique lorsqu'il est parcouru par un courant qui élève sa température. Les allongements étant faibles, les appareils sont disposés de façon à amplifier les dilatations. La figure 119 représente le principe de l'ampèremètre Hartmann et Braun, très répandu. Un fil fin AMB, formé par un alliage platine-argent, est fixé aux bornes A et B. Lorsque le courant passe, le fil s'allonge et prend la forme de la figure, parce qu'il est tiré en son milieu par un fil fin en laiton MOC, fixé en C et dont le point O est attaché à un fil de soie tendu par un ressort R. Lorsque le courant passe, les fils prennent la forme représentée dans la figure et le fil de

soie produit la rotation d'une poulie P qui porte l'aiguille. Le

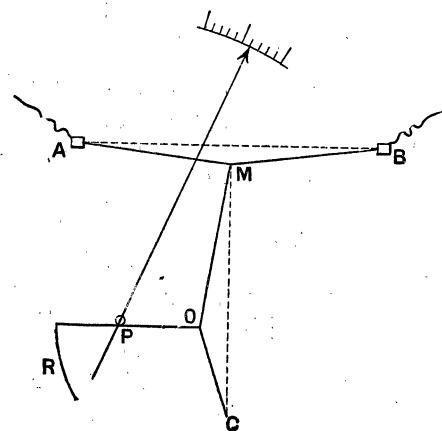


Fig. 119.

Principe de l'ampèremètre thermique.

sens de la déviation ne dépend pas, évidemment, du sens du courant.

L'appareil est gradué par comparaison avec un ampèremètre ordinaire. Nous verrons qu'il est très employé dans le cas des courants alternatifs et qu'il mesure ce que nous appellerons *l'intensité efficace*. Il suffit de le réunir

à une grande résistance pour le transformer en voltmètre thermique. — Le fil dilatable étant très fin, on emploie toujours ces appareils avec un shunt.

166. **Principe de l'électrodynamomètre.** — Cet appareil se compose de deux bobines, l'une fixe B (fig. 120) ; l'autre mobile *b*, suspendue par un fil à l'intérieur de la première. Les fils de suspension servent à amener le courant dans *b* comme dans le cadre d'un galvanomètre Deprez et d'Arsonval. Lorsqu'un courant *i* traverse la bobine B, il se produit à son intérieur un champ magnétique proportionnel à *i*. Si la bobine *b* est parcourue par un autre courant *i'*, elle est déviée dans ce champ et elle tend

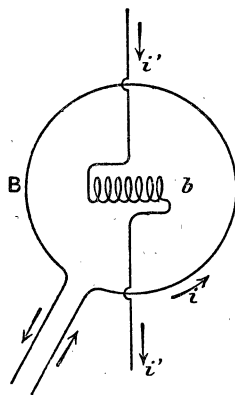


Fig. 120. — Principe de l'électrodynamomètre.

à se placer dans la même direction que la bobine B — pour que le flux maximum entre par sa face sud — mais la déviation est limitée par la torsion des fils de suspension. La déviation qu'on peut mesurer est proportionnelle à i et à i' et, par suite, au produit $i \times i'$.

Si l'on fait passer le même courant i dans les deux bobines, la déviation est proportionnelle à $i \times i = i^2$ et, par suite, elle ne dépend pas du sens du courant. Cet appareil peut servir à la mesure des courants alternatifs.

167. Principe du wattmètre. — Le wattmètre sert à mesurer la puissance d'un courant entre deux points A et B, c'est-à-dire l'énergie que le courant apporte par seconde entre ces deux points. On sait que cette puissance a pour valeur $P_{\text{watts}} = e_{\text{volts}} \times i_{\text{amp.}}$ e étant la diff. de pot. entre A et B et i l'intensité du courant. On peut donc évaluer P en mesurant i à l'aide d'un ampèremètre et e à l'aide d'un voltmètre. Le *wattmètre* est un instrument unique qui donne, par une seule lecture, la puissance P .

Considérons un électrodynamomètre dont la bobine B est à gros fil et à faible résistance, on la met en série dans le circuit, elle est parcourue par le courant i . La bobine b est à fil fin et à très grande résistance, on réunit ses bornes aux points A et B; elle joue ainsi le rôle d'une bobine de voltmètre et elle est traversée par un faible courant i' proportionnelle à la diff. de pot. e entre A et B. La déviation est donc proportionnelle au produit $e \times i$ et, par suite, à la puissance P^w .

CHAPITRE XIII

INDUCTION

168. **Définition.** — On appelle *courants d'induction* des courants qui prennent naissance dans les conducteurs lorsqu'on fait varier le flux magnétique qui les traverse. Ces courants ont été découverts par Faraday (1831) ; leur importance est capitale, car ce sont à peu près les seuls employés dans l'industrie, parce qu'ils permettent de transformer simplement l'énergie mécanique en énergie électrique.

Nous allons étudier d'abord les lois qualitatives de l'induction dans le cas d'un conducteur linéaire qui forme un circuit fermé (spire de fil, bobine, etc.). Nous dirons ensuite quelques mots sur d'autres cas.

169. **Lois qualitatives et sens du courant induit dans le cas d'un circuit fermé.** — 1° *Toute variation du flux magnétique qui traverse un circuit conducteur fermé détermine dans ce circuit un courant électrique dont la durée est la même que celle de la variation.* Si le flux qui traverse le circuit reste constant, il n'y a pas de courant. Au courant induit ainsi produit correspond une certaine f. é. m. appelée *f. é. m. d'induction* qui a pour cause la variation du flux magnétique.

2° **Loi de Lenz, sens du courant, règle de Maxwell.** — *Le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose à la variation de flux que l'on veut produire.*

Pour appliquer cette loi, et trouver le sens du courant induit, il est commode d'appliquer *la règle du tire-bouchon de Maxwell* qui permet de définir, facilement, un sens. Considérons

un tire-bouchon T (fig. 121) et un circuit C traversé par un flux dont on a représenté les lignes de force; on appelle *sens direct*

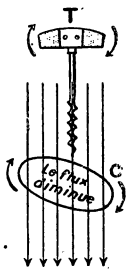


Fig. 121.

ou positif le sens dans lequel on tourne le tire-bouchon pour qu'il s'enfonce dans le sens des lignes de force et *sens inverse* ou négatif le sens opposé au précédent.

Si, par un moyen quelconque, on fait diminuer le flux qui traverse C, il se produit dans ce circuit un courant direct. En effet, ce courant produit des lignes de force (122) qui ont le même sens que celles

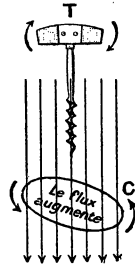


Fig. 122.

du champ, le flux qui résulte de ces lignes de force est de même sens que celui que l'on fait diminuer de sorte que, conformément à la loi de Lenz, le courant induit tend à s'opposer à la diminution du flux.

Inversement (fig. 122), si l'on augmente le flux à travers C, il se produit un courant induit inverse dont les lignes de force sont de sens opposées à celles du flux et tendent à diminuer ce flux que l'on veut augmenter.

170. **Vérifications.** — On peut trouver des vérifications très nombreuses des lois précédentes, car le flux magnétique peut avoir différentes causes : courants, aimants, électros, Terre ; on peut, de plus, produire les variations de diverses manières : dans tous les cas, les lois se vérifient. On devra faire usage d'un galvanomètre assez sensible, galvanomètre Deprez et d'Arsonval par exemple.

171. **Induction par un courant.** — 1° Prenons deux bobines A et B (fig. 123) ; B communique avec un galvanomètre et A avec une pile. La bobine B est la *bobine induite* ou *secondaire* et A la bobine *inductrice* ou *primaire*. Si nous introduisons A dans B, nous augmentons le flux qui traverse B (puisque A est un solénoïde et produit un flux magnétique) et il se produit dans la bobine B un courant inverse de celui de A,

de façon à créer un flux opposé à celui de A : c'est ce que montre le galvanomètre. Si on retire la bobine A, on obtient dans B un courant induit de même sens que celui de A.

2° Au lieu d'introduire A dans B, pendant que A est parcourue par le courant, supprimons l'un des fils et plaçons A, à

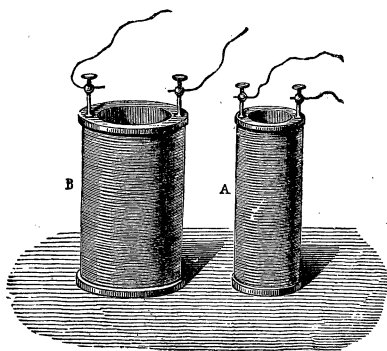


Fig. 123. — Induction par les courants.

poste fixe, dans B ; puis, fixons à la borne le fil qui ferme le courant inducteur, nous créons ainsi un champ magnétique qui détermine dans B un courant de sens inverse, tendant à diminuer le champ que l'on produit.

Inversement, si nous coupons le circuit inducteur, lorsque l'aiguille du galvanomètre est revenue au zéro, nous supprimons le champ de la bobine A et il se produit dans B un courant induit de même sens que celui que l'on supprime.

3° On obtiendrait des résultats analogues par des variations du courant inducteur : une augmentation d'intensité détermine dans B un courant inverse et une diminution, un courant direct ⁽¹⁾.

172. **Emploi d'un noyau de fer doux.** — Si nous introduisons dans A un noyau de fer doux, le flux d'induction dû à cette bobine se trouve fortement augmenté à cause de la perméabilité du fer, et les expériences du numéro précédent donnent, au galvanomètre, des impulsions beaucoup plus grandes. En particulier, lorsque la bobine A est à poste fixe dans B, les fermetures et ruptures du courant primaire déter-

1. On retrouve ainsi les anciennes lois de l'induction : tout courant qui commence, qui s'approche ou qui augmente d'intensité détermine dans un circuit voisin un courant de sens contraire à lui.

minent, dans la bobine secondaire, des courants de sens contraires; si les interruptions sont rapides, B donne des courants alternatifs : tel est le principe de la bobine d'induction (voy. 300).

173. **Induction par un aimant ou par un électro.** — Prenons une bobine creuse BB' recouverte de fil isolé (fig. 124), fin et long; cette bobine communique avec un galva-

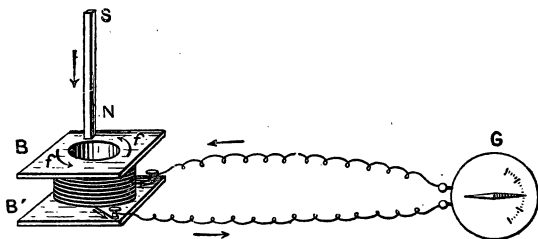


Fig. 124. — Induction par un aimant.

nomètre. Si nous approchons un aimant, et que nous l'introduisons dans la bobine, le galvanomètre indique, par un déplacement de son aiguille, qu'on a produit un courant. Si le pôle nord de l'aimant est en bas, les lignes de force sont dirigées de haut en bas et le courant induit (règle du tire-bouchon) est en sens inverse de celui des aiguilles d'une montre de façon à produire un flux de sens contraire dirigé de bas en haut.

Lorsqu'on retire l'aimant, le flux diminue, le courant est direct et de sens contraire au précédent.

Au lieu de déplacer l'aimant, on peut déplacer la bobine et laisser l'aimant fixe.

Les champs magnétiques produits par les électros étant plus intenses, on obtiendra des courants induits plus intenses aussi,

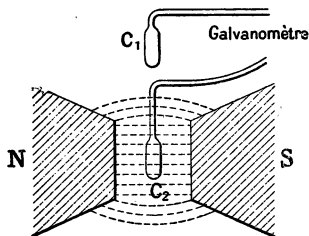


Fig. 125.

en déplaçant le circuit dans le champ d'un électro. Une simple spire de fil, en communication avec un galvanomètre, qu'on amène de la position C_1 (fig. 125) à la position C_2 donne une déviation au galvanomètre; le retour de C_2 à C_1 donne une déviation inverse. Avec une bobine plate, formée de plusieurs tours de fil, l'effet est plus grand, il serait encore augmenté si le fil était enroulé sur un noyau de fer doux.

174. Courant induit produit par rotation d'un cadre dans un champ magnétique. — Première idée des courants alternatifs. — La variation de flux à travers le circuit peut s'obtenir en faisant tourner dans le champ, autour

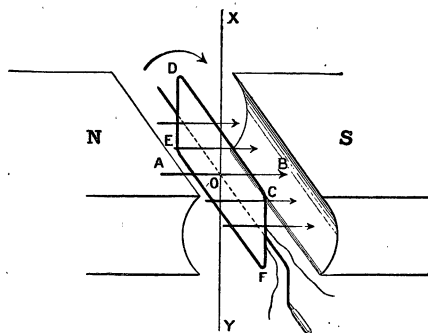


Fig. 126. — Courants induits alternatifs produits par rotation d'un cadre dans un champ magnétique.

d'un axe perpendiculaire aux lignes de force, un cadre sur lequel on a enroulé un fil conducteur. La figure 126 représente un cadre CDEF que l'on fait tourner entre les pôles d'un aimant ou d'un électro. Si l'on fait tourner le cadre d'une manière continue, il se produit des courants qui changent de

sens, dans le fil; deux fois par tour, chaque fois que le cadre passe par le plan perpendiculaire aux lignes de force. Il est facile de voir, qu'un peu avant la position de la figure, le flux qui traverse de gauche à droite, va en augmentant, le cadre est parcouru par un courant inverse (règle du tire-bouchon). Après le passage par la position de la figure, où le flux qui traverse est maximum, le flux diminue et le courant induit est direct. *Il y a donc changement de sens du courant induit pour les positions qui correspondent au maximum de flux.* Il n'y a d'ailleurs pas de changement de sens du courant lorsque le

cadre passe par la position où il est traversé par un flux nul (position horizontale dans le cas de la figure). En effet, le flux qui traverse le rectangle va bien augmenter lorsqu'on dépassera cette position, mais il entre par l'autre face, puisque la face qui regardait le pôle nord regarde ensuite le pôle sud, il en résulte que le sens du courant reste le même dans le rectangle.

Le cadre est donc parcouru par des courants qui changent de sens deux fois par tour, on dit que le cadre est parcouru par un *courant alternatif*; nous reviendrons, plus loin, sur les propriétés de ces courants. On peut *redresser* ce courant alternatif, c'est-à-dire le transformer en *courant continu* par des artifices mécaniques : tel est le principe de la machine Siemens qui sera étudiée plus loin.

REMARQUE. — On peut faire tourner le cadre dans le champ magnétique terrestre; les courants obtenus sont peu intenses, mais on peut les montrer avec un galvanomètre sensible à condition de prendre un cadre de surface un peu grande.

175. *Induction sur une portion de circuit.* — **Règle de Faraday.** — Les lois données plus haut se rapportent au circuit fermé tout entier; il peut être intéressant de savoir comment cet effet total se répartit sur les différentes parties du circuit.

Loi ou règle de Faraday. — *Toute portion de conducteur qui, dans son déplacement, coupe des lignes de force, est parcourue par un courant dont la grandeur dépend du flux magnétique coupé par cette portion du conducteur.*

Considérons un champ dont les lignes de force sont perpendiculaires au plan de la figure, si l'on déplace dans le plan de la figure une portion de conducteur, de AB en A'B' (fig. 127), ce conducteur coupe les lignes de force et il est parcouru par un courant. *Le flux coupé a pour valeur le flux qui traverse la surface AB A'B' décrite par AB dans son déplacement.*

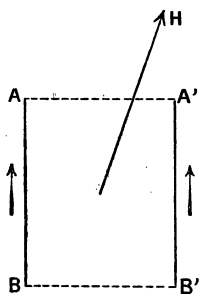


Fig. 127.

Sens du courant. — Règle des trois doigts. — Le sens du courant est fourni par la règle des trois doigts mais en *prenant la main gauche* (fig. 128). L'index est dirigé suivant les lignes de force, le médium suivant le déplacement et le pouce donne le sens du courant induit.

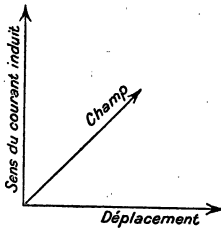


Fig. 128. — Sens du courant induit. Règle des trois doigts (main gauche).

Dans le cas de la figure 127, le courant va de B vers A.

176. **Remarque.** — Il est très important de rapprocher les lois de l'induction de celles qui ont été données pour le mouvement d'un courant dans un champ magnétique (voy. chap. XI); comme dans cette étude, on peut énoncer deux lois qui sont la conséquence l'une de l'autre : si l'on applique aux différentes portions d'un

circuit la loi du flux coupé on retrouve, pour le circuit entier, la loi donnée au n° 169 relative au flux qui traverse le circuit.

Suivant les cas, il y aura avantage à appliquer l'une ou l'autre de ces lois, qui sont équivalentes. Si nous considérons, par exemple, le rectangle CDEF de la figure 126, on remarque que les côtés horizontaux CD et EF sont seuls actifs pour la production du courant induit, car ils coupent les lignes de force dans leur mouvement. Les côtés ED et CF, qui se déplacent dans le plan des lignes de force, sont sans effet pour la production du courant induit.

177. **Cas d'un circuit ouvert.** — Si le circuit n'est pas fermé et qu'il y ait un flux coupé, il y a production d'une diff. de pot. entre les deux extrémités du conducteur : le flux peut être coupé soit par suite du déplacement relatif du circuit par rapport au champ magnétique, soit par variation du champ magnétique, c'est le cas de la *bobine d'induction*.

178. **Réversibilité des appareils électromagnétiques. — Généralité des phénomènes d'inductions.** — Le principe de la conservation de l'énergie permet de

prévoir l'existence des phénomènes d'induction et de trouver leurs lois quantitatives.

Considérons, par exemple, un circuit fermé parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique; nous savons qu'il se déplace sous l'action des forces électromagnétiques du champ de façon que le flux qui entre par la face sud soit maximum (153); pendant ce déplacement, le circuit fournit du travail (153) qui ne peut être produit sans une dépense équivalente d'énergie. Cette dépense d'énergie a pour conséquence, comme dans tout récepteur mécanique, la production d'une f. é. m. inverse qui n'est autre chose que la f. é. m. d'induction; cette f. é. m. d'induction résulte de l'augmentation du flux qui traverse le circuit pendant le déplacement.

Si, au contraire, au lieu d'abandonner le circuit mobile aux forces électromagnétiques, on le déplace, à la main, dans un sens opposé, c'est-à-dire dans le sens de la diminution du flux (à travers la face sud), il faut vaincre les forces électromagnétiques et, par suite, effectuer un travail. L'énergie que l'on fournit ainsi au système ne peut être perdue, elle a pour conséquence la production d'une f. é. m. (et par suite d'un courant) de même sens que celle qui produit le courant.

On voit donc que, *pour un circuit qui est déjà parcouru par un courant*, la production d'une f. é. m. d'induction inverse ou directe est une conséquence du principe de la conservation de l'énergie.

Mais ce principe n'exige pas qu'il en soit *nécessairement* de même pour un circuit qui est d'abord à l'état neutre, c'est-à-dire parcouru par aucun courant. C'est la découverte capitale de Faraday qui a montré que les conséquences nécessaires pour un circuit parcouru par un courant s'appliquent à un circuit neutre.

Il résulte de là, que *tous les appareils électromagnétiques qui ont donné lieu à des mouvements dans un champ magnétique sont réversibles*, c'est-à-dire que, si on les met en mouvement en dépensant du travail, ils fournissent un courant électrique par induction. Une roue de Barlow (156), que l'on fait tourner à la main, produit un courant que l'on peut cons-

tater avec un galvanomètre. Si l'on réunit les bornes d'un ampèremètre à celles d'un galvanomètre sensible et qu'on déplace l'aiguille de l'ampèremètre à la main, on obtient un courant indiqué par le galvanomètre.

Tous les moteurs électriques qui transforment l'énergie électrique en travail sont réversibles : si on les fait tourner en dépensant du travail, ils deviennent des machines productives d'électricité.

179. Lois quantitatives. — Il résulte de ce qui a été dit au numéro précédent, que :

1° *La f. é. m. d'induction, exprimée en volts, qui prend naissance dans un conducteur est égale à la variation du flux magnétique par seconde divisée par 10^8 .*

$$E_{\text{volts}} = \frac{(\Phi_2 - \Phi_1)_{\text{maxwels}}}{10^8, t^s} \quad (1)$$

E désigne la f. é. m., Φ_2 le flux dans la seconde position, Φ_1 le flux dans la première position, t la durée exprimée en secondes. — Dans le cas d'une portion de circuit, $\Phi_2 - \Phi_1$ représente le flux coupé pendant t^s .

2° Soit R^w la résistance du circuit supposé fermé, et i^{amp} l'intensité moyenne du courant pendant le temps t , on a

$$i^{\text{amp}} = \frac{E}{R} = \frac{(\Phi_2 - \Phi_1)_{\text{max}}}{10^8 t^s R^w} \quad (2)$$

3° La quantité d'électricité mise en jeu pendant t^s est :

$$Q_{\text{coulombs}} = i^a \times t^s = \frac{(\Phi_2 - \Phi_1)_{\text{max}}}{10^8 R^w} \quad (3)$$

180. Idée de la vérification expérimentale. — Il suffit de vérifier l'une quelconque des formules (1), (2) ou (3) puisqu'elles se déduisent facilement l'une de l'autre. Nous vérifierons la formule (3).

Pour mesurer une quantité d'électricité, nous nous servirons du galvanomètre (Deprez et d'Arsonval). Lorsqu'on envoie dans un galvanomètre un courant ou une décharge électrique de durée assez petite pour que l'aiguille n'ait pas le temps de se déplacer d'un angle

appréciable pendant la durée de la décharge (ceci aura lieu, par exemple, avec un galvanomètre dont l'aiguille a une durée d'oscillation propre de 5 à 10 secondes, si la durée de la décharge est égale ou inférieure à $\frac{1}{10}$ de seconde) l'aiguille est lancée dans une certaine direction, elle prend un écart maximum, puis revient au zéro, après un certain nombre d'oscillations. On démontre que *l'angle d'écart maximum est proportionnel à la quantité d'électricité* qui a traversé le cadre du galvanomètre. Lorsqu'on se sert du galvanomètre pour cet usage, on dit que le galvanomètre est employé comme *balistique*.

1° On prend un cadre sur lequel on a enroulé d'abord un seul tour de fil et on donne à celui-ci une longueur assez grande — on verra plus loin la raison. Le fil est réuni à un galvanomètre balistique. Le cadre est amené de la position C_1 (fig. 125) à la position C_2 et l'on note la déviation maximum de l'aiguille : soit α_1 . — En revenant de C_2 à C_1 on obtient, évidemment, une déviation égale et de sens opposé.

A l'aide du fil que l'on a en réserve, on fait un second tour sur le cadre, ce qui ne change pas la résistance totale du circuit. Le passage de la position C_1 à C_2 — positions que l'on a repérées avec soin — donne une déviation α_2 égale à $2 \alpha_1$. Avec 3, 4... tours de fil on aurait des déviations égales à $3 \alpha_1$, $4 \alpha_1$... Ce qui prouve que la quantité d'électricité induite est proportionnelle à la variation du flux magnétique.

2° On peut reprendre l'une quelconque des expériences précédentes en ajoutant des résistances dans le circuit ; la résistance totale de celui-ci, y compris celle du galvanomètre, étant connue, on vérifie, aisément, que *les écarts maxima et, par suite, les quantités d'électricité, sont bien en raison inverse de la résistance totale R , pour une même variation de flux*, conformément à la formule (3) qui se trouve ainsi démontrée expérimentalement

Quant au facteur 10^8 qu'il faut introduire au dénominateur pour que la quantité d'électricité soit exprimée en coulombs, nous n'indiquerons pas comment on peut le vérifier.

181. *Self-induction*. — Considérons une bobine A (fig. 129) qui fait partie d'un circuit contenant une pile P et un interrupteur M. Lorsqu'on abaisse M, la bobine est parcourue par le courant et il y a production d'un champ magnétique. Le flux qui correspond à ce champ traverse la bobine même qui le

produit de sorte que, pendant le temps (très court ordinairement) que le courant met à atteindre sa valeur, la bobine est traversée par un flux qui passe de zéro à une certaine

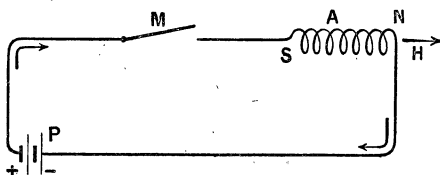


Fig. 129. — Self-induction.

valeur, ce flux croissant produit dans le circuit un courant induit inverse de celui que l'on se propose d'établir. Ce courant inverse qu'on appelle

extra-courant de fermeture a pour effet de retarder l'établissement du courant dans le circuit.

Inversement, lorsqu'on relève l'interrupteur, le flux magnétique dû au courant qui traverse le solénoïde A se trouve ramené à zéro; cette diminution du flux produit dans le circuit un courant induit appelé *extra-courant de rupture* de même sens que le courant que l'on supprime. La rupture dure généralement un temps très court, de sorte que la diminution du flux est très rapide et la f. é. m. qui correspond à l'extra-courant de rupture est considérable. Il résulte de là que, à la rupture, il y a toujours production d'une étincelle à l'interrupteur, tandis qu'avec les sources ordinaires à f. é. m. peu élevée, il n'y a pas d'étincelle à la fermeture (pour avoir une étincelle de 1 mm de longueur il faudrait une f. é. m. d'environ 5 000 volts).

Les effets d'induction d'un courant sur lui-même sont appelés phénomènes de *self-induction* (expression anglaise qui veut dire induction sur lui-même). Ces phénomènes jouent un rôle capital dans le cas des courants alternatifs.

La self-induction produit, à la fermeture, le même effet qu'une augmentation de résistance; à la rupture, l'effet peut être comparé à une diminution de la résistance.

Il est évident que les effets de self-induction sont à peu près nuls pour un fil rectiligne; ils prennent une certaine importance dans le cas d'une bobine et ils sont très intenses dans le

cas d'une bobine à noyau de fer doux ou électroaimant. On exprime aussi ces résultats de la façon suivante :

1° Un circuit composé de fils rectilignes est un circuit non inductif (sans self);

2° Un circuit qui contient une bobine, sans fer, est peu inductif;

3° Un circuit qui contient une bobine avec noyau de fer est très inductif.

On peut mettre en évidence ces phénomènes par différentes expériences .

1° Si l'on intercale un ampèremètre dans un circuit qui contient un puissant électro, muni de son armature, on constate qu'il faut un temps assez long — quelquefois plusieurs secondes — pour que l'aiguille marque l'intensité normale du courant. Si l'on enlève l'armature, le courant s'établit beaucoup plus vite car le flux magnétique créé est beaucoup plus faible, à cause de l'augmentation de la réluctance.

A la rupture, on obtient une étincelle très vive dans le premier cas, et moins vive si l'on a enlevé l'armature.

2° On installe un circuit comme le montre la figure 130; le courant de la pile se bifurque en A, une partie passe dans la lampe L, qui servira à manifester l'existence d'un courant, et l'autre dans un électro puissant E. Le circuit étant fermé, on règle le courant, à l'aide d'un rhéostat, de façon que la lampe soit à peine lumineuse. Si l'on vient à rompre le courant en C, la lampe prend, pendant un instant assez court, un très vif éclat dû à l'extra-courant de rupture qui la traverse.

Si l'on vient à fermer le circuit, la lampe brille également d'un éclat très vif. En effet, pendant la période d'établissement du courant, la résistance apparente de l'électro est beaucoup plus grande que sa résistance réelle de sorte que le courant, qui arrive en A, passe surtout dans la branche AB de faible résistance (loi des courants dérivés).

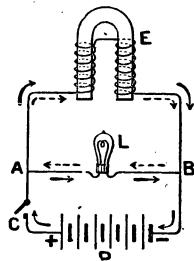


Fig. 130. — Expérience sur la self-induction.

182. Comparaison des effets de self-induction à ceux de l'inertie. — On peut comparer les phénomènes de self-induction à ceux qui se produisent dans une conduite d'eau. Lorsqu'on ouvre un robinet, le liquide ne prend pas tout de suite sa vitesse d'écoulement définitive et, inversement, si l'on ferme brusquement le robinet, le liquide qui est à une certaine distance de celui-ci ne s'arrête pas brusquement, il se produit un choc particulier (coup de bélier).

183. Coefficient de self-induction. — On appelle coefficient de self-induction d'un circuit, une grandeur égale au flux magnétique qui traverse ce circuit lorsqu'il est parcouru par un courant d'intensité égale à 10 ampères ⁽¹⁾.

Ce coefficient est tout à fait négligeable pour un circuit rectiligne, il ne prend une valeur appréciable que pour un circuit enroulé en solénoïde (bobine).

Considérons une bobine de longueur l , contenant N spires de fil et dont la section est S cm². Pour un courant d'intensité égale à 10^a, le champ, vers le milieu de la bobine, où les lignes de force sont parallèles a pour valeur :

$$H = 1,25 \frac{N}{l} \times 10 = 12,5 \frac{N}{l} \quad (1)$$

Le flux à travers une spire, si l'intérieur de la bobine est rempli d'air, est égal à HS et le flux total à travers N spires est

$$L = 12,5 \frac{N}{l} \times S \times N = 12,5 \frac{N^2}{l} S \quad (2)$$

d'après la définition, la quantité L est la valeur approchée du coefficient de self-induction — nous disons approchée, car vers les extrémités les lignes de force sont légèrement divergentes et le champ n'a plus exactement la même valeur.

La quantité L est de même espèce qu'une longueur, car c'est le quotient d'une surface S par une longueur l , les quantités 12,5 et N étant des nombres abstraits.

1. Le nombre 10 s'introduit ici parce que 10 ampères représentent l'unité d'intensité C. G. S. et que le coefficient de self est égal au flux pour une intensité égale à l'unité C. G. S. électromagnétique.

2. 12,5 est la valeur approchée de 4π .

L'unité pratique de self-induction est appelée **henry** (du nom du physicien américain); le henry équivaut à 10^9 cm (quart du méridien évalué en cm). Pour évaluer en henrys, il faut diviser le second membre de (2) par 10^9 .

Si la bobine est remplie par une substance magnétique : fer, fonte, acier... il faut multiplier le résultat précédent par la perméabilité μ . Mais il faut remarquer que, dans ce cas, le coefficient de self-induction n'est plus une quantité constante pour une bobine donnée; il dépend de l'intensité du courant, puisque μ dépend du champ.

Exemple de calcul. — 1° Évaluer le coefficient de self-induction d'une bobine de 20 cm de longueur sur laquelle il y a 1000 spires de fil (en plusieurs couches), la section moyenne étant 10 cm²

$$L_{\text{henrys}} = 12,5 \frac{1000^2}{20} \times 10^{-9} \times \frac{1}{10^9} = 12,5 \frac{10^6}{2 \cdot 10^9} = 0^h,00625.$$

2° Si la bobine est remplie de fer doux, le coefficient précédent est multiplié par la perméabilité et sa valeur dépend de l'intensité du courant. Supposons cette intensité égale à $\frac{1}{10}$ d'ampère, un calcul approché⁽¹⁾ montre que μ vaut environ 1800 et le coefficient de self est alors

$$0^h,00625 \times 1800 = 11^h,25 \text{ environ.}$$

Pour un courant plus intense, μ et, par suite, L seraient plus petits.

184. Bobines de self. — Bobines sans self. — On vend dans le commerce des bobines dont la self-induction est connue, comme on vend des boîtes de résistances ou des boîtes de poids. On peut, à l'aide de ces bobines étalonnées par une

1. Voici ce calcul : le champ H pour $i = \frac{1}{10}$ d'ampère est $H^e = 1,25 \frac{N}{l} \cdot i = 1,25 \times \frac{1000}{20} \times \frac{1}{10} = 1,25 \times 5 = 6,25$. Si on se reporte au tableau de la page 154, on trouve que $\mu = 1900$ pour $H = 5,77$ et 1530 pour $H = 7,85$. On peut supposer que dans cet intervalle, il y a proportionnalité et comme $6,25 - 5,77 = 0,48$, on dira : lorsque le champ croît de $7,85 - 5,77 = 2,08$, la perméabilité diminue de $1900 - 1530 = 370$. Lorsque le champ croît de 0,48, la perméabilité décroîtra de $\frac{370 \times 0,48}{2,08} = 85$ environ. La perméabilité sera donc $1900 - 85 = 1815$ et comme ces calculs sont peu précis on prendra $\mu = 1800$.

méthode qui présente une certaine analogie avec celle qui sert à mesurer les résistances, déterminer le coefficient de self d'une bobine quelconque. Cette méthode est préférable au calcul dans la plupart des cas.

On désigne sous le nom de bobine sans self (ou non inductive) une bobine dont le coefficient de self est nul. On réalise une telle

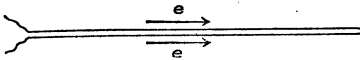


Fig. 131.

bobine en pliant le fil isolé au milieu de sa longueur de façon à former un fil double (fig. 131) que l'on enroule ensuite en hélice (voy. n° 50 et

fig. 31). Les spires qui se touchent étant parcourues en sens inverse par le courant, l'effet d'induction est nul. Les bobines des boîtes de résistances sont construites de cette manière : elles ont une certaine résistance et pas de self.

On désigne sous le nom de **bobines de self** des bobines dont la *résistance ohmique* est très petite et qui ont un coefficient de self important ; on les réalise en enroulant sur un noyau de fer doux un fil de cuivre isolé, assez gros pour que sa résistance soit très petite. Ces bobines sont employées dans les circuits alternatifs. On désigne aussi les bobines de self sous le nom de bobines de réactance et souvent le noyau de fer doux est mobile ; en l'enfonçant plus ou moins, on fait varier la self de la bobine (voy. courants alternatifs).

185. **Petites applications de la self-induction. — Allumeurs électriques.** — La self-induction joue un rôle très important dans les courants alternatifs. Comme petite application on peut citer les *allumeurs électriques* dans lesquels on utilise l'étincelle de rupture pour allumer une petite lampe à essence ou un jet de gaz. La figure 132 montre le principe de ces appareils. S est une bobine de self, P une pile de 2 ou 3 éléments

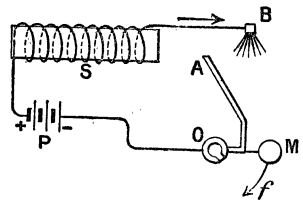


Fig. 132. — Principe d'un allumeur électrique.

Leclanché. Le fil conducteur communique, d'une part, à un petit balai fixe B et, d'autre part, avec une petite canalisation à gaz mobile autour d'un axe O. Lorsqu'on tire sur l'anneau M, dans le sens de la flèche f , l'extrémité A vient en contact avec le balai B et le courant s'établit. En même temps le jeu même de l'appareil produit l'ouverture d'un robinet et le gaz arrive en A. En continuant le mouvement, A quitte le balai et il se produit l'étincelle de rupture qui enflamme le jet de gaz.

L'étincelle de rupture est également employée pour produire l'explosion du mélange détonant dans les moteurs. Le courant est alors produit par une petite magnéto dont le courant est rompu au moment convenable.

186. **Courants de Foucault.** — Les expériences précédentes ont été faites avec des fils conducteurs, mais on obtient aussi des courants induits, par variation de flux magnétique, dans des masses métalliques quelconques. Un disque de cuivre C (fig. 133), que l'on fait tourner entre les pôles d'un électro, s'échauffe par suite des courants induits qui s'y produisent. D'après la loi de Lenz, ces courants sont tels qu'ils s'opposent au mouvement; aussi faut-il dépenser un certain travail pour faire tourner le disque, comme s'il y avait un *frottement supplémentaire*. Si on lance le disque pendant que les électros ne sont pas excités, il tourne sans effort; mais il s'arrête net lorsqu'on fait passer le courant dans les électros.

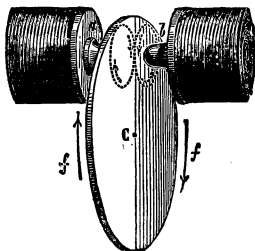


Fig. 133.

Courants de Foucault

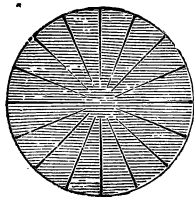


Fig. 134.

Les courants de Foucault dépendent de l'énergie (sous forme de chaleur) dans les pièces métalliques des machines; de plus, la chaleur produite détériore ces pièces. On évite leur formation en rompant la continuité de ces conducteurs.

Des traits de scie pratiqués dans le disque précédent (fig. 134) suppriment presque complètement les courants de Foucault.

Dans les bobines d'induction, on remplace le noyau de fer doux par un faisceau de fils de fer isolés par une couche de vernis ; nous verrons que l'induit des dynamos est formé de plaques minces de tôle isolées par du vernis ou des feuilles de papier.

187. Amortissement des galvanomètres. — Une aiguille aimantée qu'on écarte de sa position d'équilibre, n'y revient qu'après avoir exécuté un certain nombre d'oscillations ; son mouvement est périodique. Si l'on place au-dessous un disque épais de cuivre rouge, plus le disque est voisin de l'aiguille, moins il y a d'oscillations et pour une petite distance et un disque assez épais, le mouvement peut devenir apériodique (sans période d'oscillation) c'est-à-dire que l'aiguille écartée de sa position d'équilibre revient à cette position sans osciller. L'amortissement des oscillations est dû aux courants de Foucault qui prennent naissance dans le disque et dont le sens est tel, d'après la loi de Lenz, qu'ils s'opposent au mouvement de l'aiguille.

EXERCICES

1. Une bobine [plate (fig. 125) portant 20 tours de fil est amenée de la position C_1 où le champ est à peu près nul à la position C_2 où ce champ vaut 1000 gauss ; quelle est la quantité d'électricité induite ? surface de la section 10 cm^2 , résistance $\frac{1}{10}$ d'ohm.

Rép. $\frac{2}{100}$ de coulomb.

2. La durée du déplacement de C_1 à C_2 , dans le problème précédent, étant $\frac{1}{20}$ de seconde, calculer la f. é. m. moyenne et l'intensité moyenne du courant.

Rép. $\frac{4}{100}$ de volt et $\frac{4}{10}$ d'ampère.

3. Une roue de Barlow de 5 cm. de rayon tourne dans un champ magnétique de 100 gauss, perpendiculairement aux lignes de force, avec

une vitesse de 10 tours par seconde. Calculer l'intensité du courant dans une résistance de $\frac{1}{100}$ d'ohm.

R. 0^a,078.

On calcule la variation de flux par seconde, elle est égale à 10 fois la surface de la roue multipliée par le champ. Il suffit de diviser par la résistance et par 10⁸.

4. Le cadre de la figure 126, formé de 10 spires dont les côtés sont 20 cm. et 10 cm., tourne à raison de 20 tours par seconde dans un champ de 100 unités. Calculer l'intensité moyenne du courant supposé redressé.

Résistance $\frac{1}{10}$ d'ohm.

R. 1^a,6.

On considère une rotation d'un demi-tour à partir de la position perpendiculaire aux lignes de force. La variation de flux est, pour ce demi-tour, égale à 2 fois le flux maximum. On connaît la variation de flux, le temps, la résistance, il suffit d'appliquer la formule (2) du n° 179.

5. La culasse d'un puissant électro est le siège d'un flux de 300 000 max. ; sur cette culasse est enroulée une bobine de 200 spires de résistance 10 ohms. Calculer la quantité d'électricité induite dans cette bobine si l'on supprime l'excitation de l'électro (on néglige le magnétisme rémanent).

La durée de la rupture étant $\frac{1}{100}$ de seconde, quelle est la f. é. m. induite.

* 6. Calculer le coefficient de self d'une bobine circulaire de 500 spires, rayon de la section 5 cm., longueur 200 cm.

Valeur approchée de ce coefficient pour une intensité de courant d'un demi-ampère (voy. 183) lorsque la bobine est remplie de fer.

* 7. La bobine précédente (sans fer) étant parcourue par un courant d'un demi-ampère, on coupe le circuit; quelle est la f. é. m. de self, si la durée de rupture est $\frac{1}{100}$ de seconde?

Même question, avec la bobine remplie de fer.

CHAPITRE XIV

LA DYNAMO A COURANT CONTINU

188. **Généralités.** — **Principaux organes.** — **Classification.** — Dans l'industrie, l'énergie électrique est presque toujours produite aux dépens de l'énergie mécanique, celle-ci pouvant être fournie par des *moteurs thermiques* (machines à vapeur, à gaz, à essence), par des *moteurs hydrauliques* (utilisation des chutes d'eau à l'aide de turbines).

La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est obtenue en s'appuyant sur les lois de l'induction : dans toutes les machines génératrices d'énergie électrique, on trouve un circuit conducteur dans lequel circule le courant et un circuit magnétique. Le déplacement de l'un des circuits par rapport à l'autre produit dans le circuit conducteur une variation du flux magnétique qui le traverse et, par suite, des courants induits que l'on utilise.

Les mouvements employés sont toujours des mouvements de rotation et, le plus souvent, c'est le circuit conducteur qui tourne dans le champ magnétique. Les courants obtenus sont, comme nous le verrons, des courants alternatifs ; mais, à l'aide de dispositifs convenables, on peut les transformer en courants continus. Nous avons une première classification des machines productrices d'énergie électrique :

1° *Les machines à courant continu ;*

2° *Les machines à courant alternatif ou alternateurs.*

Principaux organes. — D'après ce que l'on vient de dire, une machine se compose de trois sortes d'organes :

1° *Les inducteurs ;* ce sont les pièces destinées à produire

le champ magnétique. Ils sont constitués par des aimants en acier dans certaines petites machines appelées *magnétos* (abréviation de magnéto-électrique) : telles sont les magnétos employées pour certains appels téléphoniques ou pour l'allumage des moteurs à essence. Mais, dans les machines puissantes, les inducteurs sont toujours des *électros* qui sont susceptibles de produire des champs beaucoup plus intenses que les aimants permanents. Ces électros sont formés d'un noyau de fer doux autour duquel se trouve une bobine parcourue par le *courant d'excitation*. Nous verrons, plus loin, que ce courant peut être emprunté à une *machine excitatrice* spéciale mais que, le plus souvent, on utilise une partie ou la totalité du courant même de la machine pour exciter ses inducteurs. Lorsque les inducteurs sont des électros, la machine prend le nom de *dynamo* (abréviation de dynamo-électrique).

2° *L'induit* ; c'est la partie dans laquelle se produisent les courants induits ; elle est formée, ordinairement, d'un noyau de fer doux (*armature*) sur lequel est enroulé le fil de cuivre qui forme le circuit électrique.

Dans les machines à courant continu, l'induit est mobile et les inducteurs sont fixes ; dans les machines à courant alternatif la partie mobile est, le plus souvent, formée par les inducteurs.

3° *Le collecteur et les balais* ; ce sont les organes destinés à recueillir le courant, ils existent toujours sur les machines à courant continu ; on les supprime, en général, dans les alternateurs.

Machines multipolaires. — Lorsque le champ magnétique est produit par un inducteur à deux pôles, on dit que la machine est *bipolaire* ; les grandes machines industrielles ont souvent des inducteurs plus complexes : à 4, 6, 8... $2n$ pôles. Dans ce cas, la machine est dite *multipolaire*.

Nous allons étudier la machine à courant continu à anneau de Gramme et à deux pôles ; elle nous servira de type ; quelques indications rapides suffiront ensuite pour comprendre les autres types à courant continu.

DYNAMO BIPOLAIRE A ANNEAU DE GRAMME

189. **Description générale.** — Elle comprend, comme nous l'avons vu plus haut :

1° **Les inducteurs** destinés à produire le champ magnétique.

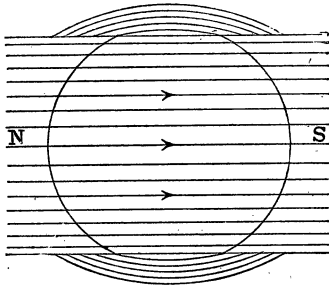


Fig. 135.

Nous étudierons plus loin les formes usitées et les différentes manières de les exciter. La figure 135 montre les lignes de force entre les pièces polaires N et S dans le cas où il n'y aurait pas d'induit.

2° **L'induit**, qu'on appelle **l'anneau de Gramme** (1), se compose de deux parties :

a) **L'armature ou noyau** qui a la forme d'un anneau cylindrique (fig.

136). Cette pièce est formée par une série de disques annulaires plans, en tôle d'acier doux, empilés les uns sur les autres. Ces disques ont une épaisseur de 0,5 à 1 mm. et ils sont isolés les uns des autres par des rondelles de papier ou par une couche de vernis. Cette disposition évite la production des courants de Foucault dans l'armature et, par suite, l'échauffement de cette pièce (2).

b) **Le fil conducteur** est formé de fil de cuivre isolé par deux couches de coton imprégné de vernis. Ce conducteur est enroulé, sur l'ar-

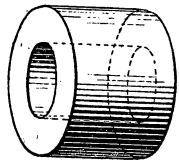


Fig. 136. — Armature de l'anneau de Gramme.

1. L'induit a été inventé par un ouvrier électricien Gramme, 1871. Cette invention peut être considérée comme le point de départ de l'électricité industrielle moderne.

2. Les courants de Foucault sont sensiblement nuls parce que, dans le

mature, dans le sens de la longueur, de sorte que chaque spire de fil a sensiblement la forme d'un rectangle dont les grands côtés sont l'un à l'extérieur et l'autre à l'intérieur de l'anneau cylindrique ; les petits côtés étant, sur les bases du cylindre, dirigés suivant des rayons. Le fil conducteur est enroulé sur toute la surface du cylindre de façon à former un *circuit fermé sur lui-même* ; mais il est composé d'un certain nombre

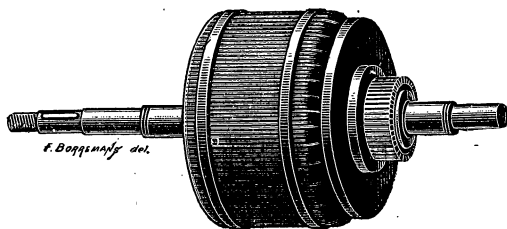


Fig. 137. — Induit Gramme.

de *sections ou bobines* que l'on voit dans la figure 137 qui montre un induit monté et dans la figure 138 qui représente une vue d'ensemble d'une machine.

5° **Le collecteur** est formé par une série de lames de cuivre montées sur un manchon métallique fixé sur l'axe de la machine. Ces lames, ou touches, sont isolées les unes des autres par des lames de mica dont l'épaisseur est un peu inférieure à 1 mm. ; elles sont également séparées du manchon qui les supporte par une matière isolante. Chaque lame est réunie par une bande de cuivre à une *entre-section* ; nous appelons ainsi la portion de fil induit qui réunit deux sections.

La figure 139 montre, schématiquement, cette disposition ; on y a supposé chaque section composée de quatre tours de fil sur l'armature, et de 4 en 4, les fils sont réunis à une touche du collecteur.

mouvement, les disques se déplacent dans le plan des lignes de force et le flux coupé est à peu près nul. Si l'armature était feuilletée dans le sens de l'axe du cylindre les courants de Foucault ne seraient pas supprimés.

Ajoutons que le collecteur est en avant des pièces polaires des inducteurs (fig. 138).

4° *Les balais*; ils sont au nombre de deux dans les machi-

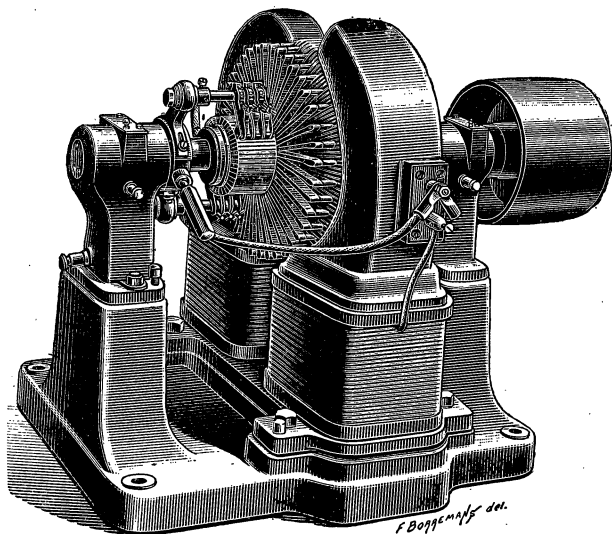


Fig. 138. — Machine Gramme. — Vue d'ensemble.

nes à deux pôles, et sont placés aux extrémités du diamètre du

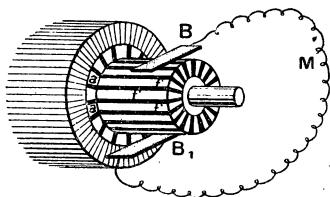


Fig. 139. — Collecteur.

collecteur qui est à peu près perpendiculaire à la ligne des pôles des inducteurs. Ils sont formés de lames de cuivre ou de laiton dans les petites machines; dans les plus grandes, on les fait en charbon. La figure 140 représente le bloc de charbon C et son support.

Dans la rotation de l'induit et du collecteur, les touches de

celui-ci viennent successivement frotter contre les charbons C.

La rotation produit un courant continu dans le circuit extérieur, c'est-à-dire dans le conducteur qui réunit les deux balais ; c'est dans ce circuit extérieur que l'on place les appareils d'utilisation : lampes, moteurs, etc.

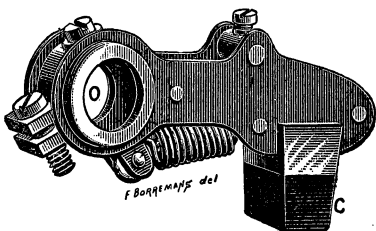


Fig. 140. — Balai en charbon.

190. Fonctionnement de la machine.

— 1^o Champ magnétique.

— Lorsqu'on place l'induit entre les pôles de l'inducteur, le

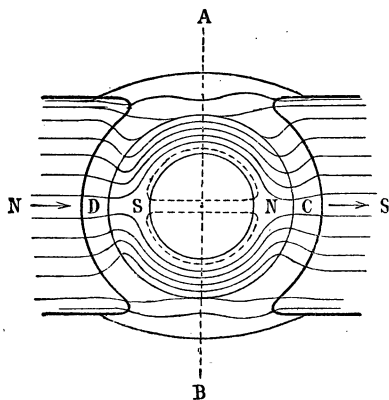


Fig. 141. — Forme du champ, lorsque l'induit est immobile.

champ qui avait la forme représentée dans la figure 135, se trouve modifié comme le montre la figure 141; le flux est canalisé dans l'armature de fer doux et il n'y a presque plus de flux en dehors. Le flux Φ parti du pôle nord N rentre en D et se partage en deux parties égales qui circulent dans les deux moitiés de l'anneau. Ces deux parties se réunissent en C pour rentrer dans le pôle

sud de l'inducteur. Dans le vide de l'anneau, il n'y a qu'un flux très faible, tout à fait négligeable que l'on a représenté par une ligne ponctuée.

Lorsque l'armature tourne, la forme du champ n'est pas modifiée — nous verrons plus loin qu'il y a en réalité une modifi-

cation secondaire due à la réaction de l'induit, que nous laissons de côté pour le moment — car l'aimantation de l'aimant reste la même dans l'espace, parce qu'il n'y a pas de retard sensible à l'aimantation; la partie D de l'anneau, qui est en face du pôle N de l'inducteur, est toujours un pôle sud, quelle que soit la vitesse de l'anneau.

Il faut remarquer, toutefois, que si l'on considère un point de l'anneau et qu'on le suive dans son mouvement de rotation, il change d'aimantation puisqu'il est pôle sud lorsqu'il passe par D et pôle nord quand il passe en C. Les différents points de l'anneau subissant des changements d'aimantation pendant la rotation, les phénomènes d'hystérésis interviendront donc pour produire une certaine perte d'énergie.

191. 2^o **Sens du courant induit dans une spire.**

— Considérons (fig. 142) une spire de fil induit m qui glisse sur l'anneau dans le sens des aiguilles d'une montre en faisant un tour complet. Dans la position A, elle est traversée de gauche à droite par le flux $\frac{\Phi}{2}$ (moitié du flux total produit par les inducteurs). Si on la déplace dans le sens de A vers C, le flux

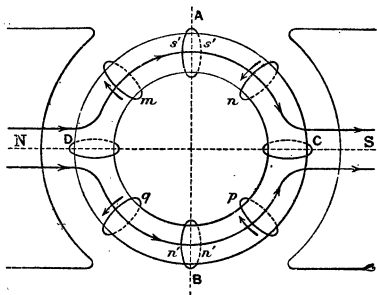


Fig. 142.

qui la traverse diminue et il se produit un courant direct (sens de rotation du tire-bouchon). Le sens du courant est indiqué par la petite flèche pour la position n .

En C, le flux qui traverse la spire est nul puisque son plan est couché le long des lignes de force.

De C en B, le flux augmente, le courant induit est inverse de la rotation du tire-bouchon; mais, comme les lignes de force entrent par l'autre face de la spire, et que le tire-bouchon doit être changé de côté, le sens du courant induit est le même de C

en B que de A en C (flèche de la position p). Pendant la demi-révolution ACB le courant a donc même sens dans la spire (1).

Lorsque la spire franchit la position B, le courant induit change de sens, puisque le flux qui avait augmenté jusque là, diminue ensuite. En D, comme en C, il n'y a pas de changement de sens et, pendant la demi-révolution BDA, la spire est parcourue par un courant induit dont le sens est inverse de celui qui la parcourait dans la partie ACB.

Nous avons supposé que la spire glisse le long de l'anneau, le résultat sera le même si la spire est fixée en un point de l'anneau et que celui-ci soit animé d'un mouvement de rotation ; cela résulte de ce qui a été dit plus haut sur la forme invariable du champ dans l'espace.

192. 3^e **Variation de la f. é. m. pendant la rotation.** — **Le courant dans une spire est alternatif.**

— Il résulte de ce qui précède que la spire qui fait une série de révolutions est parcourue par un courant alternatif qui change de sens deux fois par tour, lorsqu'elle passe en A et en B. L'intensité de ce courant est d'ailleurs variable. Pour nous en rendre compte, grossièrement, considérons la spire dans la position A ; si nous la faisons tourner d'une petite fraction, $\frac{1}{50}$ de tour par exemple, le flux qui la traverse varie peu et comme la f. é. m. d'induction est proportionnelle à cette variation de flux on voit que cette f. é. m. est très faible.

Si, au contraire, nous déplaçons la spire de $\frac{1}{50}$ de tour au voisinage du point D (fig. 143), la variation de flux est beaucoup plus grande pour *une même durée de temps* : la f. é. m. développée au voisinage de D est donc plus grande qu'en A et B.

Un raisonnement plus précis, et le calcul, montrent que la

1. La règle des trois doigts montrerait, aussi simplement, le sens du courant induit ; on verrait que dans toute la partie ACB le courant est d'arrière en avant de la figure dans la portion de la spire qui est à l'extérieur. Cette portion est d'ailleurs la seule efficace au point de vue de l'induction, la partie intérieure à l'anneau ne coupant pas de lignes de force est inactive.

f. é. m. est nulle lorsque la spire passe en A, maximum en C, nulle en B et maximum en D.

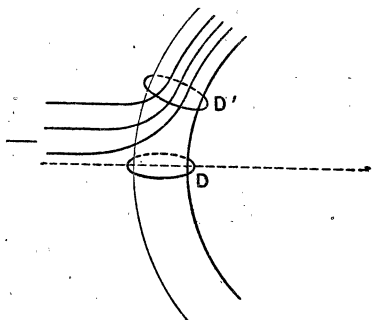


Fig. 143.

Sur les perpendiculaires à Ax , on porte des longueurs proportionnelles à la f. é. m.; on trouve la courbe $AMBMA'$ qui montre que la f. é. m. nulle en A, croît jusqu'en C où elle est maximum, redevient nulle en B, prend une valeur maximum mais de sens contraire en D et redevient nulle en A'.

L'intensité du courant s'obtient, à chaque instant, en divisant la f. é. m. par la résistance si toutefois on néglige les effets de self-induction sur lesquels on reviendra. Pour tracer le graphique des intensités, il suffit de diviser par la résistance R les ordonnées de la courbe précédente — par exemple $CP = \frac{CM}{R}$; $KL = \frac{KJ}{R}$. On obtient, ainsi, une courbe $APBP'A'$

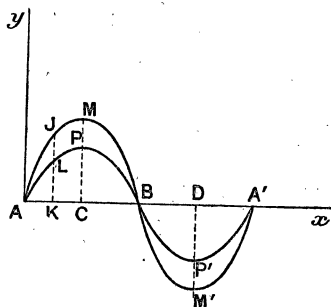


Fig. 144. — Variations de la f. é. m. et de l'intensité dans une spire.

analogue à la précédente ; elle correspond à une intensité maxima aux points C et D et à une intensité nulle aux points A et B.

193. 4^e **Rôle du collecteur.** — Il fournit à l'extérieur un courant continu. — Au lieu d'une spire formée d'un seul tour de fil, nous pouvons considérer une section ou bobine qui en a plusieurs, le résultat obtenu sera le même, avec cette différence que la f. é. m. est à peu près multipliée par le nombre de spires — pourvu que ce nombre soit faible et que la bobine soit de faible épaisseur.

Si nous envisageons l'induit pendant sa rotation, toutes les spires qui, à un instant donné, sont à droite du diamètre AB (fig. 142) qu'on appelle la *ligne neutre* sont le siège d'une f. é. m. d'un certain sens, le sens BCA par exemple ; celles qui sont à gauche sont le siège d'une f. é. m. de sens contraire, le sens BDA. A cause de la symétrie de la machine, ces f. é. m. qui sont opposées s'annulent et il n'y a pas de courant dans l'induit, si les balais ne sont pas réunis par un conducteur extérieur. **En circuit ouvert, il n'y a pas de dépense d'énergie à faire pour produire la rotation de l'induit** (si on néglige les frottements).

L'ensemble des bobines peut être comparé à deux séries d'éléments de piles montées en quantité, comme le montre la figure 145.

Chaque bobine qui, à un instant donné, est à gauche du diamètre AB, peut être assimilée à un élément de pile ayant une f. é. m. qui est faible pour les bobines voisines de A ou de B et plus grande pour celles qui sont vers le milieu. Toutes les f. é. m. de la série de gauche s'ajoutent et il en est de même pour l'autre série. Les sommes des f. é. m. étant égales, à cause de la symétrie de la machine, les deux séries **sont en opposition** par des pôles de même nom et les courants s'annulent comme on l'a dit plus haut.

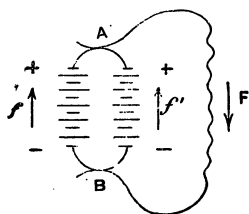


Fig. 145. — Le courant a toujours le même sens dans le circuit extérieur.

Supposons maintenant que l'on réunisse par un conducteur extérieur les points A et B (fig. 145), ce conducteur sera parcouru par un courant qui aura toujours même sens, le sens F, que l'on suit en allant du pôle + au pôle — des deux séries de piles. Si E est la f. é. m. entre A et B en circuit ouvert, R la résistance extérieure et r la résistance de l'une des séries ADB ou ACB l'intensité I dans le circuit extérieur est

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{2}}$$

La résistance intérieure est la moitié de la résistance de chaque série puisque ces séries sont montées en dérivation.

Le courant qui circule dans chaque série est d'ailleurs égal à $\frac{I}{2}$. Ces deux courants $\frac{I}{2}$ s'ajoutent en sortant en A pour former le courant I dans le circuit extérieur.

Il en est de même dans la machine de Gramme lorsque les balais sont réunis par un conducteur extérieur. Par suite des connexions établies entre les bobines de l'induit et les touches du collecteur, les bobines qui passent à chaque instant en A et B sont réunies par le conducteur extérieur et celui-ci est parcouru par un courant continu.

Le collecteur a donc pour effet de capter les courants alternatifs des bobines de façon à réaliser à l'extérieur un courant continu (1).

194. F. é. m. de la machine. — Supposons qu'il y ait N spires enroulées sur l'armature et que l'induit fasse n tours par seconde et soit Φ maxwells le flux utile qui traverse la totalité de l'induit. Ce flux, comme nous verrons, est un peu plus petit que celui produit par les inducteurs.

D'après la théorie qui a été expliquée plus haut, la f. é. m. qui est mesurée par la diff. de pot. en circuit ouvert entre les

1. Ce courant continu n'est pas rigoureusement constant; il présente autour de sa valeur moyenne de légères oscillations, d'autant plus petites qu'il y a un plus grand nombre de sections sur l'induit.

points B et A est la même pour chacune des deux moitiés de l'anneau et, comme ces deux moitiés sont montées en dérivation, ces f. é. m. ne s'ajoutent pas et *la f. é. m. de la machine est égale à celle de l'une des moitiés*. Considérons une demi-révolution de la machine; pendant ce temps, il passe de B à A du côté D par exemple, un nombre de spires égal à $\frac{N}{2}$; chacune d'elles éprouve, pendant ce mouvement, une variation de flux égale à Φ car en B la spire était traversée par le flux $\frac{\Phi}{2}$ qui entrait par l'une de ces faces et en A par un flux $\frac{\Phi}{2}$ qui entre par l'autre face; la variation est donc $\frac{\Phi}{2} + \frac{\Phi}{2} = \Phi$.

La variation totale à travers les $\frac{N}{2}$ spires qui ont passé de B à A, pendant une demi-révolution, est égale à $\Phi \times \frac{N}{2}$.

Or, pour trouver la f. é. m. induite, il faut (179) diviser la variation du flux par la durée de cette variation et par 10^8 .

La durée est égale à celle d'un demi-tour et vaut $\frac{1}{2n}$ secondes puisqu'il y a n tours par seconde. On a donc :

$$\text{t. é. m. } E^{\text{volts}} = \frac{\Phi}{10^8} \times \frac{N}{2} : \frac{1}{2n} = \frac{nN\Phi}{10^8}.$$

On voit que cette f. é. m. est :

1° *proportionnelle au nombre de spires enroulées sur l'induit;*

2° *proportionnelle au nombre de tours par seconde (par suite proportionnelle à la vitesse de rotation);*

3° *proportionnelle au flux produit par les inducteurs à travers l'anneau.*

Application numérique. — Considérons une dynamo qui fait 20 tours par seconde, dans laquelle il y a 1 200 spires sur

l'anneau, le flux Φ valant 500 000 maxwells. On a :

$$E_{\text{volts}} = \frac{20 \times 1\,200 \times 500\,000}{10^8} = 120 \text{ volts.}$$

195. **Décalage des balais.** — Si l'on fait débiter un courant à la dynamo, en mettant comme nous l'avons supposé les balais en A et en B sur la ligne neutre, on constate qu'il se produit des étincelles entre les balais et les touches du collecteur. Ces étincelles détériorent les lames et les balais. On évite ces étincelles en **décalant** les balais, par rapport à la ligne neutre, dans le sens du mouvement de la machine. L'angle dont on fait tourner les balais pour trouver la position où les étincelles sont réduites au minimum est appelé **l'angle de décalage**. Ce décalage entraîne une diminution de la f. é. m. de la machine, et nécessite le déplacement des balais si on vient à changer la vitesse, ce qui n'est pas sans danger pendant la

marche. Dans les grandes machines, on maintient les balais fixes et l'on prend des dispositions qui réduisent autant que possible le décalage.

La production des étincelles est due à deux causes :

1° Une cause magnétique, la production d'un champ magnétique dans l'armature de l'induit lorsque celui-ci est parcouru par un courant ;

2° Une cause électrique, la self-induction des bobines.

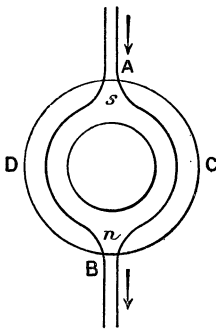


Fig. 146. — Aimantation secondaire de l'armature produite par le courant induit. La flèche indique la direction de ce champ.

196. **Cause magnétique du décalage. Sa suppression.** — Le courant induit qui circule dans chacune des moitiés de l'anneau aimante l'armature qui correspond ainsi à deux aimants demi-annulaires ayant les pôles de même nom en contact : un double pôle nord en n (fig. 146) et un double pôle sud en s. Les lignes de force de ce champ secondaire sont représentées dans la figure 146. Ce champ

se compose avec le *champ principal* que rappelle la figure 147. Il en résulte une sorte de torsion des lignes de force et la ligne neutre est en A'B' (fig. 148) décalée d'un certain angle, dans le sens du mouvement.

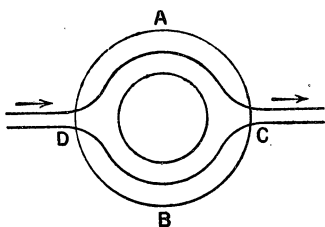


Fig. 147. — Aimantation principale produite par les inducteurs.

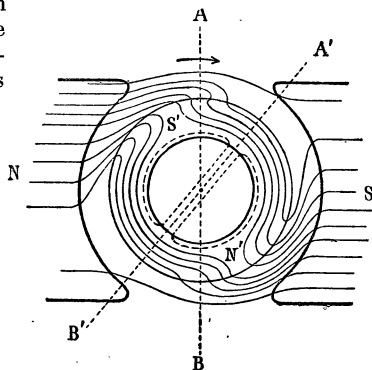


Fig. 148. — Champ résultant. La ligne neutre est suivant A'B'.

On diminue et l'on peut annuler cette torsion du champ en plaçant deux *pôles inducteurs supplémentaires* en s et en n sur la ligne neutre; ces pôles sont excités par une partie du courant induit. Le pôle s (fig. 149) tend à produire, par influence, un pôle nord n' qui annule le pôle sud formé par le courant de l'anneau dont nous avons parlé plus haut (fig. 146). Il en est de même du côté B. Il faut remarquer que cette compensation a lieu quelle que soit l'intensité du courant; si cette intensité croît, et tend à augmenter le décalage, l'intensité du champ de compensation croît dans le même rapport puisqu'il est entretenu par le courant même.

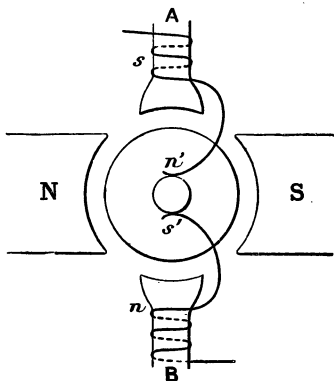


Fig. 149. — Suppression du champ secondaire par l'emploi des pôles supplémentaires.

197. **Cause électrique. — Sa diminution.** — Si l'on place les balais le long de la nouvelle ligne neutre A'B' (fig. 148), il y a encore des étincelles, elles sont dues à la self-induction de la bobine qui est mise en court-circuit par le balai, lorsque celui-ci est en contact avec deux touches consécutives. On diminue cette seconde *réaction d'induit* en donnant à chaque section un nombre moindre de fils, c'est-à-dire en multipliant le nombre des sections et, par suite, le nombre des touches du collecteur.

NOTIONS SUR L'INDUIT EN TAMBOUR ET LES MACHINES MULTIPOLAIRES

198. **Induit en tambour.** — L'armature est un cylindre formé par la superposition de disques minces d'acier doux, isolés comme les disques de l'anneau de Gramme, pour éviter les courants de Foucault. Ces disques portent au centre un trou juste suffisant pour les glisser sur l'axe de la machine. Les disques extrêmes sont plus épais et clavetés sur l'axe après serrage.

Le fil induit n'est enroulé que sur la surface extérieure de l'armature et de façon à former un circuit continu et fermé

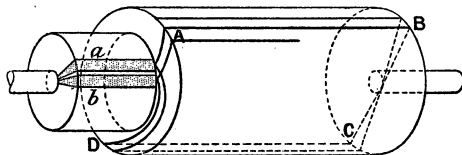


Fig. 150. — Induit en tambour.

(fig. 150). On voit de suite que le fil est mieux utilisé que dans l'induit Gramme, car les deux grands côtés du rectangle formés par une spire AB et CD sont tous les deux actifs, tandis que dans l'anneau, il n'y a que le côté extérieur qui coupe les lignes de force.

Lorsque l'armature est placée entre les pôles de l'inducteur, elle canalise le flux et augmente sa valeur dans l'entrefer où circulent les fils de l'induit. Ce flux reste d'ailleurs fixé dans

l'espace, malgré la rotation du tambour (si on néglige la réaction de l'induit).

Une spire, rectangulaire, se déplace dans un champ qui est grossièrement uniforme et dirigé de gauche à droite. Dans la position 1 (fig. 151), le cadre ABCD est traversé par le flux maximum; si on le fait tourner d'un quart de tour dans le sens des aiguilles d'une montre, autour de l'axe xy , en passant de 1 à 2, il y a diminution du flux et, par suite, formation d'un courant induit direct (règle du tire-bouchon), ce courant va dans le sens DCBA d'arrière en avant dans le côté BA et d'avant en arrière dans DC. — Si l'on continue le mouvement, pendant

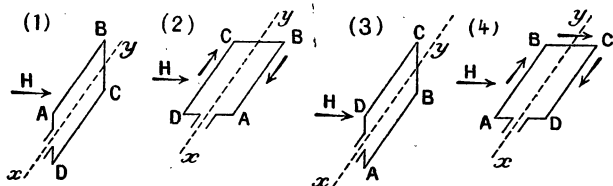


Fig. 151.

le $1/4$ de tour suivant, le flux est croissant mais il rentre par l'autre face, de sorte que, bien que le courant induit soit inverse, le sens est le même que précédemment.

Dans la position 3, le flux qui traverse le rectangle est maximum. Si on continue la rotation, le flux diminue jusqu'à être nul pour la position 4, pendant ce quart de tour le courant induit est de sens contraire au précédent et pour la même raison que plus haut, il n'y a pas de changement de sens en passant par la position 4. On voit donc que, de même que dans l'induit à anneau, il y a changement de sens du courant lors du passage de la spire par les deux positions de maximum de flux. La spire est parcourue par un courant alternatif comme dans le cas de l'induit à anneau (voy. 192). Mais nous remarquerons que le côté du conducteur qui se trouve à droite de la ligne neutre est toujours parcouru d'arrière en avant par le courant (pendant la première demi-révolution c'était le côté BA

et pendant l'autre demi-révolution c'est le côté CD) et la partie de la spire qui est à gauche de la ligne neutre est toujours parcourue d'avant en arrière (1).

Si donc on a enroulé le fil sur le tambour de façon à former un circuit fermé, toutes les parties actives des conducteurs qui, à un instant donné, sont à droite de la ligne neutre, sont le siège d'une f. é. m. de même sens et toutes les parties actives qui sont à gauche sont le siège d'une f. é. m. de sens opposé au précédent et, si les conducteurs sont répartis régulièrement sur le tambour, ces f. é. m. sont en opposition et le fil induit n'est parcouru par aucun courant, en circuit ouvert, comme dans l'induit à anneau.

Le fil est en réalité enroulé par sections, contenant chacune plusieurs spires de fil, et les sections sont mises en connexion avec les touches d'un collecteur analogue à celui de Gramme. Le nombre de touches est égal à celui des sections et, par suite, à la moitié du nombre des groupes extérieurs de fil — puisqu'une section comprend deux parties extérieures sur le cylindre. — Des balais sont disposés comme dans l'induit Gramme et l'on recueille, à l'extérieur, un courant continu. Les balais doivent être aussi décalés; mais moins que dans la machine à anneau.

199. Idée des connexions. — L'enroulement du fil sur l'induit est une question complexe et délicate dont nous ne donnons que le principe dans le cas le plus simple, l'enroulement Hefner Alteneck que représente schématiquement la figure 152.

Dans cette figure, on a représenté 8 sections et, par suite, il y a 16 fils sur la surface du cylindre (en réduisant chaque section à un seul). Les lignes pleines représentent les fils sur la face avant, côté du collecteur, les lignes ponctuées désignent les fils sur la base arrière du cylindre; les chiffres 11', 22'... représentent les deux fils d'une même section, ils devraient être diamétralement opposés, ainsi 1' devrait être en 5, mais comme en ce point 5 il y a une autre section, on a dû déplacer d'une certaine quantité le fil 1' qui vient de l'arrière. Pour tous les fils qui sont à gauche de la ligne neutre AB, le courant va d'avant en arrière et pour ceux de droite il va d'arrière en avant. On peut suivre d'après cela le sens du courant dans tous

1. La règle des trois doigts donne très facilement, aussi, ce résultat.

les fils. Si l'on part de la touche *a*, on va de *a* à 1, de là à l'arrière, on revient en avant par 1', de là à la touche *b*, etc. Le circuit est bien fermé sur lui-même.

La moitié des spires est le siège d'une f. é. m. qui a un certain sens et dans l'autre moitié le sens est inverse; il en résulte, comme on le voit sur la figure, que la touche *d* reçoit du courant des deux conducteurs qui y aboutissent venant de 4 et de 3', c'est en *d* qu'on placera le balais positif B_1 . La touche *h* envoie du courant aux deux conducteurs 8 et 7' on mettra un balai en *h*, ce sera le balai négatif B_2 . Les conducteurs qui correspondent à ces touches *d* et *h* sont ceux qui sont voisins de la ligne neutre. Les touches, autres que celles où sont les balais, reçoivent du courant par un conducteur et en envoient par l'autre. Il existe d'ailleurs d'autres systèmes de bobinage.

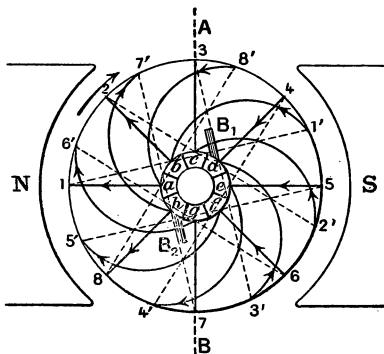


Fig. 152. — Principe de l'enroulement Hefner Alteneck.

200. **Induits dentés et induits à trous.** — Lorsque les sections sont directement enroulées sur le cylindre, on dit que *l'induit est lisse*; cette disposition présente des inconvénients; les fils sont soumis à des efforts mécaniques (force centrifuge et forces électromagnétiques) qui tendent à les déplacer sur le cylindre, sur lequel on est obligé de les serrer avec des frettes.

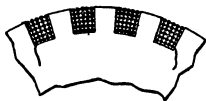


Fig. 153.
Induit denté.

On évite ces inconvénients, en pratiquant, le long du cylindre, des cannelures dans lesquelles on loge les sections (fig. 153). Cette disposition est très usitée; elle supprime, en partie, les effets précédents et, en outre, elle permet de diminuer l'entrefer compris entre l'armature et les inducteurs.

Cette disposition permet, de plus, un bobinage rapide des sections

et leur remplacement en cas d'accident. Les sections sont bobinées d'avance sur un gabarit, il suffit de les mettre en place dans les cannelures qui leur correspondent.



Fig. 154.
Induit à trous.

Dans les *induits à trous* (fig. 154), on a pratiqué des canaux parallèles à l'axe du cylindre et voisins de la surface, les conducteurs sont logés dans ces canaux. Les inconvénients du tambour lisse sont complètement évités⁽¹⁾; mais le bobinage est plus difficile et ne peut se faire mécaniquement. Cette disposition n'est guère usitée que pour les alternateurs.

201. Comparaison des induits à anneau et des induits en tambour. — 1° Dans un induit en tambour le fil de cuivre est mieux utilisé, ainsi que nous l'avons déjà indiqué, puisque les deux parties de chaque section qui sont parallèles à l'axe sont toutes deux actives.

La f. é. m. d'une machine à tambour est la même que celle d'une machine à anneau qui a le même nombre de conducteurs à la périphérie.

$$E_{\text{volts}} = \frac{n \cdot N \cdot \Phi}{10^8}$$

Dans cette formule, N désigne le nombre des conducteurs superficiels, lequel est égal au double du nombre des sections; de sorte que, pour un même nombre de sections et une même vitesse, le tambour donne une f. é. m. double de celle que fournit l'anneau;

2° La construction des induits en tambour, surtout avec tambour denté, peut se faire mécaniquement (212), tandis que les sections doivent être bobinées directement sur un anneau;

3° Le décolage est moindre avec le tambour qu'avec l'anneau.

Toutes ces raisons font que le tambour est très usité et que

1. Les conducteurs de cuivre logés dans ces canaux ne sont plus soumis aux forces électromagnétiques car le fer qui les entoure joue le rôle d'écran magnétique, les forces électromagnétiques sont appliquées sur le fer et non sur le conducteur de cuivre.

l'anneau n'est plus employé que pour des machines de faible puissance. Le tambour présente cependant quelques inconvénients, dont le plus grave est d'avoir sur les bases de l'armature de nombreux fils superposés qui sont à des potentiels différents ce qui exige un très bon isolement pour que des étincelles ne jaillissent pas entre ces fils : il en résulterait des courts-circuits pouvant entraîner la perte de l'induit. Pour cette raison, on ne peut pas réaliser avec les tambours des f. é. m. aussi élevées qu'avec les anneaux.

202. **Machines multipolaires.** — Les machines bipolaires ne peuvent guère dépasser une puissance de 30 à 40 kgw ; si l'on veut augmenter cette puissance, il faut augmenter les dimensions ou la vitesse. Or, pour la vitesse on ne peut pas

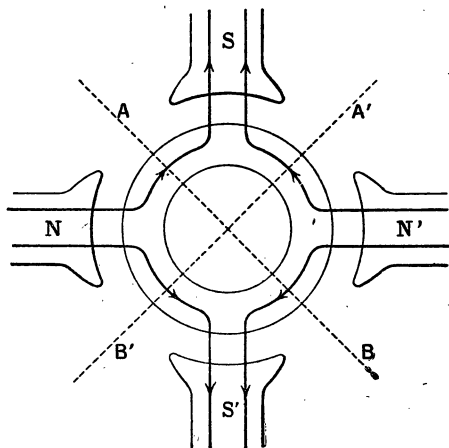


Fig. 155. — Principe d'une machine à 4 pôles.

dépasser 20^m par seconde à la périphérie, à cause de la force centrifuge. Si l'on cherche à augmenter les dimensions, il faut écarter les pôles des inducteurs, ce qui augmente aussi les fuites magnétiques. On est arrivé à réaliser des machines très puissantes en employant 4, 6, 8, et même 10 pôles inducteurs

disposés sur une couronne de fer; l'induit tourne à l'intérieur en passant devant les pièces polaires et en coupant plusieurs fois par tour le flux inducteur.

La figure 155 montre schématiquement la disposition d'une machine à 4 pôles et à anneau de Gramme. Le flux Φ , parti du pôle nord N, se partage en deux parties égales qui sont canalisées par l'anneau et se rendent dans les pôles S et S'; il en est de même pour le pôle N'. Lorsque l'anneau tourne, une spire de fil induit coupe, à chaque tour, les quatre flux $\frac{\Phi}{2}$ (tandis qu'elle ne coupait que deux fois ce flux $\frac{\Phi}{2}$ dans une machine bipolaire).

La machine comporte 2 lignes neutres AB et A'B' et il y a lieu de mettre deux paires de balais qui seront décalés d'un certain angle dans le sens du mouvement

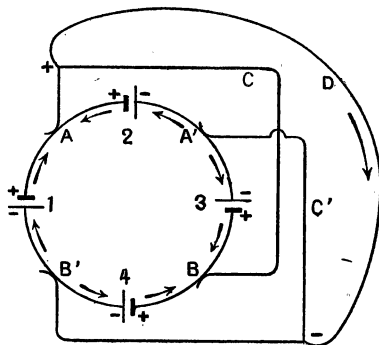


Fig. 156. — Disposition des connexions pour recueillir, à l'extérieur, du courant continu.

Voyons comment on recueille le courant. Le système est équivalent à 4 piles, 1.2.3.4 (fig. 156). Les piles 1 et 2 sont opposées par leurs pôles + ainsi que 3 et 4. Il n'y a pas de courant si l'on ne met pas de circuit extérieur. Les points A et B sont des pôles + et sont au même potentiel; A' et B' sont des pôles négatifs. Si on réunit A et B par un conducteur C, il n'est parcouru par aucun courant, de même le conducteur C' qui réunit A' et B'. Mais dans le conducteur D qui relie C et C', il y a un courant allant du conducteur C au conducteur C'.

La machine à 4 pôles avec l'enroulement ordinaire de l'induit en anneau a la même f. é. m. qu'une machine bipolaire qui

aurait même flux Φ , même vitesse et même nombre de spires.

En effet, lorsqu'une spire passe du point neutre B' au point neutre A, elle éprouve une variation de flux égale à Φ (deux fois $\frac{\Phi}{2}$, puisque d'une position à l'autre l'entrée du flux $\frac{\Phi}{2}$ a changé de face); or, pendant ce quart tour, il passe de B' à A un nombre de spires égales à $\frac{N}{4}$ et le temps employé est égal à celui que dure un quart de tour, soit $\frac{1 \text{ seconde}}{4n}$ donc

$$E^{\text{volts}} = \frac{\Phi}{10^8} \times \frac{N}{4} : \frac{1}{4n} = \frac{nN\Phi}{10^8}.$$

Mais la machine peut fournir un plus grand débit, c'est-à-dire un courant extérieur plus grand, sa puissance est donc augmentée.

Le résultat est le même que si l'on groupait en quantité (ou parallèle) deux piles de f. é. m. E; pour cette raison, on dit que l'enroulement de l'anneau Gramme est, dans ce cas, *en parallèle*. Il serait facile de généraliser pour 6, 8, 10 pôles (1). (Voy. fig. 199 une dynamo à 4 pôles, employée comme moteur.)

203. *Autres types d'enroulements.* — On peut grouper autrement les sections par l'intermédiaire des touches du collecteur. Si on s'arrange, par exemple, pour que, d'une part, toutes les spires qui coupent le flux sortant des pôles nord soient réunies entre elles et que, d'autre part, toutes les spires qui coupent le flux entrant dans les pôles sud forment une autre série, on obtient une machine qui *n'a plus que deux balais* et dont la f. é. m. est proportionnelle au nombre des pôles. Ce type d'enroulement, comparable au groupement des éléments de piles en tension, est appelé *enroulement en série*. Il présente l'avantage de compenser la dissymétrie qui peut exister entre les différents inducteurs.

Nous ne ferons qu'indiquer que l'induit en tambour peut se placer

1. On peut, dans une machine à 4 pôles, n'employer que deux balais; il suffit pour cela de réunir 2 à 2 par des conducteurs fixes, les touches diamétralement opposées. Ces conducteurs remplaceront les conducteurs C et C' de la figure 156.

aussi dans un champ multipolaire; comme dans le cas de l'anneau, il existe deux types d'enroulements principaux; l'enroulement en quantité appelé aussi *imbriqué* et l'enroulement en tension ou *bobinage ondulé*.

EXERCICES

1. Un anneau de Gramme porte 400 spires, sa section par un plan passant par l'axe est un rectangle dont les dimensions sont 20 cm. et 4 cm. L'induction est 15 000 g. Calculer la f. é. m. en admettant que l'isolement des tôles réduit la longueur de 10 pour 100? Vitesse, 900 tours par minute.

R. 129,6.

Dans la formule $E = \frac{n N \Phi}{10^8}$, on a : $n = \frac{900}{60} = 15$.

$N = 400$. Le flux à travers la section utile de l'anneau $\left(20 \times 4 \times \frac{9}{10}\right)$, vaut $15\,000 \times 20 \times 4 \times \frac{9}{10}$. Mais ceci n'est que $\frac{\Phi}{2}$. Il suffit de remplacer dans la formule.

2. Un anneau Gramme porte 300 tours de fil, le flux total des inducteurs est 2 400 000 max., quelle vitesse faut-il lui donner pour que la f. é. m. soit 110 v? On suppose une perte de 25 pour 100 du flux dans l'entrefer.

R. 1222 tours par minute.

3. Chaque spire de l'anneau précédent est équivalente à un rectangle de 20 cm. sur 4 cm. Calculer la longueur totale du fil induit et la résistance prise entre les balais. Le fil est du cuivre de 1 mm. de diamètre, $\rho = 1,6 \cdot 10^{-6}$ ohms.

R. 0 ω , 75.

4. Les balais de la dynamo précédente sont reliés par une résistance de 5 ω , calculer l'intensité du courant dans le circuit extérieur et dans les spires de l'induit. Calculer aussi le voltage aux bornes en circuit fermé.

5. Un anneau Gramme tourne avec une vitesse de 800 tours par minute, le flux utile qui le traverse est 1 800 000. Combien faut-il enrouler de spires pour avoir une f. é. m. de 120 v?

6. Calculer la longueur de fil à employer, chaque spire est un rectangle de 20 cm. sur 4 cm. Résistance de ce fil, le diamètre étant 1^{mm},2 $\rho = 1,6 \cdot 10^{-6}$.

7. Calculer la résistance d'un induit tétrapolaire sachant que la résistance totale du fil est R.

A cause des connexions, la résistance est égale à celle du quart de l'anneau divisée par 4; soit $\frac{1}{16}$ de R. Ceci avec le montage indiqué au n° 202,

CHAPITRE XV

LA DYNAMO A COURANT CONTINU (Suite) INDUCTEURS — RENDEMENT CONSTRUCTION ET INSTALLATION

204. *Divers types d'inducteurs.* — Nous avons déjà signalé que les inducteurs de certaines machines dites magnétos sont des aimants permanents. Ces machines sont toujours de faible puissance, car les aimants permanents ne permettent pas d'avoir des flux très intenses.

Les inducteurs industriels sont toujours des électros. Les métaux employés sont le fer doux, la fonte et l'acier doux. Ces deux derniers sont les plus usités, car on les obtient par moulage du métal fondu.

On tend de plus en plus à employer l'acier doux plus perméable que la fonte; avec celle-ci, il faut utiliser pour un même flux des sections et, par suite, des poids plus grands.

Dans certains cas, la culasse est en fonte, les noyaux et les pièces polaires en acier doux. Les formes les plus répandues sont :

1° **Type inférieur.** — Il est dû à Edison (fig. 157). On est obligé d'interposer entre le socle et la base de la machine une épaisseur de zinc ou de bronze pour éviter une perte

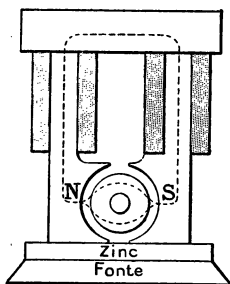


Fig. 157.
Type inférieur (Edison).

considérable de flux dans le socle. Ce système présente un avantage : par suite de l'attraction des inducteurs sur l'induit, le poids de celui-ci se trouve diminué et les paliers supportent un effort réduit ;

2° **Type supérieur (Gramme)** (fig. 158). — Dans ce type, le socle formant culasse, il n'y a pas de perte de flux ;

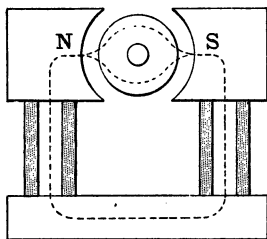


Fig. 158. — Type supérieur (Gramme).

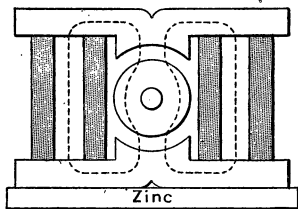
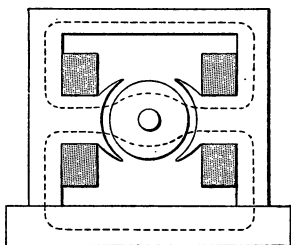


Fig. 159. — Type symétrique (Manchester).

3° **Type symétrique (Manchester)** (fig. 159). — Donne un flux symétrique et bien utilisé ;

4° **Type à pôles intérieurs.** — On tend à employer, aujourd'hui, des *électros cuirassés*, c'est-à-dire à *pôles intérieurs* et entourés de fonte ou d'acier (fig. 160). La forme peut être à section rectangulaire ou circulaire.



160. — Type à pôles intérieurs.

Pour les machines multipolaires, on emploie toujours des électros à pôles intérieurs.

Dans tous les cas, les électros doivent avoir une faible réluctance et, par suite, les noyaux sont courts et à large section.

Le calcul de leurs dimensions, ainsi que celui des ampères-tours nécessaires à l'excitation est analogue à celui que nous

Le calcul de leurs dimensions, ainsi que celui des ampères-tours nécessaires à l'excitation est analogue à celui que nous

Le calcul de leurs dimensions, ainsi que celui des ampères-tours nécessaires à l'excitation est analogue à celui que nous

avons fait au n° 144 (voir aussi exercices à la fin du chapitre). Il y a lieu, dans le calcul, de tenir compte des fuites magnétiques qui atteignent 20 à 30 pour 100 suivant les modèles.

Des précautions particulières sont prises pour éviter une trop forte élévation de température dans les bobines ; il faut donc limiter l'intensité du courant exciteur en tenant compte du diamètre des fils.

205. Différents modes d'excitation. — Dans les premiers temps de l'emploi des dynamos, on excitait les inducteurs à l'aide d'une petite machine magnéto ; cette disposition n'est plus employée pour les machines à courant continu qui, ainsi que nous allons voir, sont *auto-excitatrices*. Les alternateurs, au contraire, ont toujours une *machine excitatrice*.

L'auto-excitation s'explique par le magnétisme rémanent des électros. En effet, supposons que le fil des inducteurs soit mis en communication avec les balais, nous verrons comment : si l'on fait tourner l'induit, le faible champ dû au magnétisme rémanent donne un courant induit peu intense qui, passant en partie ou en totalité dans les inducteurs, leur donne une aimantation plus forte. Il en résulte une augmentation de courant induit qui fait croître le magnétisme des inducteurs et, peu à peu, la machine s'amorce, c'est-à-dire qu'elle donne son régime normal (1).

Il existe trois types d'excitation :

- 1° Excitation en *série* ;
- 2° Excitation en *dérivation* ;
- 3° Excitation *composée* ou *compound*.

206. Excitation en série. — 1° **Définition**

et montage. — Dans ce système, les bobines des inducteurs

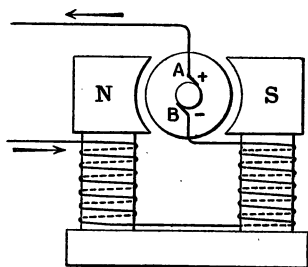


Fig. 161. — Excitation en série.

1. Il est évident qu'il y a un sens convenable de rotation pour l'amorçage, c'est celui qui correspond au sens du flux rémanent. La position des balais indique par leur décalage le sens qu'il faut employer.

portent un fil assez gros et de faible longueur ; *ce fil et tous les appareils d'utilisation sont montés en série* et, par suite, sont traversés par le même courant.

La figure 161 montre le montage des fils. La résistance s des inducteurs doit être faible pour que l'excitation ne prenne qu'une fraction sI^2 assez petite de la puissance, c'est pour cette raison que le fil inducteur est gros et court. L'intensité du courant I dans les inducteurs et dans le circuit est

$$I = \frac{E}{r + s + R}$$

formule dans laquelle r est la résistance de l'induit (¹), s celle des inducteurs et R celle du circuit extérieur ;

2° **Amorçement.** — Il est évident que la *dynamo-série ne s'amorce pas en circuit ouvert* puisqu'il ne passe pas de courant dans les inducteurs. De plus, elle ne s'amorce pas, non plus, si le circuit a une trop grande résistance. Si l'on ferme la machine sur une grande résistance, le courant dans les inducteurs est trop faible pour que la machine donne sa f. é. m. de régime ; si l'on diminue progressivement cette résistance, le volt-mètre, réuni aux bornes, monte d'abord très peu puis, brusquement, à partir d'une certaine *résistance critique*, le voltage monte à une valeur voisine de la valeur de régime. Si l'on continue à diminuer la résistance, le courant croît mais, à partir d'une certaine valeur, le voltage aux bornes diminue. C'est ce que montre nettement la caractéristique.

3. **Caractéristique.** — *Supposons la machine animée d'une certaine vitesse*, et mesurons, à l'aide d'un volt-mètre, le voltage V aux bornes (²) et, à l'aide d'un ampèremètre, l'intensité I du courant. En faisant varier la résistance à l'aide d'un rhéostat, nous pourrions mesurer un certain nombre de valeurs de I et les valeurs correspon-

1. Dans une machine bipolaire cette résistance est $1/4$ de la résistance de tout le fil enroulé sur l'induit. En effet, nous avons vu que les deux moitiés d'anneau fonctionnent comme si elles étaient montées en quantité, la résistance de l'ensemble est donc la moitié de celle d'un demi-anneau.

2. Il s'agit, évidemment, de la différence de potentiel aux bornes et non de la f. é. m.

dantes de V . On aura, ainsi, les données nécessaires pour construire, par points, une courbe que l'on appelle la *caractéristique externe* de la machine. Cette courbe part du point A (fig. 162); la longueur OA représente la f. é. m. très petite due au magnétisme remanent. Dans la région AB qui correspond à une intensité de courant inférieure à une certaine valeur I_1 la marche est instable car, si pour une raison quelconque, la résistance du circuit augmente (extinction d'une lampe montée en dérivation par exemple), le courant diminue, il en est de même du voltage comme le montre la courbe et la machine tend à se désamorcer.

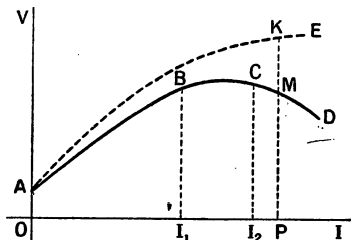


Fig. 162.

Caractéristique d'une dynamo-série.

Dans la région BC, le voltage aux bornes varie peu avec l'intensité, la machine aurait un potentiel constant quelle que soit la résistance extérieure, mais cette région est trop peu étendue pour être utilisable avec sûreté.

Dans la troisième région CD, la caractéristique est plongeante, c'est la région utilisée car, dans cette région, la machine est *autorégulatrice*, dans une certaine mesure. En effet, supposons que nous utilisions le point M, c'est-à-dire que nous ayons un voltage représenté par MP et une intensité mesurée par OP (la résistance extérieure est alors égale, d'après la loi d'Ohm, à $R = \frac{V}{I} = \frac{MP}{OP}$).

Si nous augmentons l'intensité (par une diminution de résistance) le voltage baisse, ce qui empêche l'intensité de s'élever à une valeur trop grande. Inversement, si l'intensité diminue (augmentation de résistance), le voltage croît, ce qui s'oppose à une trop grande baisse de l'intensité et la machine ne se désamorce pas. On devra donc utiliser la machine (pour la vitesse considérée) avec un courant supérieur à I_2 mesuré par OI_2 (ou avec une résistance plus petite que $\frac{CI_2}{OI_2}$).

REMARQUE I. — La courbe AE représente la variation de la f. é. m. de la machine en fonction du courant I d'excitation, cette courbe est toujours croissante et tend vers une valeur limite qui est atteinte lorsque les inducteurs sont saturés. Cette courbe ressemble aux cour-

bes d'aimantation. La longueur KP représente la f. é. m. qui correspond à une intensité I mesurée par OP; la longueur MP mesure, pour la même intensité, le voltage aux bornes en circuit fermé. La différence $KP - MP = KM$ mesure la chute de tension dans l'induit. La chute de tension dans l'induit (chute ohmique) est égale à rI , r étant la résistance de l'anneau. C'est parce que le produit rI augmente avec I que la courbe ABCD plonge dans la partie CD.

REMARQUE II. — Pour d'autres vitesses, on trouverait d'autres caractéristiques, elles se placeraient au-dessus de ABCD pour des vitesses plus grandes.

4° **Régulation.** — On peut régler la marche d'une dynamo-série en utilisant un *rhéostat de champ*; ce rhéostat est monté en dérivation sur le fil des inducteurs. Cet appareil permet de faire varier l'excitation. Si l'on met peu de résistance au rhéostat, il passe peu de courant dans les inducteurs, la f. é. m. est faible; si l'on augmente la résistance du rhéostat, le courant passe de préférence dans les inducteurs et l'excitation est augmentée ainsi que le voltage de la dynamo.

207. **Inconvénients et avantages.** — *Usages.* — La dynamo-série est peu utilisée bien que sa construction soit simple (à cause des inducteurs où il y a peu de fil) :

1° Elle ne s'amorce pas en circuit ouvert et se désamorce pour une trop grande résistance;

2° La mise en court-circuit, pendant le fonctionnement, a pour résultat la production d'un courant très intense puisque la résistance totale qui reste (induit et inducteurs) est faible : l'induit peut être brûlé;

3° La dynamo-série ne permet pas de charger facilement une batterie d'accumulateurs.

En effet, si on la fait communiquer avec une batterie pendant la période de fonctionnement où sa f. é. m. est plus petite que celle de la batterie, ce sont les accumulateurs qui fournissent du courant à la dynamo dont les *pôles s'inversent* et la batterie se décharge en faisant tourner la dynamo qui fonctionne comme réceptrice. Dans la figure 163, les flèches en trait plein représentent le courant de la dynamo; lorsqu'elle charge les accumulateurs et les flèches ponctuées, le courant inverse des accumulateurs.

On peut cependant charger une batterie en ne la mettant dans le circuit que lorsqu'on a réalisé avec la machine, fermée sur une résistance convenable, une f. é. m. plus grande que celle de la batterie ; mais, dans ce cas, il faut une surveillance attentive, car, si le voltage de la machine vient à baisser, pour une raison quelconque et à prendre une valeur inférieure à celui de la batterie, on retombe sur l'inconvénient du renversement des pôles. On peut éviter cet inconvénient avec un *disjoncteur* : mais la solution n'est plus simple. On charge les accumulateurs avec des dynamos en dérivation.

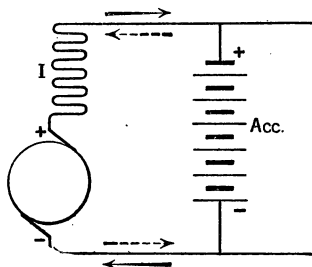


Fig. 163. — Charge d'une batterie d'accumulateurs par une dynamo-série.

4° Les dynamos-série permettent de réaliser des voltages élevés et peuvent s'employer pour les transmissions d'énergie par courant continu. On peut aussi les utiliser pour produire un travail très régulier mais les inconvénients signalés plus haut leur font préférer, le plus souvent, les dynamos en dérivation.

208. **Dynamo excitée en dérivation.** — 1° **Définition et montage.** — De chaque balai (fig. 164), partent

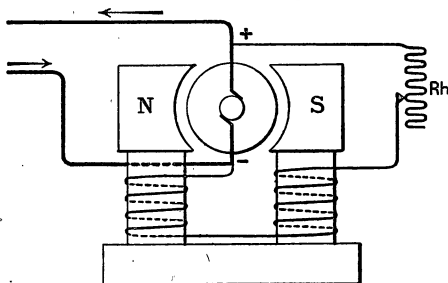


Fig. 164. — Excitation en dérivation.

deux fils ; l'un, fin et long, est enroulé autour des noyaux de

l'inducteur ; l'autre est le fil de la ligne d'utilisation. On voit que le *circuit des inducteurs est en dérivation* sur le circuit principal.

On prend pour les inducteurs du fil très fin et très long pour que leur résistance soit grande par rapport à celle du circuit extérieur de manière à ne faire passer dans les bobines qu'une fraction assez petite du courant ; on diminue ainsi les pertes par effet Joule dans les inducteurs (voy. exercices, le calcul des intensités dans les différentes parties du circuit).

2° **Amorçement.** — La dynamo-dérivation, aussi appelée *dynamo-Shunt*, s'amorce en circuit ouvert, elle s'amorce mieux que dans le cas où il y a un circuit extérieur, puisque, en l'absence de celui-ci, tout le courant dû au magnétisme rémanent passe dans les inducteurs. On amorce d'ailleurs généralement cette machine en circuit ouvert et on n'utilise le courant que lorsque la f. é. m. a une valeur suffisante. La machine ne s'amorce pas si l'on réunit les balais par une faible résistance car tout le courant passe dans cette résistance faible et presque rien dans les inducteurs. Pour la même raison, *la machine en marche cesse de fonctionner et se désamorce si l'on diminue*

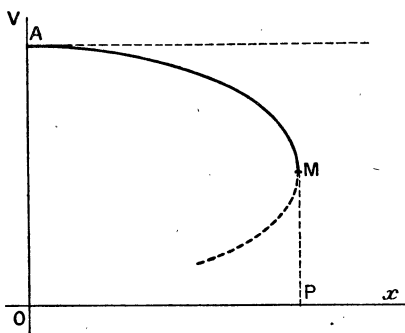


Fig. 165.

Caractéristique d'une dynamo-dérivation.

trop la résistance du circuit. Un court-circuit ne présente pas d'autres inconvénients que le désamorçement et l'arrêt de la dynamo.

3° **Caractéristique.** — La figure 165 représente la caractéristique externe d'une dynamo-dérivation. La courbe se construit par points comme précédemment. On voit que le voltage aux bornes

est maximum lorsqu'il n'y a pas de courant dans le circuit extérieur,

c'est-à-dire quand le circuit est ouvert. A mesure que la résistance extérieure diminue et que l'intensité du courant augmente dans ce circuit extérieur, le point figuratif du voltage se déplace de A vers M. Pour une intensité mesurée par OP, le voltage est égal à MP. A partir de cette intensité, si l'on diminue encore la résistance, la courbe revient en arrière, ce qui montre que, à partir de ce point, le voltage et l'intensité diminuent à la fois et la dynamo se désamorce. La plus petite résistance à employer, pour la vitesse qui correspond à la courbe, est mesurée par le quotient $\frac{MP}{OP}$. Pour des vitesses plus grandes, on a des courbes analogues placées au-dessus de la précédente.

4° Régulation. — Rhéostat de champ (ou d'excitation). — Pour maintenir à peu près constant le voltage aux bornes de la dynamo, il suffit de faire varier la résistance du circuit d'excitation, à l'aide d'un *rhéostat de champ* Rh (fig. 164) qui est monté en série sur ce circuit. Supposons que le débit augmente par suite d'une diminution de résistance, le voltage diminue ; pour le rétablir on diminue la résistance sur le rhéostat de façon à augmenter le courant d'excitation. Il faut remarquer que le circuit des inducteurs ne doit jamais être coupé à cause de la grande self de ses bobines ; le courant de rupture pourrait occasionner des étincelles dangereuses pour les spires de l'inducteur. Aussi, le rhéostat de champ n'a pas de plot mort.

5° Avantages et inconvénients. — Usages. — La dynamo-dérivation est la plus employée, surtout dans les stations centrales où l'on dispose d'un personnel de surveillance qui, par la manœuvre du rhéostat de champ, maintient constante l'indication du voltmètre réuni aux bornes de la machine. Cette dynamo présente, en effet, les avantages suivants :

1° Amorçement en circuit ouvert ;

2° Un court-circuit ne présente pas de danger pour la machine ; il y a simplement arrêt ;

3° La dynamo-dérivation se prête aisément à la charge d'une batterie d'accumulateurs lorsque sa f. é. m. est devenue suffisante ;

Il est facile de voir (fig. 166) que si la f. é. m. de la batterie est plus grande que celle de la dynamo, le courant (flèche ponctuée) envoyé par les accumulateurs traverse l'inducteur dans le même

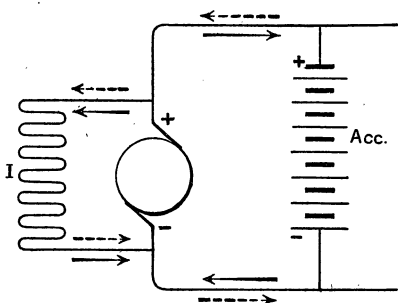


Fig. 166. — Charge d'une batterie par une dynamo-dérivation.

sens que le courant d'excitation. Les pôles ne se renversent pas et la machine continue à produire du courant de même sens qui s'oppose au courant de décharge de la batterie; il suffira d'augmenter la vitesse de la dynamo ou d'agir sur le rhéostat pour rétablir le régime de charge.

dérivation c'est d'exiger une surveillance pour le réglage de l'excitation, ce qui est une gêne dans les petites installations. Cette machine se prête difficilement à la production de f. é. m. élevée à cause de la difficulté d'isolement des bobines à fil fin des inducteurs.

209. Excitation Compound.

1° Définition.

Montage. — Les bobines des inducteurs portent deux circuits : l'un, à fil gros et court, est en série avec le circuit d'utili-

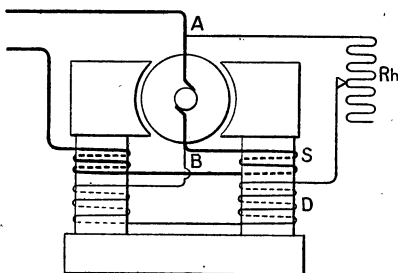


Fig. 167. — Excitation composée.

lisation; l'autre, à fil fin et long, est mis en dérivation. Ce dernier circuit peut avoir son origine sur les balais, c'est alors ce qu'on appelle la *courte dérivation* ou bien, on met l'une des extrémités à l'un des balais et l'autre à l'extrémité de l'excita-

4° Le seul incon-

véniement de la dynamo-

tion-série; c'est la *longue dérivation*. La courte dérivation est la plus usitée. La figure 167 montre le montage en courte dérivation avec le rhéostat de champ sur l'excitation shunt (dérivation). Les deux circuits d'excitation sont placés sur les noyaux, l'un à la suite de l'autre; on peut aussi les superposer mais cette disposition est moins commode pour les réparations.

2° **Avantages et inconvénients.** — **Usages.** —

Cette machine possède à la fois les propriétés des deux autres modes d'excitation; elle est surtout construite dans le but d'obtenir un voltage à peu près constant aux bornes. En effet, nous avons vu que, dans une dynamo-shunt, le voltage diminue quand on augmente l'intensité, le contraire se produit pour la dynamo-série (si l'on n'est pas dans la partie plongeante de la caractéristique). On comprend donc que, si l'on a proportionné convenablement la longueur des deux circuits d'excitation, il peut y avoir compensation et, entre certaines limites de variation du courant utilisé, le voltage aux bornes est à peu près indépendant de l'intensité. Ces machines sont utilisées dans les petites installations privées; elles dispensent de la surveillance constante qu'exige une dynamo-shunt; mais, dans les usines centrales, on préfère ces dernières car la régulation de la machine compound n'a lieu automatiquement que dans certaines limites. On utilise aussi les dynamos compound pour les applications qui donnent lieu à des variations brusques du courant; par exemple, pour la traction électrique. Les variations brusques qui se produisent aux arrêts et aux démarrages des voitures seraient difficilement suivies par le surveillant d'une machine en dérivation.

La dynamo compound ne peut servir facilement à la charge d'une batterie d'accumulateur; à cause de son excitation en série il pourrait y avoir dans certains cas, si l'excitation-série l'emportait sur l'excitation-shunt, renversement des pôles de la machine comme cela a été expliqué plus haut.

Remarque. — *Dynamo hypercompound.* — Si l'on donne à l'excitation série une certaine prépondérance sur l'excitation shunt, le voltage croît légèrement lorsque l'intensité augmente de sorte que le voltage entre deux points plus ou moins éloignés sur la ligne reste fixe, cette disposition est employée pour la traction

électrique. L'augmentation de voltage aux bornes est compensée, dans ce cas, par la chute de tension en ligne.

210. Puissance et rendement d'une dynamo. — La puissance disponible aux bornes d'une dynamo est égale au produit du voltage aux bornes par l'intensité du courant :

$$P_{\text{watts}} = V \times I = \frac{V I}{1000} \text{ k. w.}$$

Cette puissance dépend donc du courant demandé à la machine — c'est ce qu'on exprime en disant que la puissance dépend de la *charge*. — Mais, d'après sa construction, la machine possède une puissance disponible pour laquelle son rendement est le plus avantageux; c'est cette puissance qu'indiquent les constructeurs.

Le *rendement industriel* d'une dynamo est égal au quotient de la puissance de la machine par la puissance mécanique dépensée par le moteur.

$$\text{rendement} = \frac{\text{puissance disponible aux bornes}}{\text{puissance dépensée par le moteur}} = R$$

La mesure du rendement comporte la détermination des deux termes de la fraction. Le numérateur est facile à évaluer; il est égal à $V \times I$: il suffit de mesurer V au voltmètre et I à l'ampèremètre.

Certains appareils appelés *dynamomètres de transmission* permettent de mesurer la puissance transmise par une courroie et, par suite, d'évaluer le dénominateur; mais ces appareils mécaniques ne sont pas très précis. On préfère mesurer le rendement d'une dynamo en évaluant les pertes; ce sont :

- 1° La perte par effet joule dans les inducteurs;
- 2° — — — dans l'induit;
- 3° Les pertes dans la masse de fer de l'induit par hystérésis, et courants de Foucault (on diminue ces pertes par l'emploi de tôles spéciales et en feuilletant l'induit);
- 4° Les pertes dues aux frottements divers.

On a évidemment :

$$\text{rendement} = \frac{\text{puissance disponible}}{\text{puissance disponible} + \text{pertes}}$$

Variation de rendement. — L'expérience prouve que le rendement est faible si l'on utilise la dynamo sous une *faible charge*, c'est-à-dire si on lui demande un courant beaucoup plus petit que celui pour lequel elle est construite. Le rendement croît jusqu'à la pleine charge et peut atteindre pour les grosses machines 95 pour 100. Il n'y a guère d'appareils transformateurs d'énergie donnant un aussi bon rendement, les machines mécaniques ont toujours un rendement plus petit. On retiendra de ces notions qu'*il y a toujours avantage à utiliser une dynamo au voisinage de la charge pour laquelle elle est construite.*

211. Quelques mots sur la construction des dynamos. — Cette construction est faite, actuellement, dans de grandes usines et toutes les pièces d'un même modèle sont faites mécaniquement et avec précision de façon à être interchangeables, ce qui rend facile le montage et les réparations. Cette construction mécanique ne s'applique d'ailleurs qu'aux induits en tambour, les induits à anneau n'étant plus employés que pour les petites machines.

Matériaux employés. — 1° *Les métaux magnétiques*; on utilise la fonte pour les socles des dynamos, l'acier doux pour les carcasses et les noyaux des inducteurs. Pour les induits on prend des tôles de fer ou d'acier doux fabriqués spécialement de manière à avoir un très faible coefficient de perte par hystérésis;

2° *Les conducteurs* sont en fils de cuivre — quelquefois des barres — isolés avec du coton imprégné de vernis; les différentes sections sont en outre isolées avec de la toile imprégnée aussi de vernis;

3° *Les isolants*; on utilise le *mica* pour séparer les touches des collecteurs. La *micanite* (mélange de mica en lames très fines et de gomme laque) est un isolant précieux parce qu'on peut le mouler; la *fibres* (produit préparé avec la cellulose), le *papier*, les *verniss* divers, etc.

Construction des induits en tambour. — Les disques de tôle sont découpés en cercles de la grandeur voulue, puis on y pratique l'orifice central et on y découpe, à l'aide d'une machine à

diviser, les encoches qui formeront les cannelures. Les disques sont ensuite vernis et séchés. On les monte sur l'arbre, en plaçant une règle dans une série d'encoches et on les maintient entre deux flasques de fonte que l'on serre fortement à l'aide d'une presse hydraulique. Des canaux de ventilation sont pratiqués dans la masse de l'induit pour

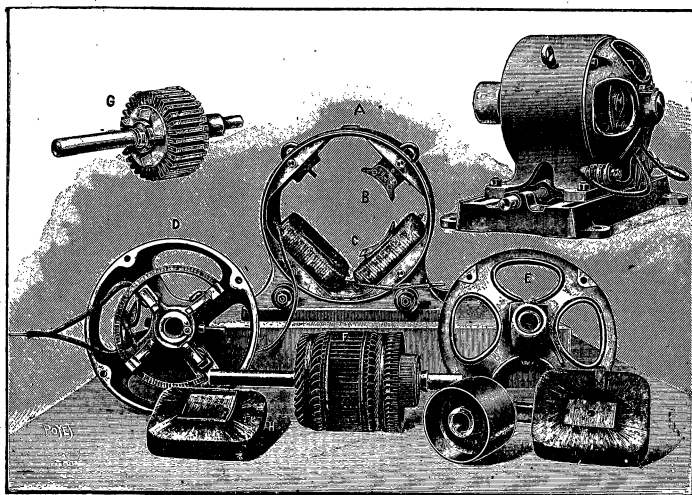


Fig. 168. — Construction d'une dynamo tétrapolaire. G, induit denté avant la pose des sections; F, induit avec son fil monté; A, carcasse des inducteurs; B, pièce polaire nue; C, pièces polaires garnies de leurs bobines excitatrices; H, bobine d'inducteur non montée; D et E, flasques avant et arrière. La machine montée est représentée en haut et à droite (cliché emprunté au journal *La Nature*, 1902).

le refroidissement. Les sections, préalablement bobinées sur des gabarits, sont montées dans les encoches et isolées.

Collecteur. — Des lames sont découpées dans des barres de cuivre et montées entre deux manchons coniques en acier. Elles sont isolées entre elles, et des manchons, par des lames de mica (ou de micanite). Le tout, fortement serré par un écrou, est solidement claveté sur l'axe.

Les inducteurs sont formés d'une carcasse en acier coulé à l'intérieur de laquelle on fixe à des distances égales les noyaux des pôles inducteurs, à l'aide de vis. Les bobines inductrices sont enroulées mécaniquement sur des gabarits en bois ; il suffit de les placer autour des pièces polaires.

La légende de la figure 168 explique sommairement la construction d'une machine tétrapolaire.

212. Choix et installation d'une dynamo. — Le choix d'une dynamo dépend du voltage qu'on se propose d'employer, car la plupart des appareils récepteurs (les lampes en particulier) sont construits pour un voltage donné. Le voltage étant choisi, il faut tenir compte de la puissance dont on a besoin et majorer le chiffre de 10 à 15 pour 100 pour les pertes sur la ligne. Le mode d'excitation est presque toujours l'excitation en dérivation sauf les cas spéciaux indiqués plus haut. Le moteur doit être d'une puissance un peu supérieure à celle de la dynamo.

Cette dernière doit être placée dans un endroit froid et sec, montée sur des glissières qui reposent sur un bâti très solide dont les fondations sont en béton. Les glissières sont indispensables pour pouvoir régler la tension de la courroie qui relie la poulie de la dynamo au moteur. Ce mode de liaison étant le plus commun. Dans certains cas, on peut réunir l'arbre du moteur à celui de la dynamo à l'aide de manchons d'accouplement ou de joints divers ; cette disposition n'est possible qu'avec les machines dont le nombre de tours par minute n'est pas trop grand, ce qui est le cas des multipolaires. On trouve aussi dans l'industrie des *groupes électrogènes* comprenant dynamo et moteur (ordinairement à essence ou à gaz) accouplés.

213. Essais préliminaires. — Mise en marche. —

1° Essai de conductibilité. — Il est bon de vérifier que le fil de l'induit n'a pas d'interruptions ; à cet effet, on détache les fils des inducteurs et l'on réunit les balais à un circuit contenant une pile et un ampèremètre. En faisant tourner l'induit, la déviation doit être toujours la même, indiquant que les différentes parties sont en bon état. On vérifie d'une manière analogue le circuit des inducteurs.

2° Isolement. — Il faut vérifier l'isolement avec la masse de la machine. A cet effet, on forme un circuit contenant une source électrique à f. é. m. suffisante (batterie d'accumulateurs ou une autre dynamo) et un voltmètre qui sert de galvanomètre à grande résistance. L'un des bouts du circuit est fixé à l'une des bornes de la dynamo que l'on a séparée de son circuit de ligne ; l'autre bout du circuit est appliqué sur la masse métallique de la machine, l'arbre par

exemple. — Supposons qu'on lise i sur l'instrument; cette quantité est proportionnelle à l'intensité du courant. Réunissons ensuite les deux bouts du circuit aux bornes de la source comme si on voulait mesurer son voltage; soit i' la lecture: ce nombre est proportionnel à l'intensité du courant à travers le voltmètre de résistance R (on néglige la résistance de la source parce que R est très grand, plusieurs milliers d'ohms). La loi d'Ohm donne :

$$f. \text{ é. m. de la source} = Ri' = (R + x) i$$

x étant la résistance d'isolement; d'où l'on tire

$$x = R \frac{i' - i}{i}$$

Supposons que $R = 5000$ ohms, $i = 2$, $i' = 120$ on a,

$$x^{\text{ohms}} = 5000 \times \frac{120 - 2}{2} = 5000 \times 59 = 295\,000 \omega.$$

Cet isolement est considéré comme suffisant s'il vaut environ 1000 fois la f. é. m. que doit donner la dynamo, ainsi pour une dynamo à 110 volts il faut au moins 110 000 ohms. Si l'isolement n'est pas suffisant, cela peut tenir à l'humidité qui recouvre les différentes parties de la dynamo, surtout si elle vient de supporter un transport. On peut sécher la dynamo en la mettant en marche et en lui faisant débiter un courant un peu supérieur à son courant normal. La chaleur dégagée, pendant un temps suffisant (2 à 3 heures), sèche les diverses parties. On pourra recommencer ensuite l'épreuve d'isolement.

3° **Mise en marche**⁽¹⁾. — Bien s'assurer que tout est en place; nettoyer avec soin le collecteur et voir si les balais s'appliquent bien sur toute la surface du collecteur que l'on fait tourner. Éviter les poussières métalliques qui mettraient les touches en court-circuit, s'assurer du graissage et ne pas avoir dans le voisinage des outils en fer qui pourraient être attirés par la machine et occasionner des accidents. Nous supposerons qu'il s'agit d'une dynamo-dérivation: on mettra le moteur en marche progressivement (ouverture de la valve de vapeur); si la machine s'amorce le voltmètre monte rapidement à son voltage normal et l'on met successivement les différents circuits en communication avec la dynamo en agissant, s'il y a lieu, sur le

1. Les renseignements donnés sommairement dans ce chapitre ne sauraient remplacer ceux que l'on peut trouver à l'atelier, aussi il a paru suffisant de les donner brièvement.

rhéostat de champ pour maintenir le voltage. On changera le calage des balais s'il se produit des étincelles importantes.

Il peut arriver, pour une machine neuve, qu'elle ne s'amorce pas : s'assurer que toutes les communications sont bien établies et les contacts serrés (en particulier ceux du voltmètre); si l'amorçement ne se fait pas, cela peut tenir à l'insuffisance du magnétisme rémanent des inducteurs. Envoyer dans ceux-ci le courant d'une pile ou autre machine. Une machine qui est utilisée régulièrement conserve toujours assez de magnétisme rémanent.

214. Surveillance et arrêt. — Si la dynamo est en bon état, la surveillance pendant la marche consiste à suivre les indications du voltmètre et de maintenir le voltage constant à l'aide d'un rhéostat de champ ou en faisant varier la vitesse du moteur.

Il faut surveiller, également, l'ampèremètre, le graissage et l'échauffement des différentes parties de la dynamo; une élévation locale de température indique un défaut.

Si pendant la marche le voltage vient à baisser, et qu'il se produise de fortes étincelles aux balais, c'est qu'il y a peut-être une rupture dans le fil de l'induit. Il faut stopper et étudier l'induit. Un court-circuit dans la ligne produirait le même effet, mais on est à l'abri de cet accident à cause des coupe-circuit de protection.

Pour arrêter la dynamo, on supprime successivement les différents circuits qu'elle alimente; on réduit l'excitation en portant le rhéostat à la résistance maxima, puis on diminue la vitesse du moteur jusqu'à l'arrêt. Il est bon de relever les balais et nettoyer le collecteur.

EXERCICES

1. Une dynamo-série donne un courant de 12 a. dans son circuit extérieur. La résistance du fil entier de l'induit est $3 \omega, 2$, celle du circuit des inducteurs est 1ω et la résistance du circuit d'utilisation est $9 \omega, 1$. Calculer la f. é. m. et le voltage entre les balais.

R. $121^{\circ}, 2$ et $130^{\circ}, 8$.

* 2. Une dynamo-dérivation a pour f. é. m., à circuit ouvert, 120 v. La résistance de l'induit, mesurée entre les balais, est $0 \omega, 8$, celle du circuit des inducteurs 20ω ; celle du circuit extérieur 5ω . Calculer les intensités dans les différentes parties du circuit.

R : anneau $12^{\circ}, 5$ pour chaque moitié (en tout 25°)
 inducteurs, 5°
 circuit extérieur, 20 .

Solution. — On applique les règles de Kirchoff sur les courants dérivés. Soient x l'int. dans une moitié de l'anneau, y dans les inducteurs et z dans le circuit. On a, à chaque balai, les équations :

$$(1) \quad 2x = y + z$$

On forme un 1^{er} circuit fermé avec le circuit extérieur et une moitié d'anneau, la f. é. m. est 120^v, et l'on a :

$$(2) \quad 120 = 1,6x + 5z.$$

(La résistance d'une moitié d'anneau est $0,8 \times 2$). Un second circuit comprenant 1/2 anneau et les inducteurs donne :

$$(3) \quad 120 = 1,6x + 20y.$$

La résolution de ces 3 équations donne les résultats.

Généralisation. — Si on appelle R la résistance extérieure, s celle des inducteurs et a celle de l'anneau (prise entre les balais) on trouve de la même façon :

$$2x = \frac{e}{a + \frac{Rs}{R+s}}, \quad y = \frac{e}{s + a + \frac{as}{R}}, \quad z = \frac{e}{a + R + \frac{aR}{s}}.$$

*3. Une dynamo-compound a pour f. é. m., à circuit ouvert, 120 v. La résistance de l'anneau est 0ω , 8, celle de la dérivation des inducteurs est 20ω , le circuit d'utilisation est 4ω et la partie gros fil des inducteurs 1ω . Calculer l'intensité dans les différents fils.

Le problème est identique au précédent. La résistance est $4 + 1 = 5$ dans le circuit principal.

4. Une dynamo-série donne 110 v. entre ses balais, à circuit fermé, la résistance des inducteurs est 4ω , celle du circuit d'utilisation 12ω . Calculer l'intensité du courant et la f. é. m. à circuit ouvert, la résistance de l'induit étant 2ω .

Rép. 6^a,875 et 125^v,75.

5. Une dynamo-shunt alimente 80 lampes de 110 v. montées en dérivation ; chaque lampe a pour résistance 220ω , on néglige la résistance des fils de ligne. L'inducteur a pour résistance 20ω et l'induit 0ω , 4. Calculer l'intensité du courant dans les différents circuits et la f. é. m. de la dynamo à circuit ouvert.

R : Intensité pour les 80 lampes 40 a,
dans l'inducteur 5^a,5,

dans chaque moitié de l'anneau $\frac{40 + 5,5}{2}$,

f. é. m. à circuit ouvert 128^v,2.

6. Calculer en watts la puissance développée dans chacun des trois circuits précédents. Quel serait le rendement de la dynamo en supposant que

les autres pertes réunies aient une valeur égale à 2 fois la perte par effet Joule dans l'induit.

* 7. ÉVALUATION DU RENDEMENT D'UNE DYNAMO-DÉRIVATION. — On mesure :

tension aux bornes 110 v.,
 intensité en ligne 80 a.,
 intensité dans les inducteurs 1,5,
 résistance de l'induit 0ω , 1.

Pour évaluer, en bloc, les pertes dues aux frottements, à l'hystérésis, aux courants de Foucault, on fait marcher la machine comme moteur en l'excitant par un courant indépendant et l'on règle le courant pour avoir même vitesse, on admet que la dépense est à peu près égale à la somme des pertes à évaluer. On a trouvé pour voltage 111 v. et pour l'intensité du courant 4 a.

Puissance disponible	$= 110 \times 80 = 8800$ w.
Dépense pour l'excitation	$= 110 \times 1,5 = 165$ w.
Perte dans l'induit	$= 0,1 (80 + 1,5)^2 = 664$ w.
Autres pertes	$= 111 \times 4 = 444$ w.

Il suffit d'appliquer la formule du n° 212.

R. un peu moins de 0,88.

8. Une dynamo emprunte au moteur qui l'actionne une puissance de 12 HP; elle fournit un voltage aux bornes de 110 v. Quelle est l'intensité du courant dans le circuit d'utilisation sachant que son rendement est 0,90. Combien pourra-t-on entretenir de lampes montées en dérivation, ces lampes ayant une résistance de 220ω . On suppose négligeable la résistance de la ligne.

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
 COUPLAGE DES DYNAMOS
 CANALISATIONS — APPAREILS DIVERS

215. *Distribution en série.* — *Groupement en série des dynamos-série.* — Dans ce mode de distribution, tous les appareils, lampes ou moteurs, sont mis en série

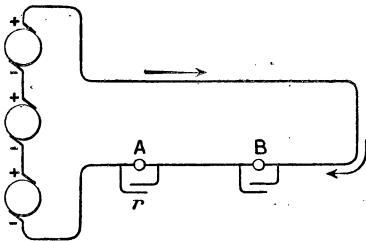


Fig. 169. — Groupement en série. Distribution à intensité constante.

dans le circuit et ils sont tous parcourus par le même courant; c'est donc une *distribution à intensité constante*. La ligne est, dans ce cas, alimentée par une dynamo-série ou par plusieurs de ces machines groupées en séries (fig. 169).

Ces dynamos sont faciles à grouper de cette façon, le pôle + de l'une est réunie au pôle — de la suivante.

Tous les appareils sont solidaires les uns des autres et si l'on veut supprimer l'un, une lampe A, par exemple, on met ses bornes en court-circuit par une résistance r très petite dans laquelle le courant passe. — Une interruption arrêterait, évidemment, tout le réseau. — La régulation, à l'usine, consiste à suivre l'ampèremètre : si le courant baisse, par suite de l'intro-

duction de nouveaux récepteurs (ce qui augmente la résistance), on augmente l'excitation par le rhéostat de champ ou bien l'on met en marche une nouvelle machine.

Cette disposition conduit à employer des tensions élevées si le nombre des récepteurs est grand, ce qui est économique, car la ligne est toujours parcourue par un courant dont l'intensité n'est pas très grande et la chaleur dégagée dans la ligne (qui est proportionnelle à i^2) est peu importante.

Mais l'emploi des tensions dépassant 5 à 6000 volts présente des dangers. Ce mode de distribution, bien qu'il présente des avantages économiques s'il s'agit de transporter l'énergie à une distance un peu grande, n'est guère employé ; aussi, nous ne l'étudierons pas davantage : le transport de l'énergie à haute tension se faisant surtout par le courant alternatif.

216. Distribution à potentiel constant ou en dérivation. — La distribution à potentiel constant est la

plus répandue et les récepteurs sont réglés pour un voltage donné (souvent 110 volts, en France). On utilise, dans ce cas, une dynamo-dérivation dont le voltage est facile à régler à l'aide de rhéo-

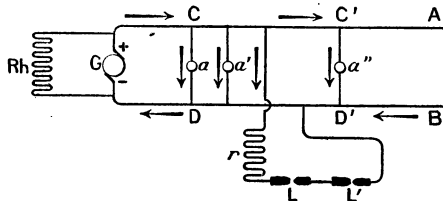


Fig. 170. — Distribution à tension constante. Les récepteurs sont montés en dérivation sur les conducteurs A et B.

stat de champ monté en série sur l'excitation. Si la charge (c'est-à-dire l'intensité demandée) du réseau est grande, on prend une machine multipolaire, plus puissante, ou l'on groupe des dynamos-dérivation en parallèle (voy. plus loin). La fig. 170 montre la distribution à tension constante : les récepteurs sont groupés en dérivation sur deux lignes de diamètre assez gros qui sont réunies aux pôles de la source. Ces câbles A et B supportent un courant dont l'intensité est égale à la somme de toutes les intensités des courants qui passent dans les dériva-

tions. Les récepteurs sont construits pour le voltage de la distribution, tel est le cas des lampes à incandescence à 110 volts $a, a' \dots$. Pour les lampes à arc L, L' , on les groupe par série de deux, car elles n'exigent qu'un voltage de 50 à 55 volts y compris une résistance auxiliaire r . Le rhéostat de champ de la dynamo est représenté en Rh . L'intensité I du courant fourni par le générateur est

$$I = i_1 + i_2 + i_3 \dots$$

La tension aux bornes des récepteurs va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne du générateur à cause de la chute de tension en ligne due à la loi d'Ohm. La tension entre $C'D'$ est plus petite qu'entre C et D , et la différence est d'autant plus grande que I est plus grand. Ceci peut présenter des inconvénients avec certains récepteurs tels que les lampes à incandescence pour lesquelles le voltage ne doit pas différer de plus de 2 à 3 pour 100 de la valeur indiquée pour leur fonctionnement. Il en résulte que, si la lampe a possède un éclat normal, la lampe a'' , si elle est un peu éloignée et si le nombre des récepteurs est grand (ce qui augmente I), éclaire mal.

217. **Distribution en boucle.** — On évite cet inconvénient par la distribution en boucle (fig. 171) qui exige une plus grande dépense de fil.

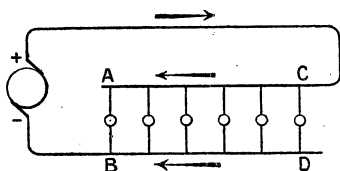


Fig. 171. — Distribution en boucle.

On voit que la première lampe est réunie au point A très éloigné sur le conducteur positif et au point B le plus rapproché de la source sur le conducteur négatif. Il y a ainsi une certaine compensation.

Lorsqu'il s'agit d'alimenter un groupe de maisons, la distribution en boucle n'augmente pas la dépense de fil (fig. 172). On a représenté aussi sur cette figure des prises secondaires en dérivation : S_1, S_2, S_3 .

218. **Distribution par feeders et distributeurs.**

— Si l'agglomération qu'il s'agit d'alimenter est un peu consi-

dérable, on dispose des conducteurs en circuit fermé $D_1, D_2, D_3 \dots$ (fig. 175), appelés *distributeurs*, sur lesquels sont branchés les dérivations secondaires (comme $S_1, S_2, S_3 \dots$ de la figure 172). Ces distributeurs sont alimentés en plusieurs points par des conducteurs appelés *feeders* (mot anglais qui signifie pourvoyeurs) $F_1, F_2, F_3 \dots$. Ces feeders arrivent à des boîtes de distributions réunies à des voltmètres placés à l'usine centrale. On règle les machines pour que le voltage soit le même à toutes les boîtes de distribution $B_1, B_2, B_3 \dots$. Les chutes de voltage entre deux boîtes seront ainsi assez petites, malgré le grand nombre de récepteurs : on peut régler les résistances des différents feeders de façon qu'elles soient égales, ce qui facilite la régulation des machines à l'usine. Si certains feeders sont très longs, on peut leur adjoindre un *survolteur*, petite dynamo en série qui élève la tension pour compenser la perte le long de ce feeder.

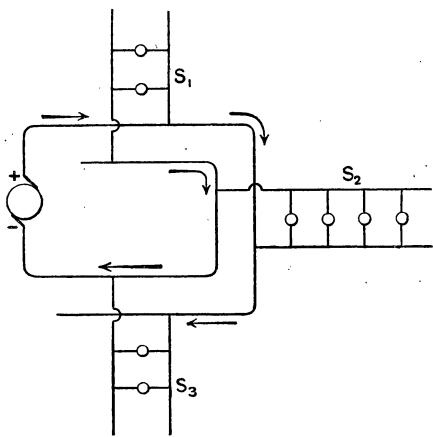


Fig. 172. — Distribution en boucle. Cas d'un groupe de maisons.

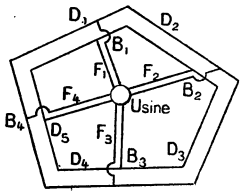


Fig. 173.

Distribution par feeders.

219. **Groupement des dynamos.** — 1° **En tension.** — Ce mode de groupement est très simple dans le cas des dynamos-série, il suffit de réunir le pôle + de la première

au pôle — de la suivante, etc. ; les f. é. m. s'ajoutent. Le groupement en série de deux dynamos-shunt présente une petite difficulté : si le courant fourni par l'une est plus grand que celui de l'autre, il peut y avoir inversion des pôles. On évite cette inversion en réunissant en série les circuits I_1 et I_2 (fig. 174) des inducteurs ;

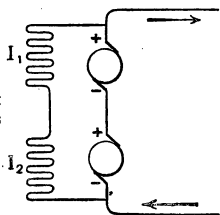


Fig. 174. — Groupement en série de deux dynamos-dérivation.

2° **Groupement en parallèle.** — C'est le plus important puisqu'il correspond à la distribution à potentiel constant. Il est évident qu'on ne peut grouper que des machines de même f. é. m. :

a) **Cas des dynamos-dérivation.** — Le groupement en parallèle ne présente aucune difficulté, on réunit les pôles de même nom entre eux. Pour la raison qui a été donnée au n° 208 (charge d'un accumulateur), il ne peut y avoir inversion des pôles. C'est là le cas le plus important puisque les dynamos-shunt sont les plus employées.

b) **Cas des dynamos-série ou des dynamos compounds.** — Le montage en parallèle, sans précaution particulière, peut amener l'inversion des pôles de l'une des machines par une raison identique à celle qui a été donnée au n° 207 (charge des accumulateurs). On évite cet inconvénient en réunissant les pôles de même nom des générateurs par un gros conducteur E (fig. 175) appelé *barre d'équilibre*. Il est facile de voir que, si le courant du générateur A devient plus intense et tend à passer dans le générateur A', il traverse l'induit A', revient au générateur A par la barre d'équilibre E sans passer dans les inducteurs S' dont la résistance est

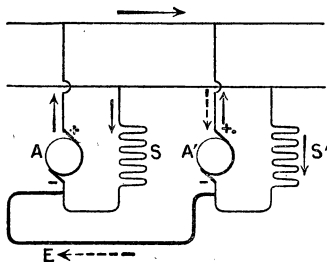


Fig. 175. — Groupement en parallèle de deux dynamos-série.

plus grande. Le courant n'ayant pas changé de sens dans l'inducteur, les pôles ne s'inversent pas et lorsque la machine A' reprend sa vitesse, elle fonctionne à nouveau en génératrice. Il faut, de même, employer une barre d'équilibre avec les machines compounds.

220. Distribution à trois fils. — Cette disposition permet d'économiser une partie des fils de la canalisation. Deux génératrices A et B, de même voltage, sont montées en série (fig. 176); trois fils partent : l'un du pôle + de A, l'autre du pôle - de B et le 3^e, appelé *fil compensateur*, part du pôle commun. Le fil compensateur est parcouru par un courant dont l'inten-

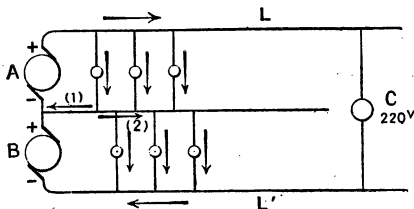


Fig. 176. — Distribution à trois fils.

sité est égale à la différence des intensités dans L et L' ; on pourra donc lui donner une faible section. Si l'on avait installé deux circuits indépendants, il aurait fallu 4 fils ayant tous une large section : on économise donc un des fils et, en outre, l'un des trois fils conservés peut être à faible section. Il ne faut pas mettre de coupe-circuit sur le compensateur ; car si ce fil venait à être coupé, on aurait une canalisation LL' à un voltage double, et si les charges des lignes L et L' sont inégales, les appareils ne seraient plus soumis à leur voltage normal : la tension serait trop grande sur la ligne la moins chargée et trop petite sur l'autre : des lampes placées sur la première pourraient être brûlées tandis que celles de la seconde éclaireraient mal.

On peut encore remarquer que, si l'on avait des récepteurs à voltage double (220 volts par exemple) il suffirait de les mettre en dérivation sur les lignes L et L'.

On peut généraliser le principe de la distribution précédente : par exemple, avec 4 dynamos à 110 volts montées en série, on pourrait avoir quatre circuits à 110 volts en employant cinq fils, les fils intermédiaires étant communs à deux circuits comme le fil compensateur de la distribution à 3 fils.

221. Emploi d'une batterie d'accumulateurs. — Batterie-tampon. — Les accumulateurs sont employés dans les installations privées et aussi dans les grandes usines pour régulariser le débit de la ligne et parer aux irrégularités du moteur et aux variations de dépense d'énergie dans le réseau. L'emploi d'une batterie (*batterie-tampon*) est indispensable pour les réseaux de traction où il se produit des variations brusques de dépense sur la ligne. On les emploie, aussi, pour utiliser plus économiquement les machines. Si celles-ci étaient seules, il faudrait qu'elles aient une puissance correspondante à la période de plus grande consommation. On peut se contenter de machines moins puissantes et les faire travailler régulièrement toute la journée ; lorsque la consommation est inférieure à la production on emmagasine l'excès dans une batterie d'accumulateurs et celle-ci vient en aide à la génératrice lorsque la consommation dépasse la production.

La batterie est toujours chargée par une dynamo-shunt, en outre on prend quelques éléments supplémentaires que l'on ajoute ou que l'on retranche successivement du circuit pour compenser la variation de voltage des accumulateurs pendant la charge ou pendant la décharge. La figure 177 montre une installation de ce genre.

G est la dynamo-dérivation avec son inducteur. BB' la batterie d'accumulateurs montés en parallèle avec la dynamo, le nombre des éléments doit être suffisant pour que, vers la fin de la décharge, le voltage de la batterie soit encore suffisant pour la ligne (environ 60 éléments pour 110 volts).

A et A' ampèremètres.

V voltmètre mesurant la tension à l'entrée de la ligne d'utilisation L.

R est un réducteur de charge qui permet d'enlever 1, 2, 3 ou 4 éléments.

R₁ est un réducteur de décharge qui permet d'ajouter les éléments pendant la décharge. Au début de la décharge de la batterie, les accumulateurs ont une f. é. m. élevée, il suffit de prendre le nombre total des éléments diminué de 4 par exemple, on met le réducteur R₁ sur le plot n° 5 ; lorsque le voltage baisse en V on ajoute un élément, puis un autre....

Les éléments supplémentaires travaillent moins longtemps que les autres, aussi, ils seront plus rapidement chargés, c'est pour cette raison qu'il y a un réducteur de charge R.

I est un interrupteur à deux directions.

C et C' sont des coupe-circuits fusibles.

D est un disjoncteur à minima; c'est un appareil qui coupe le courant lorsque son intensité devient trop faible. Il est facile de voir sur la figure le principe de cet appareil. E est un électro dans lequel passe le courant; M et N deux ressorts sur lesquels appuie un levier OP dont l'extrémité P est une masse de fer doux.

Lorsque le courant a une intensité suffisante, la force portante de E soutient le levier et le courant passe de M à N. Si le courant prend une valeur trop faible, le levier bascule autour du point O et le courant est coupé. On évite ainsi le retour du courant des accumulateurs dans la dynamo au cas où, pour une raison quelconque, diminution de vitesse du moteur par exemple, la dynamo viendrait à débiter d'une manière insuffisante. Le levier se remet à la main contre l'électro.

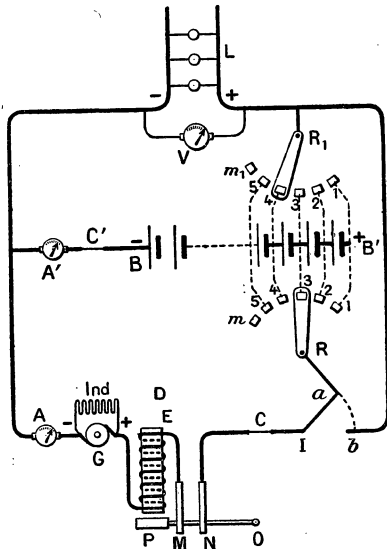


Fig. 177.

Emploi d'une batterie-tampon.

Le montage permet de réaliser les dispositions suivantes.

1° L'interrupteur I étant mis en contact avec *b*, le courant de la dynamo passe seul dans la ligne L, les accumulateurs ne sont pas mis en circuit.

2° L'interrupteur I est mis en contact avec *a*, mais le réducteur de décharge R_1 est mis sur un plot mort m_1 le courant passe seulement dans la batterie.

3° L'interrupteur étant sur *a* et le réducteur de décharge sur un plot actif, le courant passe dans la ligne et dans la batterie.

CANALISATIONS ÉLECTRIQUES

222. **Conditions générales d'installation.** — Il y a lieu de considérer trois conditions principales d'installation :

1° **Conditions de sécurité.** — Le passage du courant dégageant de la chaleur, il faut que les conducteurs ne prennent pas une trop grande élévation de température ; pour les conducteurs isolés et qui sont fixés à l'intérieur des maisons, cet échauffement peut détériorer l'isolant et même occasionner des incendies.

2° **Perte de tension en ligne.** — La chute de tension en ligne a pour conséquence une perte d'énergie qu'il faut réduire le plus possible ; de plus, le voltage aux bornes des récepteurs étant plus petit que celui des générateurs, il faut élever la f. é. m. de ceux-ci de façon à tenir compte de la perte de tension en ligne.

3° **Condition économique.** — On éviterait facilement l'échauffement et la perte de tension en prenant des conducteurs de faible résistance, ce qui conduit à utiliser des métaux de faible résistivité et des fils à large section, mais on est arrêté, dans cette voie, par le prix de l'installation.

223. **Choix du métal.** — Le tableau des résistivités des différents métaux (voy. 36) montre que, parmi les métaux usuels, le cuivre est le plus avantageux car son prix n'est pas trop élevé et sa conductibilité est presque aussi bonne que celle de l'argent. Le cuivre présente le défaut de manquer de ténacité (propriété de supporter une traction sans se rompre).

Pour cette raison, on emploie souvent des alliages de cuivre avec le silicium ou le phosphore. Le *bronze siliceux*, très employé pour les lignes téléphoniques et télégraphiques, possède une ténacité double de celle du cuivre pur tout en ayant une résistivité électrique qui n'est pas beaucoup plus grande.

On a aussi essayé l'aluminium qui a l'avantage d'être léger, bon conducteur et assez tenace.

Mais, pour les usages les plus ordinaires, le cuivre est le métal presque uniquement employé ; pour certains usages, il y

a avantage à prendre du cuivre très pur, obtenu par électrolyse : sa résistivité est très faible. On utilise aussi des câbles nus dont l'âme est un fil d'acier recouvert d'une couche de cuivre par électrolyse ; ces fils sont tenaces et bons conducteurs.

224. **Choix de la section.** — 1° Pour les installations de sonneries et de téléphones dans les maisons, il suffit de prendre du fil de cuivre de 8/10 à 9/10 de mm. de diamètre isolé par une enveloppe de gutta et un guipage de coton, ou par deux guipages de coton. Les courants employés, étant toujours très faibles, l'échauffement est négligeable ; on isole le fil pour qu'il n'y ait pas de fuites de courant.

2° Pour l'éclairage, les courants employés sont plus intenses et dépendent du nombre de lampes que le conducteur alimente.

La condition de sécurité passe avant les autres et on se conforme aux indications données par les « Chambres syndicales des industries électriques ». En particulier, pour la section, on admet :

5 ampères par	mm ² de	4 à 5	mm ²
2	—	—	5 à 50 —
1	—	au-dessus de 50 —	

La densité de courant par mm² acceptable diminue quand la section augmente parce qu'un gros fil se refroidit moins qu'un fil fin (1).

3° Lorsqu'il s'agit de transporter de l'énergie à distance par des conducteurs placés dans l'air, la condition économique prend une grande importance, la condition de sécurité n'est plus aussi rigoureuse. *Lord Kelvin* a établi une formule qui donne la section du conducteur le plus avantageux mais, ordinairement, on se fixe à l'avance la perte de tension que l'on peut accepter le long de la ligne, par exemple 5 à 10 pour 100 ; le dernier chiffre correspondant à de grandes distances (voy. aux exercices des exemples de calculs).

1. Ceci résulte de ce que la surface d'un fil augmente moins vite que le volume : si on double le rayon d'un fil cylindrique, la surface latérale (par laquelle se fait le refroidissement) est doublée tandis que le volume est quadruplé.

225. **Canalisations aériennes.** — Elles sont généralement formées par du fil nu; lorsque le diamètre dépasse 5 mm, on remplace le fil unique par une corde métallique. Le fil doit

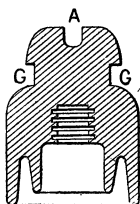


Fig. 178.

Isolateurs en porcelaine.

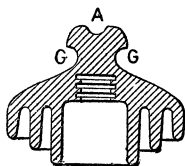


Fig. 179.

avoir une résistance suffisante à la traction et il est ordinairement fait de bronze siliceux ou phosphoreux; l'aluminium commence à se répandre mais il présente quelques difficultés pour l'assemblage des joints.

Les joints sont ordinairement faits en tordant le fil et en soudant à l'étain les parties en contact.

Les conducteurs reposent sur des isolateurs en porcelaine portés par des poteaux en bois ou en fer; quelquefois les isolateurs reposent sur des consoles fixées aux murs des maisons.

Les isolateurs les plus employés sont en porcelaine et on leur donne la forme de cloches, de façon que la partie intérieure qui est en contact avec le support soit toujours bien sèche et à l'abri de la pluie; cette précaution est encore exagérée dans les isolateurs à double ou triple cloche (fig. 178 et 179). Le fil repose dans la cavité A et on le fixe avec un fil de cuivre que l'on fait passer dans la gorge G. Lorsque le conducteur doit pénétrer à l'intérieur d'une maison, il faut le recouvrir d'une gaine isolante; de plus, l'entrée à travers le mur se fait à l'aide d'un tube de porcelaine appelé *pipe* P (fig. 180).

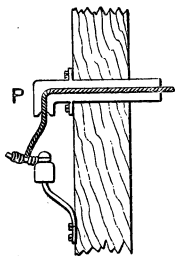


Fig. 180. — Passage d'un conducteur à travers un mur (*pipe*).

On ne doit jamais toucher directement, avec la main, un conducteur tombé à terre; il peut y avoir accident mortel si

la ligne est à haute tension. Pour éviter les accidents de chute de câbles à haute tension, on les garnit, en dessous, d'un filet protecteur lorsqu'ils passent au-dessus d'une voie de communication.

226. **Canalisations souterraines.** — Les isolants employés sont : la gutta, le caoutchouc, dont le prix est très élevé ; pour cette raison, on tend à les remplacer par du papier que l'on a trempé, à chaud, dans un mélange d'huile minérale et de résine, et par

la fibre de jute également imprégnée à chaud avec de l'huile de lin et de la paraffine. Les lignes télégraphiques ou téléphoniques sont isolées avec du ruban de

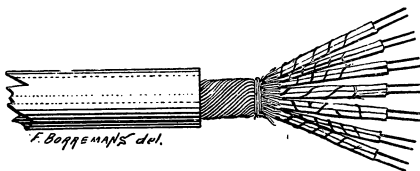


Fig. 181.

Groupe de conducteurs isolés au papier.

papier qu'on enroule autour du câble, on place un certain nombre de câbles dans un tuyau de plomb que l'on place dans les égouts (fig. 181).

Aux câbles qui doivent transporter des courants plus intenses, on donne une protection plus grande et ils présentent une certaine analogie avec les câbles sous-marins.

Les câbles, lorsqu'ils sont assez flexibles, sont logés dans des canalisations en fonte ou en poterie noyées dans le sol. Dans d'autres cas, on les loge dans un caniveau rempli de sable. Aux points de jonction, on établit des boîtes de raccord, plus ou moins compliquées, disposées au-dessous d'un regard qui permet de les visiter facilement.

227. **Vérification de l'isolement d'une ligne.** — Lorsqu'une ligne est mal isolée en un point et qu'il peut y avoir communication avec le sol, on dit, qu'en ce point, il y a une *perte à la terre*. Cette perte n'empêche pas le réseau de fonctionner ; mais, s'il se produisait, en un autre point, une seconde perte à la terre, le résultat serait équivalent à un court-circuit. Il est donc bon d'installer un *indicateur de terre*. Le plus

simple (fig. 182), se compose de deux lampes à incandescence, identiques L et L', mises en série sur les deux conducteurs. Le

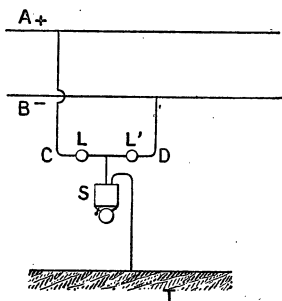


Fig. 182. — Indicateur de terre.

milieu de CD est réuni au sol à travers une sonnerie sensible S. Les lampes sont choisies de façon à briller faiblement lorsque la ligne est en bon état. Supposons qu'il y ait une perte à la terre sur le fil positif A, un courant dérivé s'établira par l'intermédiaire du sol entre le fil A et le fil B à travers la sonnerie et la lampe L'. On entendra donc le tintement de la sonnerie et la lampe L' prendra

un éclat plus vif que la lampe L. On cherchera à localiser le point faible en étudiant les différents tronçons de la ligne.

On peut aussi mesurer la résistance d'isolement de chacun des fils de la ligne; on utilise pour cette opération un appareil spécial appelé *ohmmètre*. A défaut de cet appareil, on peut employer une méthode analogue à celle qui a été donnée au n° 215 pour les dynamos. On note l'indication du voltmètre mis en dérivation sur les deux conducteurs de la canalisation soit i son indication (c'est le voltage de la ligne, mais nous considérons ici le voltmètre comme un ampèremètre à grande résistance). On supprime la communication avec l'un des conducteurs et l'on réunit à la terre (par les conduites d'eau) la borne devenue libre. La lecture du voltmètre donne i' . La résistance, si r est la résistance du voltmètre, est :

$$R = r \cdot \frac{i - i'}{i'}$$

On pourra ensuite mesurer la résistance d'isolement sur l'autre conducteur.

228. **Retour par la Terre.** — Dans les distributions d'énergie on emploie ordinairement deux fils; on pourrait cependant supprimer l'un des deux conducteurs en reliant au sol

l'un des pôles de la source et réunissant, aussi, au sol, l'extrémité du conducteur unique : la Terre remplace le fil de retour.

Lorsque cette disposition est possible, elle offre deux avantages : diminution des frais d'installation et réduction d'environ moitié de la résistance de la ligne (la Terre, comme conducteur de retour, offre une résistance négligeable). Cette disposition est appliquée dans la traction électrique avec une légère variante ; le conducteur de retour étant formé par le rail — aussi, dans ce cas les bouts de rails sont soudés ou réunis par des fils de cuivre de façon à former un conducteur continu.

Pour les canalisations ordinaires : éclairage, transport d'énergie, etc., le retour par la Terre offre de graves inconvénients dont le plus important est la variation de résistance qui se produit à chaque instant entre le sol et la plaque qui établit le contact. Pour que la communication soit bonne il faut un sol humide et il se produit des gaz par électrolyse de l'eau ; de plus, ces plaques de Terre sont très rapidement oxydées.

PRINCIPAUX APPAREILS DE MANŒUVRE ET DE SÉCURITÉ

229. *Interrupteurs. — Commutateurs.* — Les *interrupteurs* servent à faire passer le courant ou à le couper.

Les formes sont très variées. La figure 183 représente une forme très répandue. Une lame de cuivre est fixée à un manche isolant, lorsqu'on l'abaisse elle vient s'appuyer entre des lames métalliques faisant ressort (pour avoir un bon contact) ; les bouts des conducteurs dans les-

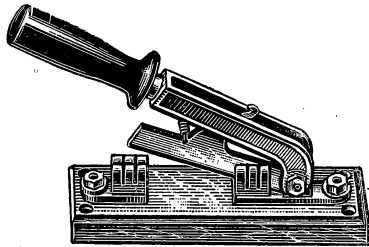


Fig. 183. — Interrupteur.

quels on veut faire passer le courant communiquent l'un avec la lame mobile, l'autre avec les ressorts. Dans d'autres modèles, le levier mobile porte deux lames placées à une certaine

distance ; lorsqu'on l'abaisse, les deux lames viennent se placer entre deux paires de ressorts ; on établit ainsi la communication

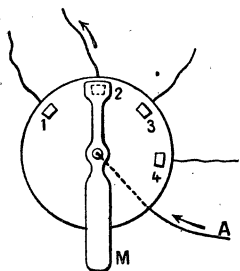


Fig. 184. — Commutateur.

dans 4 directions le courant venu de A. Il se compose de 4 plots métalliques : 1, 2, 3, 4, fixés sur un support isolant. Le courant arrive au centre ; un levier muni d'une poignée isolante M permet de diriger le courant sur l'un quelconque des plots. La figure 185 représente un commutateur à deux directions avec boîte de porcelaine, très usité dans les installations d'éclairage.

230. **Coupe-circuits fusibles.** — Ce sont des appareils de sûreté que l'on place sur les canalisations afin d'éviter qu'elles ne soient parcourues par des courants trop intenses qui pourraient occasionner des accidents aux appareils de réception ou même produire des incendies. Ces appareils sont aussi appelés, par abréviation : *plombs, fusibles* ou *sûretés*.

Ils sont composés d'un fil de plomb ou d'un alliage de plomb

sur les deux fils de la canalisation. Cet appareil est, pour cette raison, appelé interrupteur bipolaire. Il existe d'ailleurs de nombreux autres modèles ; nous en indiquerons à l'étude du télégraphe, des sonneries, etc.

Un commutateur permet de diriger le courant dans différentes directions. Le principe en est simple. La figure 184 représente un commutateur qui permet de diriger

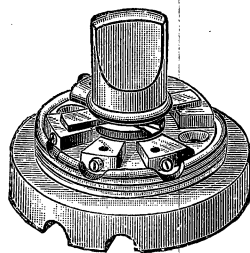
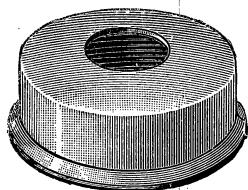


Fig. 185. — Commutateur à deux directions (éclairage).

et d'étain (1 partie d'étain pour 2 de plomb) dont le point de fusion est de 170°. Ce fil est serré, par des vis, entre deux plots métalliques qui communiquent avec les deux bouts du conducteur que l'on veut protéger. Le tout est enfermé dans un coffret mauvais conducteur et incombustible (porcelaine ou marbre).

La section du fil dépend de l'intensité du courant que l'on veut admettre dans les conducteurs ; on prend une section de fil à peu près égale à celle du fil de cuivre que l'on protège. Voici d'ailleurs quelques valeurs adoptées à la suite de nombreuses expériences, pour des fusibles en alliage de plomb-étain. Pour un courant de :

5 amp.	on emploie un fusible de 0 mm.	55 de diamètre.		
10 —	—	—	0,9	—
15 —	—	—	1,5	—
20 —	—	—	2,5	—

La longueur du fil dépend de la tension du réseau, car il faut éviter la production d'un arc entre les deux plots, après fusion. On prend 5 à 6 cm. pour 110 volts, 10 à 12 cm. pour 500 volts. Lors de la fusion, le coffret empêche les projections de métal fondu qui peut être incandescent.

Pour les fortes intensités, on emploie des lames fusibles ou un faisceau de fils.

Les coupe-circuits sont placés à l'origine des portions du réseau qu'ils doivent protéger, on doit en mettre au commencement de chaque branchement et de chaque dérivation.

Indiquons encore que l'on emploie des coupe-circuits unipolaires et des coupe-circuits bipolaires ; ces derniers portent deux fils fusibles placés à une distance suffisante ; ils correspondent aux deux conducteurs de la canalisation.

La figure 186 représente un coupe-circuit unipolaire très em-

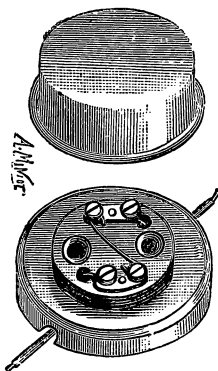


Fig. 186. — Coupe-circuit (figure empruntée au traité d'Électricité Médicale du D^r Lermoyez).

ployé dans les installations d'éclairage ; on a soulevé le couvercle de porcelaine pour laisser voir le fil fusible.

231. Disjoncteurs. — Nous avons donné le principe d'un disjoncteur à minima (fig. 177) ; cet appareil, comme nous avons vu, interrompt le courant lorsque son intensité devient inférieure à une certaine quantité.

Le disjoncteur à maxima coupe le courant lorsque son intensité prend une valeur supérieure à une grandeur fixée

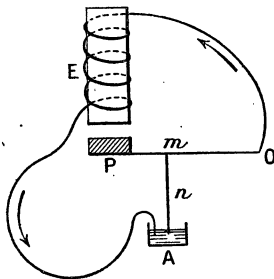


Fig. 187. — Principe du disjoncteur à maxima.

d'après sa construction. Il pourrait remplacer les coupe-circuits, mais il est plus compliqué et plus coûteux. Le principe de l'appareil à maxima est analogue à celui du disjoncteur à minima.

E (fig. 187) est un électro dans lequel passe le courant ; les deux bouts du fil sont réunis : l'un, au point fixe O, l'autre à un godet A qui contient du mercure ; OP est un levier mobile autour de O et portant en P une masse de fer doux ; mn est une pointe conductrice qui plonge dans le mercure. Tant que le courant n'a pas une intensité suffisante pour que la masse de fer P soit attirée par l'électro, le courant circule dans le sens des flèches. Si l'intensité prend une valeur suffisante, P est attiré et la pointe mn sort du mercure, le courant est coupé. Les appareils que l'on veut protéger sont mis en série entre l'électro et le godet A.

232. Parafoudres. — Ce sont des appareils protecteurs pour les lignes aériennes ; ils ont pour but de préserver les appareils au cas où la foudre viendrait à frapper directement la ligne ; mais, dans ce cas, ils ne sont pas d'une efficacité absolue. Leur rôle est plutôt de préserver les appareils contre les décharges induites qui se produisent fréquemment lorsque des nuages orageux passent au-dessus des lignes électriques ⁽¹⁾.

1. Ces décharges induites ont pour cause l'influence électrostatique

Ces appareils sont placés en avant des groupes de machines ou de récepteurs; il faut en mettre sur chacun des deux fils conducteurs.

Pour les voltages modérés — au-dessous de 500 volts — on emploie, le plus souvent, un parafoudre à pointes de charbon (fig. 188). Deux crayons de charbon A et B, sont placés, pointes en regard, à une distance d'environ 5 mm. A est relié à l'un des conducteurs, B communique avec le sol par une large plaque de cuivre plongeant dans la terre humide. Entre les machines à protéger et le parafoudre, on a mis quelques tours de fil S de façon à donner en cet

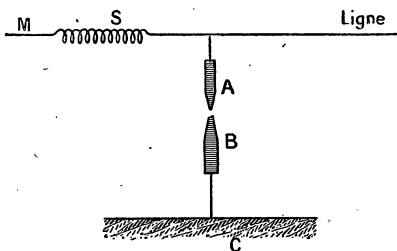


Fig. 188.
Parafoudre à pointes de charbon.

endroit, une certaine self-induction au conducteur. Si une décharge électrique se produit sur la ligne, sa tension est assez élevée pour franchir l'espace AB et l'électricité va au sol. La décharge suit de préférence ce chemin bien qu'il ait une grande résistance ohmique à cause de la self S, car les décharges très brusques, comme celles des orages, éprouvent une très grande difficulté à franchir un conducteur qui possède de la self-induction.

L'inconvénient de cet appareil est que la décharge atmosphérique peut allumer un arc entre A et B et cet arc est ensuite entretenu par la machine, ce qui produit une perte énorme à la terre. On arrive à éteindre cet arc dès qu'il se forme, à l'aide d'un électro placé au voisinage : cet électro étant lui-même excité par la décharge. Le champ magnétique de l'électro agit sur l'arc électrique, comme sur un courant mobile, et s'il est convenablement placé il repousse l'arc comme ferait un courant

exercée sur la ligne par le nuage électrisé; influence qui a lieu sans qu'il y ait coup de foudre proprement dit.

d'air (de là l'expression « souffler l'arc »), l'arc trop allongé s'éteint de lui-même.

Pour les hauts voltages, et en particulier pour les courants alternatifs, on emploie le *parafoudre à cornes* (fig. 189). Deux

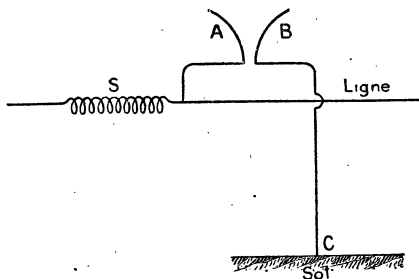


Fig. 189. — Parafoudre à cornes.

conducteurs métalliques A et B en cuivre ou en zinc, ont la forme de la figure, ils sont à une faible distance vers le bas et s'écartent de plus en plus à mesure qu'on s'élève. A est relié à la ligne à laquelle on ajoute une self S; B est relié au sol. Si

la ligne reçoit une décharge atmosphérique, elle s'écoule au sol par BC. Ordinairement, un arc s'allume à la base des cornes; mais, à cause du courant d'air chaud qu'il produit lui-même, l'arc s'élève et il est obligé de s'allonger de plus en plus jusqu'à ce qu'il s'éteigne. Dans certains cas, on a observé des arcs produisant une flamme de plus de 1 mètre de haut et éclatant avec le bruit d'une arme à feu.

EXERCICES

1. Calculer la perte en ligne, pour la transmission suivante à 2 fils de cuivre : longueur 1 km, voltage au départ 120 v., diamètre du fil $1^{\text{mm}6}$, courant 60 a. — $\rho = 1,6 \cdot 10^{-6}$ pour le cuivre.

R. 8 pour 100 environ.

Il suffit de calculer la perte par effet Joule et de prendre le rapport de cette perte à la puissance du courant.

2. On veut transporter, à 5 km, une puissance de 50 HP, quelle résistance faut-il donner à la ligne pour que la perte par transmission soit 10 pour 100. La f. é. m. de la génératrice est 1840^v.

R. 9 ω , 2.

On prend 1 HP = 736 watts.

3. Calculer la section du conducteur de cuivre qui aurait 9ω , 2 de résistance et une longueur égale à 2 fois 5 km. Poids et prix de ce conducteur, densité 8,8, la tonne de cuivre vaut 2400 fr.

R. $s = 0^{\text{cm}^2}, 174$, poids = 1530 k, prix 3672 fr.

Le poids et le prix sont en réalité plus élevés car le fil, quoique bien tendu, n'est pas absolument rectiligne, il s'infléchit entre les supports à cause de son poids.

4. Même calcul si l'on remplace le cuivre par l'aluminium : $d = 2,7$, prix, 2800 fr. la tonne, $\rho = 2,4 \cdot 10^{-6}$.

5. Calculer le rapport des prix de deux lignes de même longueur, de même résistance formées de métaux différents et prouver que ces prix sont :

- 1° proportionnels aux densités;
- 2° — aux prix de la tonne;
- 3° — aux résistivités.

6. Résoudre les exercices 2 et 3, en supposant que la tension soit seulement 110 v. et comparer les résultats — *avantages des tensions élevées.*

*7. On transporte 50 HP à 4 km. sous 120 v., calculer le poids du métal de la ligne pour une perte tolérée de 6 pour 100. Reprendre la même question pour une distribution à 3 fils. On suppose le fil neutre bien équilibré (courant nul) et on lui donne une section moitié de celle des autres fils. Quelle est l'économie?

R. L'économie est 68 pour 100,

si le fil compensateur n'est parcouru par aucun courant.

Pour la distribution à 3 fils, on peut l'assimiler, pour les fils actifs à une distribution sous tension double; on calculera ainsi le poids de ces 2 fils et on ajoutera celui du fil compensateur.

CHAPITRE XVII

MOTEURS A COURANT CONTINU

233. **Réversibilité des dynamos à courant continu.** — D'après les principes généraux qui ont été exposés à l'étude de l'induction, on peut prévoir que les dynamos sont des appareils réversibles : lorsqu'on leur fournit du travail mécanique, elles fonctionnent comme générateurs d'énergie électriques ; si, au contraire, on leur fournit de l'énergie électrique, elles se mettent à tourner et transforment cette énergie en

travail mécanique ; on dit alors qu'elles fonctionnent comme *récepteurs* ou comme *moteurs*.

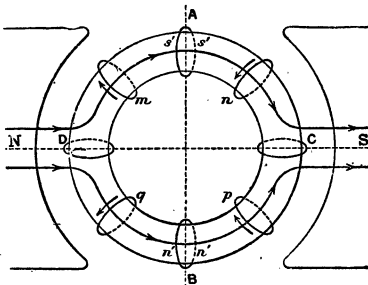


Fig. 190.

Les considérations générales exposées au n° 178 suffisent pour prévoir cette réversibilité des dynamos et, pour le vérifier expérimentalement, il suffit de réunir les balais de la machine à une source

électrique : aussitôt, on voit la dynamo se mettre en rotation. Il est bon de se rendre compte directement de cette propriété.

Supposons que le courant arrive par le balai inférieur et sorte par le balai supérieur ; nous savons que le courant se partage entre les deux moitiés de l'anneau : il va dans le sens BDA à gauche (fig. 190) et dans le sens BCA à droite. Les spires qui

sont des deux côtés sont parcourues en sens inverse. Pour simplifier la figure on n'a représenté que quelques spires et on n'a pas figuré les balais.

Rappelons que lorsqu'un courant est placé dans un champ magnétique, il se déplace de façon que le flux qui entre par sa face sud (ou négative) soit maximum. La face sud se reconnaît à ce caractère : un observateur qui la regarde y voit le courant marcher dans le sens des aiguilles d'une montre.

Ceci rappelé, il est facile de voir que, pour les spires qui sont dans la moitié gauche de l'anneau, la face sud est placée de façon qu'un observateur qui suivrait le chemin ADB traverserait les spires en entrant par la face sud et en sortant par la face nord. Les spires vont donc toutes tourner dans le sens ADB, de façon que le flux qui entre par leur face sud grandisse. L'anneau, qui fait corps avec les spires, tournera donc dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. On verrait, de même, que les spires de droite ont pour effet de produire une rotation dans le même sens. Cette rotation est d'ailleurs continue, à cause du collecteur et des balais qui maintiennent toujours le même sens du courant à droite et le sens inverse à gauche.

Il est très important de remarquer que le sens de la rotation est opposé à celui que nous avions employé pour produire, dans l'induit, un courant de même sens par induction.

Conclusion. — *Si l'on considère une dynamo dans laquelle le sens de l'excitation reste fixe, le sens de rotation de son induit, lorsqu'on l'emploie comme réceptrice, est contraire de celui qu'elle a comme génératrice, si le sens du courant dans l'induit est le même dans les deux cas.*

Autres explications. — Il sera bon de vérifier que la règle des trois doigts (main droite) conduit au même résultat. On peut encore trouver une autre explication qui sera utile à l'étude des courants alternatifs. Lorsque l'anneau est parcouru par le courant, chacune de ses moitiés peut être regardée comme un électroaimant possédant un pôle sud du côté A et un pôle nord du côté B. Cette aimantation secondaire dont nous avons parlé au n° 196 explique le décalage de la ligne neutre. Les pôles N et S des inducteurs agissent sur ces pôles secondaires $s's'$ et $n'n'$ pour faire tourner l'anneau dans

le sens inverse des aiguilles d'une montre et la rotation est continue puisque ces pôles se reforment constamment par le jeu du collecteur. Il n'y a pas à tenir compte, pour ce mouvement, des pôles produits en C et D par l'influence de l'inducteur, les actions réciproques de N sur D et de S sur C ne peuvent produire de rotation.

254. Force contre-électromotrice d'une réceptrice. — Nous avons déjà vu que, lorsqu'un courant se déplace dans un champ magnétique, il se produit une f. é. m. inverse qui n'est autre que la f. é. m. d'induction. Le sens de cette *f. c. é. m.* (force contre-électromotrice) est donné par la loi de Lenz : il est tel que cette *f. c. é. m.* tend à s'opposer à celle qui produit le mouvement. La *f. c. é. m.* n'est autre que la f. é. m. que le moteur fournirait si on le considérait comme générateur avec la même vitesse et le même flux. De sorte que, pour une machine bipolaire dont le flux utile est Φ , le nombre de spires sur l'induit N et le nombre de tours par seconde n , la *f. c. é. m.* a pour valeur :

$$e^{\text{volts}} = \frac{n N \Phi}{10^8} \quad (1)$$

Soit V la d. d. p. (diff. de pot.) supposée constante (nous ne considérons que ce cas) appliquée aux bornes du moteur, cette d. d. p. est égale à e augmentée de la chute de tension dans le moteur et si r est la résistance du moteur, prise entre ses bornes⁽¹⁾, et I l'intensité du courant qui arrive au balai d'entrée on a :

$$V = e + r I \quad (2)$$

255. Puissance. — Rendement. — Frein de Prony. — On sait que la puissance consommée entre deux points d'un circuit dont la d. d. p. est V, le courant ayant une intensité I, a pour valeur :

$$P^{\text{watts}} = V^{\text{volts}} \times I^{\text{a}} = e I + r I^2 \quad (3)$$

1. Cette résistance r est la *résistance équivalente* que l'on calculerait par les lois des courants dérivés. Dans le cas simple d'un moteur-série elle est égale à $r_1 + r_2$, r_1 étant la résistance de l'inducteur et r_2 celle de l'induit prise entre les balais.

Le dernier membre est obtenu en multipliant par I le second membre de l'équation (2). La quantité rI^2 est transformée en chaleur par effet joule (c'est de l'énergie dégradée ou dissipée en pure perte); la quantité eI correspond au travail fourni par le moteur, par seconde. Mais toute cette quantité n'est pas du travail utilisable, il y a à tenir compte des frottements, de l'hystérésis, des courants de Foucault. *On appelle rendement industriel* du moteur le quotient de la puissance qu'il peut produire sur sa poulie par la puissance dépensée aux bornes du moteur. S'il n'y avait pas de frottements, d'hystérésis, etc., le rendement serait égal à

$$\frac{eI}{P} = \frac{eI}{VI}$$

Mais le rendement industriel est plus petit, puisqu'il faut retrancher de eI les pertes indiquées plus haut; ces pertes peuvent d'ailleurs se calculer.

On détermine, plus souvent, la puissance utile à l'aide du *frein de Prony* que l'on emploie en mécanique pour la mesure de la puissance d'un moteur quelconque. Rappelons le principe de cet appareil. Il se compose (fig. 191) de deux mâchoires M et M' que l'on serre,

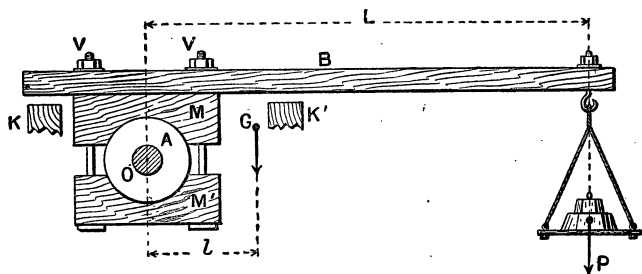


Fig. 191. — Frein de Prony.

avec des vis, sur l'arbre du moteur; ces mâchoires sont solidaires d'un levier B qui porte un plateau sur lequel on peut mettre des poids. Des battoirs K et K' limitent la course du levier. Pour mesurer la puissance du moteur sous un régime donné, on le met en marche et

l'on règle le serrage des vis V, de façon que la vitesse soit la même que si le moteur entraînait des machines; tout le travail est dépensé par le frottement — il est évident que ce travail se transforme en chaleur et l'on est obligé, pendant l'essai, d'arroser les mâchoires avec de l'eau froide. — On ajoute en outre des poids pour maintenir le levier horizontal et l'empêcher d'être entraîné par la rotation du moteur (qui a lieu en sens inverse des aiguilles d'une montre).

Cherchons le travail dépensé par le frottement en une seconde, c'est-à-dire la puissance. F étant l'effort du frottement tout le long de la surface de contact, le travail dépensé pour un tour est égal à $2\pi RF$, R rayon de l'arbre sur lequel est appliqué le frein, et si le moteur fait n tours par seconde⁽¹⁾, la puissance est

$$P = 2\pi nRF.$$

Pour évaluer F, on remarque que l'appareil est comparable à un levier mobile autour du centre du cercle, ce levier est en équilibre sous l'action de la force P mise dans le plateau à une distance L du centre et de la force F appliquée à la distance R. Or, on sait que l'équilibre du levier conduit à l'égalité⁽²⁾

$$R \times F = P \times L.$$

Remplaçons dans l'égalité qui donne P, RF par son égal PL; on obtient :

$$P = 2\pi nPL.$$

256. Exemple numérique. — Supposons $P = 2$ kg, $L = 1^m5$, $n = 20$ tours, on obtient :

$$P \text{ kgm. par seconde} = 2 \times 3,1416 \times 20 \times 1,5 \times 2 = 377.$$

$$\text{D'où} \quad P \text{ ch. vap.} = \frac{377}{75} = 5 \text{ ch. vap. environ.}$$

Cette puissance devra être évaluée en watts si l'on veut comparer aux unités utilisées en électricité :

$$P \text{ watts} = 377 \times 9,81^{(3)} = 3698 \text{ watts.}$$

Supposons d'autre part que la diff. de pot. aux bornes du moteur, mesurée à l'aide d'un voltmètre, soit 105 v. et le courant, 40^a.

1. Ce nombre se détermine à l'aide d'un compteur de tours ou d'un tachymètre.
2. On suppose négligeable le poids du levier qui est appliqué en G.
3. On sait qu'un kgm = 9,81 joules, et que 1 watt = 1 joule par seconde.

La puissance électrique dépensée est

$$\text{Puissance dépensée} = VI = 105 \times 40 = 4200 \text{ watts.}$$

$$\text{Rendement} : \frac{3698}{4200} = 0,88 \text{ environ.}$$

237. Résultat. — L'expérience montre que pour les moteurs le rendement est très petit sous faible charge; il augmente avec la charge et, en régime normal, il peut atteindre 0,8 à 0,9.

238. Valeur du couple moteur. — Si l'on désigne par R le rayon de la poulie du moteur et par F la force qu'il exerce tangentiellement à cette poulie, sur une courroie par exemple, le travail, pour un tour complet, est égal à $2\pi RF$. Le produit $R \times F$ de l'effort par la distance à l'axe de rotation est appelé le *couple moteur* — ou *moment moteur*. — Si on le représente par C , le travail, pour un tour, est égal à $2\pi \times C$ et pour n tours par seconde la puissance est

$$P = 2\pi n C$$

Si l'on change le rayon de la poulie, et que l'on conserve au moteur la même puissance, le couple C garde sa valeur [le produit $R \times F$ restant fixe, R et F varient en sens inverse].

Si l'on néglige les frottements, l'hystérésis et les courants de Foucault, la puissance est à peu près égale à

$$P = e I = 2\pi n C$$

$$C = \frac{e I}{2\pi n}$$

Mais e , la f. c. é. m. vaut $\frac{n N \Phi}{10^8}$, donc

$$C = \frac{n N \Phi I}{2\pi n 10^8} = \frac{N \Phi I}{2\pi 10^8} \quad (4)$$

Le couple moteur ne dépend que du flux Φ et de l'intensité du courant I , il est proportionnel à chacune de ces quantités.

239. Valeur de la vitesse. — Nous exprimerons cette

vitesse par le nombre de tours par seconde. De la formule (2) du n° 254, on tire

$$\text{f. c. é. m. } e = V - ri = \frac{nN\Phi}{10^8}$$

$$\text{d'où} \quad n = \frac{(V - rI) \times 10^8}{N\Phi} \quad (5)$$

Cette formule montre que, pour une même valeur du numérateur, la vitesse est inversement proportionnelle au flux Φ : si on augmente Φ on diminue la vitesse ou inversement.

240. Étude particulière du moteur-série alimenté sous tension constante. — Dans l'étude qui va suivre, nous supposons toujours le moteur alimenté par une distribution sous tension constante ; c'est d'ailleurs le cas ordinaire de la pratique.

1° Sens de rotation. — Si l'on considère deux dynamos-série identiques, l'une fonctionnant comme génératrice et l'autre comme réceptrice avec même sens de courant dans l'induit, elles ont aussi, à cause des connexions, même sens de courant dans l'inducteur ; par conséquent, il résulte de ce qui a été dit (233) que la réceptrice tourne en sens inverse de la génératrice.

Supposons que l'on change le sens du courant d'alimentation (en permutant les bornes du moteur) le courant change de sens dans l'induit, mais comme il change aussi dans l'inducteur, le sens de rotation du moteur ne change pas.

Le moteur-série conserve le même sens de rotation quel que soit le sens du courant d'alimentation.

Le sens est d'ailleurs l'inverse de celui de la dynamo utilisée comme génératrice (1).

2° Inversion du sens de rotation. — Pour changer le sens de rotation, il faut changer le sens du courant dans un seul des deux organes ; on arrive à ce résultat en plaçant, entre

1. Il est évident qu'on peut faire tourner une génératrice dans les deux sens, mais il y a un sens qui est plus naturellement indiqué par la position des balais qui ont été placés de façon que, par suite de magnétisme rémanent, la machine puisse s'amorcer d'elle-même.

l'inducteur et l'induit, un *inverseur* de courant qui permet de changer le sens dans l'induit.

3° **Calage des balais.** — Une théorie analogue à celle qui a été exposée n° 196 montre que, dans le cas d'une réceptrice, les balais doivent être calés d'un certain angle *en arrière* du mouvement. Le décalage est d'ailleurs plus petit, pour une même vitesse, que dans le cas où la dynamo fonctionne comme génératrice. Le sens de rotation étant changé pour une dynamo-série selon qu'on l'emploie comme génératrice ou comme réceptrice, *les balais resteront donc à peu près à la même place pour l'un ou l'autre usage.*

4° Démarrage.

— Rhéostat de démarrage.

Lorsqu'on réunit les bornes du moteur-série à la ligne qui donne la tension constante V , la vitesse est d'abord très faible et la f. é. m. inverse très petite; de sorte que, le courant prend dans l'induit une très grande intensité, telle que l'induit pourrait être brûlé dans les grandes machines pour lesquelles l'induit a une faible résistance.

Par exemple, si l'induit a une résistance de $0^{\omega},05$, et qu'on le réunisse à une ligne de 110 volts, au début, le courant prend l'intensité :

$$I_0 = \frac{110}{0,05} = 2200 \text{ amp.}$$

Lorsque le moteur aura pris sa vitesse de régime, il donnera, par

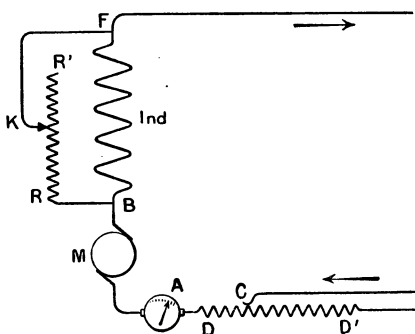


Fig. 192. — Réglage du moteur-série. — DD', rhéostat de démarrage; RR', rhéostat servant à régler la vitesse.

exemple, une f. é. m inverse de 100 volts, le courant normal sera seulement de

$$\frac{110 - 100}{0,05} = \frac{10}{0,05} = 200 \text{ amp.}$$

Pour éviter cet accident, on emploie un *rhéostat de démarrage* DD' placé en série sur la ligne comme le montre le schéma (fig. 192). Pour mettre en train le moteur, on met d'abord en série toute la résistance du rhéostat (point C près de D'); puis on diminue, progressivement, cette résistance en suivant l'aiguille de l'ampèremètre A. Les rhéostats employés sont, quelquefois, des rhéostats à liquide.

5° **Couple moteur.** — *Au démarrage, le couple moteur possède une grande valeur; en effet, on a vu, plus haut, que*

$$C = \frac{N \Phi I}{2\pi 10^8}$$

au moment où l'on fait communiquer le moteur avec la canalisation dont la d. d. p. est V, et lorsque le rhéostat de démarrage a été supprimé, on a dans l'induit un courant très intense I_0 (dont la valeur serait égale à $\frac{V}{r}$ (1) si l'induit restait calé) le flux Φ_0 serait aussi très grand puisque Φ dépend du courant I_0 qui passe dans l'inducteur. Le couple maximum que peut développer le moteur est $C_0 = \frac{N \Phi_0 I_0}{2\pi 10^8}$.

Si le *couple résistant*, ce qu'on appelle plus ordinairement la *charge*, appliquée au moteur, est plus grand que C_0 , le moteur ne part pas. Si le couple résistant est plus petit, le moteur commence à tourner; d'abord avec une faible vitesse, puis il atteint une vitesse de régime. A mesure que la vitesse augmente, le couple moteur diminue jusqu'à être égal au couple résistant (la charge) la vitesse est alors constante tant que la charge ne varie pas.

Il est facile de voir pourquoi le couple moteur diminue quand la vitesse augmente. En effet, à mesure que la vitesse

1. r est la résistance du moteur.

croît, la f. c. é. m. croît aussi et l'intensité du courant diminue ; si I diminue, Φ diminue aussi et le couple qui dépend du produit ΦI (formule 4) diminue.

Le moteur-série est donc caractérisé par un couple moteur très énergique au démarrage.

6° Variation de la vitesse avec la charge. — Réglage. — Le moteur-série présente le grave inconvénient de changer de vitesse lorsqu'on fait varier la charge (c'est-à-dire le couple résistant qu'on lui impose) ; ceci est la conséquence et la réciproque de ce que l'on vient de dire. On peut aussi le voir sur la formule qui donne la vitesse (nombre de tours) :

$$n = \frac{(V - rI) 10^8}{N\Phi}$$

Pour augmenter le couple, il faut augmenter I de sorte que le numérateur diminue, légèrement il est vrai, car r est faible et le dénominateur augmente, car Φ , le flux magnétique, augmente lorsque le courant d'excitation croît. Cependant si les inducteurs étaient presque saturés, Φ ne varierait plus beaucoup et la vitesse serait elle-même peu variable.

Supposons que la charge diminue, la vitesse croît rapidement et si l'on déchargeait brusquement le moteur, la vitesse prendrait une vitesse excessive et dangereuse que l'on évite en agissant sur le rhéostat de démarrage.

On peut régulariser la vitesse d'un moteur-série en plaçant un rhéostat RR' (fig. 192), en dérivation sur l'inducteur. Si l'on diminue l'intensité dans l'inducteur (faible résistance au rhéostat), on diminue Φ et, par suite, on augmente la vitesse.

7° Arrêt du moteur. — Pour arrêter un moteur, il ne faut pas couper brusquement le courant, on risquerait un courant de rupture dangereux ; il faut introduire progressivement la résistance de démarrage et ne couper que lorsque toute la résistance est intercalée. Les rhéostats de démarrage sont d'ailleurs construits de façon qu'on ne puisse couper le courant de ligne que si toute leur résistance est intercalée dans le circuit.

8° Usage du moteur-série. — Les variations de la vitesse avec la charge rendent ce moteur peu pratique pour la

plupart des usages industriels : machines-outils, métier à tisser, etc. ; on peut bien régler cette vitesse, mais il faut une surveillance continue. Le moteur-série est précieux pour les applications qui exigent un effort considérable à certains moments ; pour cette raison, il est utilisé à la traction des tramways, à la manœuvre des pompes, des grues, etc.

241. Étude particulière du moteur-dérivation alimenté sous tension constante. — 1° **Sens de la rotation.** — Il est facile de voir qu'une dynamo-shunt tourne dans le même sens quand elle fonctionne comme génératrice ou comme réceptrice. La figure 193 représente une dynamo-dérivation génératrice ; le courant produit par l'induit se partage en A en deux parties : l'une va dans la ligne, l'autre dans l'inducteur D. Le sens de rotation est celui de la flèche *f*. Alimentons la dynamo par un courant de même sens dans l'induit.

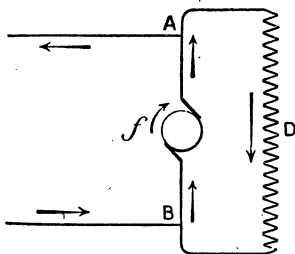


Fig. 193. — Génératrice.

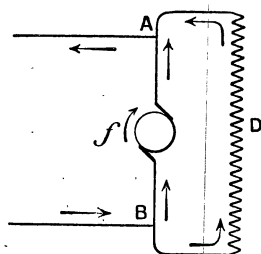


Fig. 194. — Réceptrice.

Pour un même sens de courant dans l'induit, le sens de rotation est le même dans une dynamo-shunt réceptrice que dans la même machine génératrice.

Si les inducteurs conservaieent même sens de courant, l'induit tournerait en sens inverse (233) ; mais il est facile de voir (fig. 194), que le courant de ligne qui arrive en B se partage : une partie passe par l'induit, l'autre passe dans l'inducteur D qui est ainsi parcouru par un courant de sens opposé à celui du premier cas. Il en résulte que l'induit conserve son sens de

rotation. Cette propriété nous a permis de charger des accumulateurs (208), avec la dynamo-shunt.

Si l'on change le sens du courant qu'on amène aux bornes A et B (fig. 194) il y a, à la fois, changement de sens dans l'induit et dans l'inducteur et, par suite, le sens de rotation n'est pas changé.

La réceptrice-dérivation n'a qu'un seul sens de rotation quel que soit le sens du courant d'alimentation ; ce sens est le même que celui de la machine génératrice.

2° Inversion du sens de la rotation. — Il faut, à l'aide d'un inverseur, changer le sens du courant dans l'induit sans le changer dans l'inducteur.

3° Calage des balais. — Le sens de la rotation étant le même pour la génératrice et la réceptrice, il faut placer les balais de l'autre côté de la ligne neutre pour qu'il soit en arrière du mouvement. Dans beaucoup de moteurs, les balais sont calés à poste fixe et très près de la ligne neutre, ce qui évite des manœuvres gênantes pendant leur emploi ; on arrive à ce résultat par les procédés indiqués à l'étude des dynamos : sursaturation des inducteurs, emploi de pôles supplémentaires.

4° Démarrage. — **Rhéostat de démarrage.** —

Comme avec les moteurs-série, il ne faut pas admettre brusquement le courant de ligne dans l'induit ; l'intensité pourrait brûler les isolants. Il faut faire usage d'un *rhéostat de démarrage* pour protéger l'induit. Il n'y a pas lieu de protéger l'inducteur qui est à fil long et fin et dans lequel l'intensité toujours faible ne peut être dangereuse. Le rhéostat de démarrage est donc placé en DD' sur le circuit induit (fig. 195) ; on fait, ainsi, varier le courant dans l'induit en gardant toute l'intensité possible dans l'inducteur.

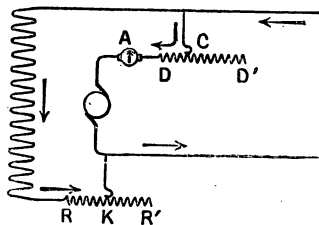


Fig. 195. — Moteur-shunt. — DD', rhéostat de démarrage RR', rhéostat de champ.

5° **Couple moteur.** — La d. d. p. aux extrémités de l'inducteur est constante et égale à la tension de la ligne; le courant dans l'inducteur ainsi que le flux sont donc constants.

Le couple moteur, $C = \frac{N \Phi I}{2\pi 10^8}$, ne dépend plus que de I auquel il est proportionnel. Le couple est maximum au moment du démarrage et diminue jusqu'à ce que le régime soit établi, lorsqu'il y a équilibre entre le couple et la charge.

On remarquera que le couple varie moins que dans le moteur-série où il dépend à la fois de Φ et de I .

6° **Vitesse.** — *Elle varie très peu avec la charge.* — *Le moteur-shunt présente le grand avantage d'être, dans une certaine mesure, autoregulateur de sa vitesse*, si l'on vient à faire varier l'effort qu'on lui demande. En effet, considérons la formule.

$$n = \frac{(V - rI) 10^8}{N \Phi}, \quad (5)$$

si l'on augmente la charge, on augmente aussi I (on vient de voir que le couple est proportionnel à I). L'augmentation de I entraîne une très petite diminution du numérateur (puisque la résistance de l'induit r est faible) (1); quant au dénominateur, il reste à peu près constant puisque le courant d'excitation ne dépend pas de I . La fraction varie donc très peu. En réalité, l'augmentation de I entraîne une petite diminution de Φ par réaction d'induit.

Moyen de faire varier la vitesse. — Pour faire varier la vitesse, si cela est nécessaire, il faut agir sur l'excitation à l'aide d'un rhéostat de réglage RR' (rhéostat de champ) mis en série sur l'inducteur. Si l'on augmente la résistance de réglage, on diminue le courant dans les inducteurs et, par suite, on diminue Φ , ce qui, d'après la formule (5), augmente la vitesse.

7° **Arrêt du moteur.** — Il faut se servir du rhéostat de démarrage dont on introduit toute la résistance avant de couper le courant.

1. Dans le cas de la machine-shunt, r désigne la résistance de l'induit, les inducteurs étant excités directement par la source.

8° **Usages du moteur-dérivation.** — A cause de son autorégulation de la vitesse, le moteur-shunt est le plus usité dans les usines et dans les applications usuelles. C'est toujours des moteurs-shunt que l'on emploie lorsqu'on commande électriquement des machines-outils, des métiers à tisser, etc.

242. **Etude particulière du moteur Compound.**

— Ce moteur est peu utilisé et nous ne ferons qu'une étude rapide ; ce qui précède permet d'ailleurs de prévoir les résultats.

1° **Moteur à excitation différentielle.** — Si l'on utilise comme moteur une génératrice, compound, les flux magnétiques produits par les deux excitations, qui étaient de même sens dans la génératrice sont de sens contraires dans la réceptrice (fig. 196 et 197). On dit que l'excitation est différentielle.

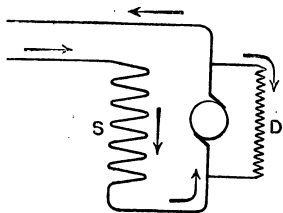


Fig. 196. — Génératrice.

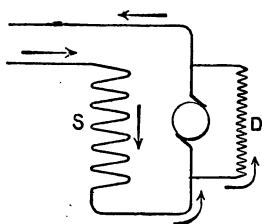


Fig. 197. — Réceptrice.

Dans la dynamo compound employée comme génératrice les deux excitations sont concordantes ; elles sont opposées dans la réceptrice.

Lorsque le moteur est peu chargé, l'excitation en dérivation est la plus importante ; mais, si l'on fait passer un fort courant dans le moteur, comme ce courant passe entièrement dans l'excitation-série, le sens du flux peut changer et le sens de rotation aussi ; ce changement de sens de rotation peut entraîner des accidents et c'est ce qui fait que ce moteur est peu usité. Sous cette forme, il présente cependant l'avantage d'avoir une vitesse tout à fait constante si l'enroulement-série, que l'on réduit à quelques tours de fils, a été bien calculé.

2° **Moteur compound à excitation additionnelle.**

— On enroule en sens inverse l'excitation-série de façon qu'elle agisse dans le même sens que l'excitation-shunt. On a ainsi un moteur dont les propriétés sont intermédiaires entre celles du moteur-série et celles du moteur-shunt : la vitesse est moins constante que dans un moteur-shunt, mais la machine peut donner un couple moteur plus grand que dans ce moteur. Le sens de la rotation est évidemment celui d'un moteur en dérivation.

243. Freinage électrique. — Pour arrêter un moteur, il ne suffit pas de couper le courant avec les précautions indiquées plus haut, l'appareil continue à tourner grâce à la force vive qu'il a emmagasinée et ne s'arrête que lorsque cette énergie cinétique a été absorbée par les frottements. On peut produire un arrêt très brusque, qui peut être utilisé dans certains cas pour les moteurs de tramways, en coupant le courant d'alimentation et en faisant fonctionner la machine comme génératrice.

Si le moteur est une réceptrice-shunt, on coupe le courant de

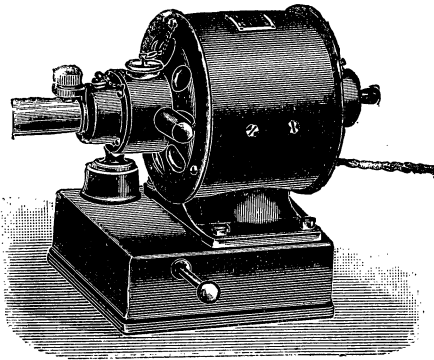


Fig. 198. — Moteur électrique (fig. empruntée au *Traité d'électricité médicale* du D^r Ler-moyez).

ligne qui passe dans l'induit en continuant à le faire passer dans les inducteurs, puis on réunit les balais de l'induit à travers une résistance convenable (pour éviter un courant trop intense dans l'induit). Comme la dynamo-shunt a même sens de rotation quand elle fonctionne en génératrice ou en ré-

ceptrice, il va se développer dans l'induit un courant d'induction qui, d'après la loi de Lenz, tend à arrêter le mouvement;

l'arrêt est rapide, et la résistance auxiliaire a pour but d'éviter un arrêt trop brusque qui pourrait casser les dents des engrenages.

Si le moteur est une réceptrice-série (cas des tramways), il faut se rappeler que le moteur-série tourne en sens inverse de la génératrice-série. La mise en court-circuit simple pourrait occasionner des accidents (rupture de dents d'engrenage, etc.). On freine en supprimant le courant de ligne et en croisant les balais que l'on réunit à travers une résistance : la dynamo fonctionne comme génératrice et s'arrête rapidement.

Lorsqu'un tramway descend une pente prolongée, on peut freiner comme on vient de le dire et la machine peut alors fournir de l'énergie électrique si on la réunit à la ligne.

244. Formes des moteurs. — Les formes des moteurs sont sensiblement celles des dynamos génératrices; on emploie plus particulièrement les formes cuirassées (fig. 198).

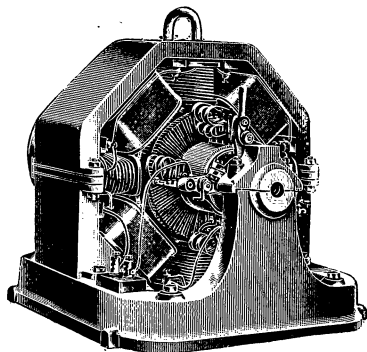


Fig. 199. — Moteur tétrapolaire (Sautter, Harlé et Cie).

La théorie qui a été faite dans les pages précédentes est applicable en général aux moteurs multipolaires; le moteur tétrapolaire, par exemple, est assez usité et on le munit souvent de pôles supplémentaires pour maintenir invariable le calage des balais quel que soit le sens de la rotation (fig. 199).

EXERCICES

1. Calculer le voltage entre les balais d'un moteur qui soulève un poids de 100 kg. avec une vitesse de $0^m,5$ par seconde; l'intensité du courant

est 4 a. et la résistance de l'induit 0ω , 8. On néglige les pertes autres que l'effet Joule dans l'induit.

R. 125,8.

*2. Un moteur-shunt est alimenté sous une tension fixe de 120 v., son induit a pour résistance 0ω , 4. Pour une certaine charge (couple), l'intensité du courant dans l'induit est 20 a. et la vitesse 400 tours par minute. On double la charge, ce qui double l'intensité. Calculez nouvelle vitesse.

R. 571 tours.

3. Un moteur actionne un treuil de $0^m,20$ de diamètre et soulève un poids de 200 kg. à la vitesse de 40 tours par minute. Le voltage aux bornes est 220 volts et l'intensité du courant 4,2. Quel est le rendement ?

4. Un moteur dont le rendement est 0,8 actionne une pompe rotative; il consomme 5 a. sous 220 v. Quel volume d'eau peut-il élever à 10 m. de hauteur par heure ?

CHAPITRE XVIII

PRINCIPALES APPLICATIONS DES MOTEURS. TRANSPORT DE LA PUISSANCE MÉCANIQUE. NOTIONS SUR LA TRACTION.

245. *Transport et distribution de la puissance mécanique.* — On a l'habitude de réserver le mot de *transport de puissance* (on dit aussi, mais c'est incorrect, *transport de force*) pour la transmission à distance assez grande de la puissance d'une source naturelle d'énergie : chute d'eau, par exemple. Le mot *distribution* est plutôt employé pour la transmission à faible distance de l'énergie électrique produite dans une station centrale qui alimente les différents ateliers d'une usine ou d'une ville.

Dans le premier cas, le rendement dépend surtout de la distance qui sépare la station génératrice de la station d'utilisation. Le cas qui se présente le plus ordinairement est celui qui consiste à utiliser l'énergie d'une chute d'eau à une certaine distance. Cette utilisation se fait rarement aujourd'hui par l'emploi du courant continu ; le courant alternatif, avec transformateurs permettant de hautes tensions en ligne, est plus économique.

246. *Rendement. — Avantages des hautes tensions.* — Considérons une génératrice qui tourne sous l'action d'un moteur hydraulique (turbine) et soit V le voltage aux bornes, i l'intensité du courant dans la ligne dont la résistance est R . La puissance fournie à la ligne est

$$P \text{ watts} = V i$$

La perte en ligne, par effet Joule, est Ri^2 ;
 On recueille aux bornes de la réceptrice $Vi - Ri^2$.

Le rendement de la ligne est $\frac{Vi - Ri^2}{Vi} = 1 - \frac{Ri^2}{Vi} = 1 - \frac{Ri^2}{P}$.

De l'égalité $P = Vi$, on tire $i = \frac{P}{V}$, d'où :

Rendement de la ligne $= 1 - \frac{R \frac{P^2}{V^2}}{P} = 1 - \frac{RP}{V^2}$.

La quantité $\frac{RP}{V^2}$ représente le *coefficient de perte* le long de la ligne. On voit qu'il est, pour une puissance donnée :

1^o *Proportionnel à la résistance de la ligne*;

2^o *Inversement proportionnel au carré de la tension V*.

Il y a donc avantage à utiliser des génératrices à haute tension et des lignes à faible résistance. Le choix de la ligne a déjà été étudié (voyez 222) ; nous retiendrons, surtout, l'avantage des hautes tensions. Or, les machines à courant continu se prêtent difficilement à l'emploi des voltages élevés, même si l'on groupe les dynamos en série ; aussi, les transports d'énergie se font surtout par courants alternatifs.

REMARQUE. — Si l'on voulait calculer le rendement total de l'installation, il faudrait tenir compte du rendement des machines (voyez exercices).

247. **Avantages des distributions électriques de puissance dans les ateliers.** — La transmission de la puissance par des procédés mécaniques se fait par des arbres moteurs, poulies, courroies, etc. ; s'il s'agit d'une grande usine, on est obligé d'employer une machine à vapeur par atelier afin de ne pas employer de transmissions trop longues. La transmission électrique permet de centraliser en un seul point de l'usine les chaudières et la machine à vapeur que l'on peut prendre de grande puissance. La machine à vapeur transmet sa puissance à une dynamo génératrice (ordinairement excitée en dérivation) et des conducteurs distribuent la puissance à des moteurs électriques qui actionnent les machines-outils.

Les principaux avantages de cette distribution sont :

1° Concentration, au même point, des chaudières et des machines à vapeur, ce qui diminue le personnel de surveillance;

2° Emploi de machines très puissantes dont le rendement est ordinairement meilleur que celui des machines plus petites;

3° Meilleur emploi de la puissance motrice; car, dans une usine, toutes les machines-outils ne travaillent pas, en général, en même temps et on n'est pas obligé de demander au moteur à vapeur la puissance capable de faire mouvoir, à la fois, tous les outils.

4° La transmission électrique, malgré l'intermédiaire des deux machines (génératrice et réceptrice) qu'elle exige, est d'un rendement supérieur à celui des transmissions mécaniques.

5° La place est mieux utilisée; le travail plus régulier.

6° L'emploi de l'électricité permet un excellent éclairage des ateliers.

7° Il est facile de se rendre compte de la puissance consommée par une machine-outil à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre.

La distribution peut se faire de deux manières : 1° par moteurs séparés, chaque machine ayant son moteur propre; 2° par moteurs de groupes, on installe un moteur puissant par groupe de machines et l'on emploie des transmissions mécaniques.

La première méthode est plus avantageuse. Le plus souvent, la vitesse du moteur est beaucoup plus grande que celle des machines; il faut employer des *réducteurs de vitesse* par engrenages — le système fait dans ce cas beaucoup de bruit —; on peut employer différentes courroies qui passent sur des poulies de diamètres différents ou encore la vis sans fin. Si la vitesse est la même, on réunit l'arbre de la machine à celui du moteur par des accouplements élastiques.

248. *Quelques exemples*⁽¹⁾. — Un grand nombre de machines-outils sont mises en mouvement par des moteurs-shunt avec lesquels la vitesse est très peu variable et qu'on peut d'ailleurs régler avec le rhéostat de champ. La figure 200 représente une

1. Il ne peut être ici question que d'une simple énumération.

double machine à percer, le moteur est placé à la partie supérieure. On fait aussi de petites machines à percer portatives que l'ouvrier appuie sur la poitrine et dont le petit moteur est relié à la canalisation par des fils souples. On

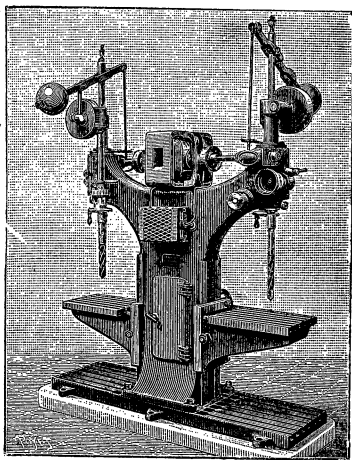


Fig. 200. — Machine à percer double, actionnée par moteur électrique.

Les laminoirs, les cisailleuses, sont commandés par des moteurs compound à excitation différentielle.

249. Tramways électriques. — Une des plus importantes applications des moteurs électriques est la traction des véhicules.

Principe. — On utilise presque encore exclusivement les courants continus avec des moteurs-série qui conviennent aux applications qui comportent de grandes variations dans l'effort à développer. On compte que sur les rails à gorge, ordinairement employés pour les tramways, le coefficient de traction est d'environ 0,012, c'est-à-dire qu'il faut un effort égal aux 0,012 environ du poids du véhicule, sur terrain horizontal et en

entretien aussi par des moteurs-shunt : des métiers à tisser, des machines à mortaiser, etc.

Les ascenseurs et les monte-charges sont également mis en mouvement par des moteurs-shunt qui actionnent un tambour sur lequel s'enroule le câble qui sert à faire monter ces appareils. Citons encore les ventilateurs et les pompes rotatives.

Pour les machines qui exigent un effort considérable à un moment donné, on emploie les moteurs-série ; tels sont : les grues, les cabestans, les treuils de mines ; en général tous les puissants appareils de levage ; les pompes à piston.

ligne droite, soit 12 kg. par tonne. L'effort est doublé et même triplé pour les courbes à faible rayon, à cause de l'augmentation du frottement. Le long d'une rampe, l'effort augmente d'une fraction du poids égale à la pente. Pour une pente de 5 cm par mètre ou $\frac{5}{100}$, l'effort, par tonne, est de

$$0,012 + \frac{5}{100} \times 1000 = 62 \text{ kilog.}$$

On utilise, le plus souvent, en France, des moteurs-série à quatre pôles complètement cuirassés pour les protéger de la boue et de la poussière. On en place ordinairement deux par voiture, un sur chaque essieu ; le mouvement est transmis et la vitesse réduite par des engrenages noyés dans l'huile (pour diminuer le bruit). Lors du démarrage, les moteurs sont mis en série sur la ligne de sorte que chacun d'eux ne supporte que la moitié du voltage, lequel est compris entre 500 et 600 volts. Lorsque la voiture a pris une vitesse à peu près normale, on met les moteurs en parallèle. Le démarrage, la régulation de vitesse, l'arrêt, se font à l'aide d'un appareil cylindrique placé à l'avant de la voiture ; à l'aide d'une manette, le wattman manœuvre les rhéostats, le changement de couplage, etc. Le freinage s'obtient avec des freins à air comprimé et l'on peut aussi utiliser le freinage électrique — bien que ce dernier fatigue les moteurs —. Pour obtenir une tension qui diminue peu le long de la ligne on emploie à la station centrale des dynamos hypercompound (209, remarque). Dans d'autres cas, on emploie le courant alternatif ou triphasé que l'on convertit, dans des sous-stations, en courant continu à 500 ou 600 volts.

250. Différents modes d'alimentations des moteurs.

— Trois manières principales d'amener le courant aux voitures.

1° **Trolley aérien et retour par le rail.** — La voiture porte une perche en tube d'acier ; cette perche, légère et flexible, se termine par une roulette en bronze assez friable qui s'appuie sur le condensateur. Ce dernier est du fil de cuivre ou de bronze siliceux, de diamètre de 8 mm environ, soutenu par des isolateurs portés par des poteaux. Le frottement use le trolley qui est moins dur que le

conducteur. Celui-ci est relié au pôle positif de la dynamo génératrice.

Retour par le rail. — Ses inconvénients. — Le retour se fait par le rail qui, pour ne pas amener de chute importante de tension, doit être bon conducteur. Pour cette raison, les bouts de rails, s'ils ne sont pas en contact, sont réunis par des fils de cuivre ou, plus économiquement, les bouts des rails sont soudés. Comme ils sont encastrés dans le pavage, les dilatations dues aux différences de température n'amènent pas de déformation.

Le retour par le rail présente de sérieux inconvénients :

1°. Les petites différences de tension qui existent entre certains points du rail et les conduites d'eau ou de gaz suffisent à produire dans le sol humide des courants appelés *courants vagabonds*, qui gênent les communications téléphoniques ;

2°. Ces courants électrolysent l'eau chargée de sels minéraux qui mouille la terre, et les produits de cette électrolyse oxydent les canalisations d'eau et de gaz et les détériorent assez rapidement.

Aussi, les municipalités exigent-elles que la chute de tension le long des rails soit très faible, de l'ordre de 1 volt par km. Différentes dispositions ont été employées pour arriver à ce résultat : la plus simple consiste à supprimer la résistance que le courant rencontre pour passer d'un bout de rail au suivant ; à cet effet, on réunit les bouts de rails par un fil de cuivre ou bien on les soude entre eux (1).

2. **Caniveau souterrain.** — Dans certaines villes le trolley

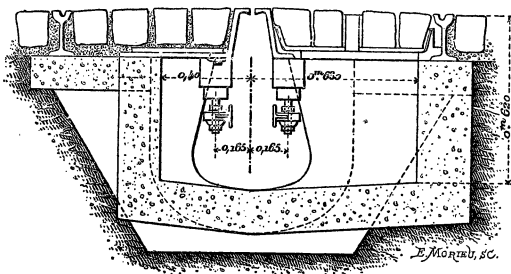


Fig. 201. — Caniveau souterrain.

aérien est interdit ; on utilise, dans ce cas, d'autres procédés. Celui

1. Cette soudure se fait électriquement ou par aluminothermie (voy. Cours de chimie).

qui tend à se répandre est le *caniveau souterrain*. La figure 201 représente la coupe de l'une des dispositions usitées. On y voit : les deux rails sur lesquels roulent les roues et, au milieu, un 3^e rail qui porte une fente faite pour laisser passer l'organe de prise de courant, appelé *charrue*. Cet organe porte deux patins qui glissent en appuyant sur les deux rails en forme de T que l'on voit à l'intérieur du caniveau. Ces *rails de contact* sont isolés par leurs supports. L'un des rails est réuni au pôle positif de la génératrice, l'autre au pôle négatif. Dans ce cas, le retour ne se fait pas par les rails de roulement et l'on évite les *courants vagabonds*.

L'installation du caniveau est coûteuse et, en cas d'orage, ou de chute de neige, il peut se produire dans le caniveau des courts-circuits qui arrêtent la circulation des voitures. Des indicateurs analogues à celui qui a été décrit (227) renseignent, à chaque instant, si l'un des rails est mis en communication avec le sol. On peut, avec de forts courants, *brûler les terres*, c'est-à-dire fondre un objet métallique qui serait tombé dans le caniveau et se serait mis à cheval sur les rails de contact ; si le contact est dû à de la boue, le courant chauffe et dessèche la boue qui tombe au fond du caniveau.

3° Prise de courant par contacts superficiels. — De nombreux systèmes ont été employés. En principe, on place dans l'axe de la voie, tous les 6 mètres environ — la longueur des voitures est supérieure à 6 mètres — des plots ou pavés électriques reliés à un *feider* souterrain qui communique avec le pôle positif de la génératrice. Au-dessous du véhicule, se trouve une barre métallique qui frotte sur les plots. Le retour se fait par le rail de roulement.

Des dispositifs variés sont utilisés pour que le plot ne soit électrisé qu'au moment du passage de la voiture. Dans le système Diatto, par exemple, c'est un clou placé sous le pavé qui est attiré par un électro placé sous la voiture et c'est ce clou qui amène le courant ; dans certains cas le magnétisme remanent retient le clou contre la partie inférieure du pavé et celui-ci reste électrisé. Il en résulte des dangers assez graves pour les chevaux.

4° Emploi des accumulateurs. — La voiture porte une batterie d'accumulateurs que l'on charge au départ, l'énergie emmagasinée sert à mouvoir le moteur du tramway. Ce système est très onéreux à cause du prix d'achat et d'entretien des accumulateurs et, aussi, parce que ceux-ci représentent un poids mort énorme, qu'il faut transporter. — Pour une voiture de 50 voyageurs, pesant 14 tonnes, le poids des accumulateurs est de 3 à 4 tonnes.

Conclusion. — Le procédé le plus économique est celui du

trolley aérien et c'est toujours celui qui est employé lorsqu'il est autorisé par les municipalités. Lorsque le tramway effectue un parcours dont une partie est intérieure et l'autre extérieure à une ville, on emploie le trolley aérien à l'extérieur et l'un des autres systèmes à l'intérieur. Le caniveau souterrain tend à être seul employé à Paris.

251. **Chemins de fer électriques.** — Le remplacement de la locomotion à vapeur par la locomotion électrique comporterait de nombreux avantages : réalisation de vitesses plus grandes qui pourraient facilement atteindre 200 km à l'heure ; la locomotive à vapeur ne pouvant guère dépasser 120 km en palier ; les démarrages sont plus rapides ; la locomotive électrique ne dépense pas pendant les arrêts. On voit d'ailleurs aisément un grand nombre d'avantages secondaires. Il faudrait évidemment changer le matériel existant et créer des stations centrales puissantes. L'emploi du courant alternatif serait plus économique que celui du courant continu. Au point de vue stratégique, la traction électrique présente de graves inconvénients, car il suffirait de couper le conducteur pour arrêter la circulation.

La traction électrique s'est surtout répandue dans les grandes villes où les chemins de fer métropolitains circulent presque constamment en tunnel ; la locomotive à vapeur viciant l'air ne pourrait être utilisée dans ce cas. Les lignes métropolitaines utilisent encore le plus souvent des moteurs analogues à ceux des tramways, c'est-à-dire des moteurs à courant continu qui puisent leur courant dans des sous-stations où l'on convertit en continu le courant alternatif des usines centrales. La prise de courant se fait à l'aide d'un patin qui appuie sur un rail isolé placé le long de la voie. Le retour se fait par les rails de roulement. Lorsque le train contient plusieurs voitures motrices on s'arrange pour qu'elles soient commandées, à la fois, par un seul wattman placé à la tête du train ; à cet effet, les différentes voitures motrices sont reliées par des câbles au *contrôleur* de la première voiture.

Dans les pays de montagnes, en Suisse, en Savoie, on a installé un certain nombre de chemins de fer qui utilisent l'énergie hydraulique des chutes d'eau.

EXERCICES

1. Le cheval-an revient à 120 fr. sur l'arbre de la dynamo génératrice. On a calculé la ligne de façon à éprouver une perte de 10 pour 100. La réceptrice a pour rendement 0,85. A combien revient le kw-heure disponible

sur l'arbre de la réceptrice. On admet une durée de travail de 4000 heures par an. On ne tient pas compte des frais d'installation.

R. 0^r,06 environ.

2. On veut transmettre une puissance de 200 chevaux avec un rendement final de 0,72. Les deux dynamos ont chacune pour rendement 0,9. Le voltage au départ est 4000 v. Quelle résistance faut-il donner à la ligne et quelle sera sa section. On prendra $2 \cdot 10^{-6}$ pour résistivité du conducteur?

Ce problème est analogue aux exercices 2 et 3 du chap. XVI. Le rendement de la ligne x devra être tel que

$$0,9 \times x \times 0,9 = 0,72, \quad x = 0,89.$$

3. Calculer la puissance d'une chute d'eau dont le débit est 4^{m^3} à la seconde et la hauteur 35 m. Évaluer en ch.-v. et en kw.

4. Un tramway électrique pèse 10 tonnes, quelle est la puissance qu'il consomme à la vitesse de 14,4 km. à l'heure, sur terrain horizontal. On admet que le coefficient de traction sur rail est 0,012 (c'est-à-dire que la force nécessaire pour produire la traction est les 0,012 du poids)?

Rép. 6 HP 1/2 environ.

5. Quelle sera la puissance dépensée sur une pente de 1 p. 100?

R. La force de traction devra être augmentée de $\frac{1}{100}$ du poids et le coefficient de traction est alors 0,022; on trouve, un peu moins, de 12 HP.

6. On actionne le tramway du n° 4 avec une batterie d'accumulateurs de 40 éléments (en série). Quel poids de plaques faut-il prendre par élément. On admet un régime de décharge de 3 a. par kg. de plaque et l'on prend pour f. é. m. moyenne 2 v.?

R. 20 kg. environ.

Il y a lieu de tenir compte de l'augmentation du poids de la voiture occasionné par les accumulateurs. Dans la pratique, il faudra prendre un poids bien supérieur à 20 kg. à cause des pentes, des courbes, etc.

CHAPITRE XIX

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES COURANTS ALTERNATIFS

252. *Définitions.* — Les courants continus, que nous avons considérés jusqu'ici, circulent dans les conducteurs toujours dans le même sens et les générateurs qui les produisent sont *polarisés*, c'est-à-dire qu'ils ont un pôle positif et un pôle négatif. Les courants alternatifs, qui se répandent de plus en plus dans l'industrie, changent de sens un certain nombre de fois par seconde et les machines génératrices, appelées *alternateurs*, ne sont pas polarisées, leurs bornes sont alternativement positive et négative.

Les courants alternatifs utilisés dans la pratique sont toujours *périodiques*, ce qui veut dire que l'intensité des courants varie

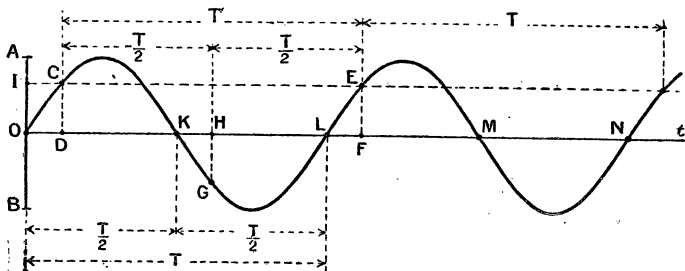


Fig. 202.

périodiquement, c'est-à-dire reprend la même valeur après des intervalles de temps égaux. On peut représenter les variations

du courant par un graphique (fig. 202) en portant les temps sur l'axe *ot* et les valeurs de l'intensité sur des perpendiculaires à cet axe; on obtient, ainsi, une courbe sinueuse composée de parties identiques qui se reproduisent à la suite les unes des autres; la partie comprise entre L et N est la répétition de la portion comprise entre O et L.

On appelle *période* le temps T nécessaire pour que le courant reprenne la même intensité et dans le même sens.

On appelle *fréquence* le nombre de périodes contenues dans une seconde; on a, évidemment, en représentant la fréquence par N , la relation

$$\text{fréquence } N = \frac{1^s}{T} \text{ ou } NT = 1^s.$$

Il y a avantage à utiliser des courants alternatifs dont la période se compose de deux demi-périodes identiques et de sens contraires (courants sinusoidaux). On voit, aisément, sur le graphique, que, le courant, parti de zéro, atteint une valeur maxima après $\frac{1}{4}$ de période $\frac{T}{4}$; il reprend la valeur zéro après une demi-période, une valeur maxima, mais de sens contraire, après $\frac{3T}{4}$, et redevient nul après une période entière.

Si l'on part d'une valeur quelconque CD de l'intensité, après $\frac{T}{2}$, cette intensité, représentée par GH , a pris une valeur égale et de signe contraire; après une période T , elle est représentée par $EF = CD$.

255. *Effets chimiques.* — Lorsqu'on fait traverser une solution saline par un courant alternatif, il ne se produit ordinairement aucun phénomène, car la décomposition qui peut se produire pendant une demi-période est compensée par un phénomène inverse qui a lieu pendant la demi-période suivante. **On ne peut donc pas utiliser le courant alternatif pour l'électrolyse et pour la charge des accumulateurs** (1). On ne

1. Si les produits de l'électrolyse sont gazeux, ils peuvent échapper en partie à la réaction inverse; ainsi un courant alternatif assez intense fournit

peut pas, non plus, mesurer les courants alternatifs par électrolyse.

254. Effets calorifiques et lumineux. — Le courant alternatif chauffe les conducteurs comme le courant continu ; ceci résulte de ce que la chaleur dégagée dans un conducteur ne dépend pas du sens du courant mais seulement du carré de son intensité (loi de Joule).

Le courant alternatif peut servir au chauffage et à l'éclairage par incandescence ou par arc. Dans ce dernier cas, les deux charbons s'usent également, et il n'y a pas de cratère sur l'un des crayons : tous deux se taillent en pointe mousse. Avec les fréquences ordinaires de 40 à 50, l'éclat lumineux des lampes à arc ou à incandescence paraît fixe, à cause de la *durée des impressions sur la rétine* ; avec des fréquences faibles, inférieures à 10, on observerait un éclat variable, passant par un maximum et un minimum pendant chaque demi-période (1).

La chaleur dégagée dans un fil est utilisée pour la mesure des courants alternatifs dans les *ampèremètres thermiques*.

255. Action sur l'aiguille aimantée. — **Les galvanomètres à aimant ou à cadre mobile ne peuvent servir pour la mesure des courants alternatifs.** — Supposons que l'on fasse passer un courant alternatif dans un galvanomètre à aimant mobile : pendant la première demi-période, l'aiguille est déviée dans un certain sens, et, si la fréquence du courant n'est pas très grande et l'inertie de la partie mobile assez petite, il y a un écart appréciable pendant cette demi-période. Pendant la demi-période suivante, l'action est de sens opposé, et l'aiguille exécutera, autour de sa position d'équilibre, des oscillations de même durée que la période du courant. Les galvanomètres ordinaires ont en général une inertie assez grande et avec les courants de

dans un voltamètre à eau acidulée des volumes égaux de gaz détonant aux deux électrodes (mélange d'hydrogène et d'oxygène).

1. Le déplacement rapide d'un objet quelconque dans le voisinage d'une source lumineuse alternative donne lieu à la production de plusieurs images du même objet.

fréquence 40 à 50, les plus usités, les déplacements de l'aiguille sont à peine sensibles.

Lorsqu'on fait agir un aimant sur un courant alternatif mobile, ce dernier est alternativement sollicité dans des sens opposés; on peut faire l'expérience en approchant un aimant NS du filament d'une lampe à incandescence (fig. 203), le filament oscille de part et d'autre de sa position d'équilibre; mais, comme la fréquence ordinaire est grande, on ne peut pas suivre, à l'œil, le mouvement oscillatoire du filament (à cause de la persistance des impressions lumineuses) : il y a simplement un épaouissement du filet lumineux, surtout à la partie supérieure. Avec une lampe à courant continu, il y aurait déplacement du filament dans un seul sens, conformément à la règle des trois doigts. Les ampèremètres à cadre mobile qui utilisent une action analogue à la précédente ne peuvent donc pas servir à la mesure des courants alternatifs.

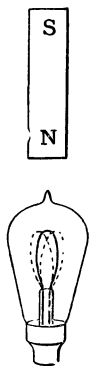


Fig. 203. — Action d'un aimant sur le filament d'une lampe à courant alternatif.

256. Action réciproque de deux courants alternatifs. — L'électrodynamomètre peut servir à la mesure de ces courants. — Deux bobines parcourues par des courants alternatifs de même période — ou par le même courant — exercent l'une sur l'autre une action mécanique de direction unique, parce que le sens du courant change de sens, à la fois, dans les deux bobines. Pour cette raison, l'*électrodynamomètre* (166) est employé à la mesure des courants alternatifs.

257. Électro-aimant à courant alternatif. — Les ampèremètres à fer doux peuvent servir à la mesure des courants alternatifs. — Un électro-entretenu par un courant alternatif produit un champ magnétique alternatif; il agit sur un morceau de fer doux qui subit aussi une aimantation et qui *est attiré* : son aimantation variant comme celle de l'électro.

On obtient des actions *ayant un sens unique* lorsqu'on fait agir un électro ou un solénoïde, entretenu par du courant alternatif, sur un morceau de fer doux : les ampèremètres à fer doux peuvent servir pour la mesure des courants alternatifs.

L'électro alternatif donnerait, de même, une action d'un seul sens en agissant sur un courant alternatif de même période, sur un filament de lampe à incandescence, par exemple ; il produirait, au contraire, un mouvement oscillatoire sur le filament d'une lampe à courant continu. Les électros à courant alternatif doivent avoir un *noyau feuilleté* pour éviter l'échauffement par courants de Foucault.

258. **Mesure de la fréquence.** — La fréquence du courant produit par un alternateur peut se calculer facilement si l'on connaît le nombre de tours par seconde et le nombre des pôles ; si la vitesse change, la fréquence varie également. Il existe divers appareils qui mesurent directement la fréquence par la lecture d'une aiguille sur un cadran (*fréquencemètres* d'Abraham, de Ferrié, etc.).

Nous ne décrirons pas ces instruments ; nous n'indiquerons, à *titre d'exercice*, que la méthode suivante. Sur une plaque de cuivre ou de

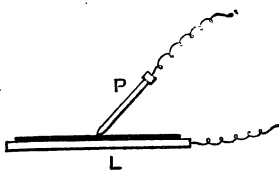


Fig. 204.

Mesure de la fréquence.

zinc, on étale une feuille de papier imbibée d'une solution de ferrocyanure de potassium et d'azotate d'ammoniaque (mélange à volumes égaux des solutions saturées des deux sels, et addition d'un volume d'eau triple) ; on fait passer le courant à travers la solution en prenant pour électrodes la feuille métallique et une pointe de fer P (fig. 204).

Si l'on fait passer un courant continu, en prenant le fer comme anode, il y a oxydation du fer qui, au contact du ferrocyanure, donne du bleu de Prusse ; en déplaçant le point P on obtient un trait bleu continu. Si le courant est alternatif, on a une série de petits traits qui correspondent aux demi-périodes pendant lesquelles le fer est anode. En remplaçant la plaque de cuivre par un cylindre tournant, on pourra faire durer l'expérience un certain temps et compter

le nombre des périodes : en divisant ce nombre par la durée de l'expérience exprimée en secondes on aura la fréquence.

259. *Forme du courant.* — *Idée de l'oscillographe.* — L'intensité d'un courant alternatif varie pendant la durée de la période, ainsi que nous l'avons vu. Cette variation peut se faire d'une infinité de manières que l'on représente par un graphique analogue à celui de la figure 202. On ne peut guère mesurer cette intensité qui change continuellement, mais on peut déterminer, par la photographie, la forme de la courbe de variation; l'appareil qui permet d'obtenir ce résultat remarquable est appelé *oscillographe*.

En principe, c'est un galvanomètre dont la partie mobile possède une inertie très petite et une durée d'oscillation propre négligeable par rapport à la période du courant; de sorte que cette partie mobile *suit* les variations du courant et prend, à chaque instant, une déviation proportionnelle à l'intensité. Un miroir et un système optique, que nous ne décrirons pas, permettent de projeter, sur un écran ou sur une plaque photographique, la courbe que représentent les variations de l'intensité (1).

Dans la pratique industrielle, on s'efforce d'obtenir des courants représentés par une courbe bien régulière, appelée *sinusoïde*, et l'on donne à ces courants, les seuls que nous étudierons, le

nom de *courants sinusoïdaux* (fig. 202). Dans certains cas, la courbe est moins régulière; elle peut être dentelée comme

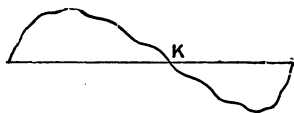


Fig. 205. — Courant périodique non sinusoïdal.

1. Dans l'oscillographe Blondel, la partie mobile est une lame d'acier très mince de $\frac{2}{10}$ de mm de large et de 20 à 30 mm de long; elle est tendue entre les pôles d'un aimant et soumise à l'action de deux bobines parcourues par le courant alternatif. Sous l'action du courant, la lame se tord et un miroir très petit sert à projeter les angles de torsion. Le tout est placé dans un tube contenant de l'huile de vaseline pour amortir les oscillations de la lame. La durée d'oscillation de la lame est de l'ordre de 0,0001 de seconde.

celle de la figure 205; on dit, dans ce cas, que le courant présente des *harmoniques* (cette expression est empruntée à une analogie acoustique).

260. **Définition de la fonction sinusoïdale.** — Considérons (fig. 206) une droite OM de longueur a qui tourne dans un plan, autour du point O, et d'un mouvement uniforme en

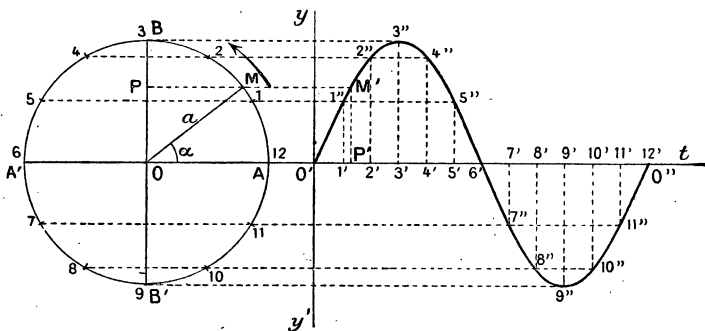


Fig. 206. — Fonction sinusoïdale.

faisant un tour dans le temps T (durée d'une période). L'extrémité M décrit la circonférence de centre O . De l'extrémité M , abaissons une perpendiculaire MP sur le diamètre BB' et considérons le mouvement de ce point P . Pendant que M décrit le quart de cercle AB , le point P va de O en B ; il revient de B en O pendant le quart de tour suivant; il va de O en B' , puis revient en O pendant les deux quarts de tour qui suivent. Le point P est animé d'un mouvement alternatif qu'on appelle le **mouvement sinusoïdal** ⁽¹⁾.

Le mouvement sinusoïdal est donc le mouvement alternatif dont est animé un point tel que P , qui est, à chaque instant, la projection, sur un diamètre, d'un point tel que M qui décrit la circonférence d'un mouvement uniforme.

1. Cette expression est justifiée, car $OP = a \sin \alpha$, α étant l'angle MOA dont la ligne a tourne, et les variations de la ligne OP sont proportionnelles à celles du sinus d'un angle α qui varie de 0° à 360° .

Construction de la courbe représentative. — Pour construire la courbe qui représente les variations de la longueur OP , prolongeons le diamètre AA' et prenons un point O' qui servira d'origine. Nous rapporterons la courbe aux deux axes $O'y$ et $O't$. Portons à partir de O' une longueur de $O'O''$ qui représente la durée T d'une période ou d'un tour, à une certaine échelle. Partageons la circonférence en un certain nombre de parties égales, 12 par exemple; faisons de même de la longueur $O'O''$. Par les points $1', 2', 3'...$ élevons des perpendiculaires à $O'O''$ et par les points $1, 2, 3...$ menons des parallèles à l'axe $O't$, les points d'intersection des lignes qui se correspondent fournissent les points $1'', 2''...$ qui sont des points de la courbe à laquelle on donne le nom de *sinusoïde*. Le point qui correspond à M est le point M' ; l'ordonnée $M'P'$ égale à OP représente la valeur de la fonction sinusoidale au temps t représenté par la longueur $O'P'$ (1).

Il est facile de voir sur le graphique que la fonction croît d'abord assez rapidement à partir de zéro et qu'après $\frac{T}{4}$ elle passe par sa valeur maxima a . Cette valeur maxima s'appelle l'*amplitude* de la fonction. Au voisinage de ce maximum, les variations sont moins rapides (ceci est général, on démontre, en mathématiques, que les variations d'une fonction quelconque sont petites lorsqu'elle passe par un maximum ou un minimum). Après $\frac{T}{2}$, la fonction passe par la valeur zéro et devient ensuite négative pendant la seconde demi-période, laquelle est identique, sauf le changement de signe, à la première.

261. Représentation de deux fonctions sinusoidales de même période et d'amplitudes différentes

1. Si l'on appelle y l'ordonnée variable $M'P'$, on a $y = a \sin \alpha$. Or, on sait qu'en trigonométrie les angles s'évaluent par la longueur de l'arc qu'ils interceptent sur la circonférence de rayon égal à 1. La longueur de cette circonférence est 2π et cette longueur correspond à une période T , comme le mouvement est uniforme on a

$$\frac{\alpha}{2\pi} = \frac{t}{T} \quad \text{ou} \quad \alpha = \frac{2\pi t}{T}, \quad \text{donc} \quad y = a \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

phase ou simplement qu'elles sont *en phase*. Lorsque $\varphi = 90^\circ$,

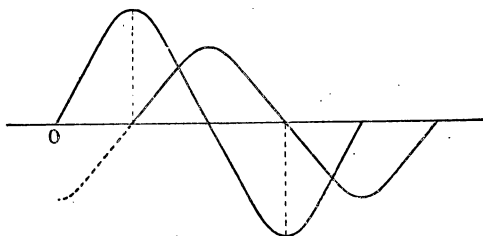


Fig. 209. — Deux fonctions sinusoïdales en quadrature.

on dit que les fonctions sont en *quadrature* (fig. 209) et si $\varphi = 180^\circ$, on dit qu'elles sont en *opposition* : dans ce cas elles sont toujours de signes contraires (fig. 210).

262. **Somme de deux fonctions sinusoïdales.** — Les données (fig. 211) sont : les deux sinusoïdes $O'mm'O''$ et $O_1nn'O_2$; pour trouver la courbe

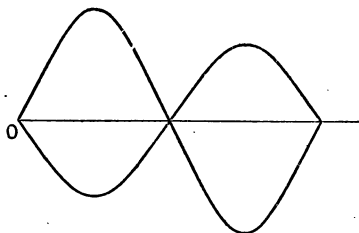


Fig. 210. — Deux fonctions sinusoïdales en opposition.

qui représente, à chaque instant, la somme des ordonnées, la première méthode qui se présente à l'esprit consiste à élever en un point quelconque C une perpendiculaire CDE. On détermine le point F de la courbe cherchée en portant à partir de E la longueur $EF = CD$; de sorte que $CF = CD + CE$. On déterminera ainsi autant de points qu'on voudra. Le résultat sera la courbe $O_3rr'O_4$ sinusoïde de même période que les données, mais dont l'*amplitude est plus petite que la somme des amplitudes données*.

Il est plus simple de représenter le résultat par un *vecteur tournant*. Soient OM et ON les vecteurs qui correspondent aux sinusoïdes données : ils font entre eux un angle φ .

Construisons le parallélogramme ONRM sur OM et ON comme côtés, je dis que la diagonale OR est le vecteur cherché ; ce vecteur, en tournant, avec la même période, autour de O, fournit,

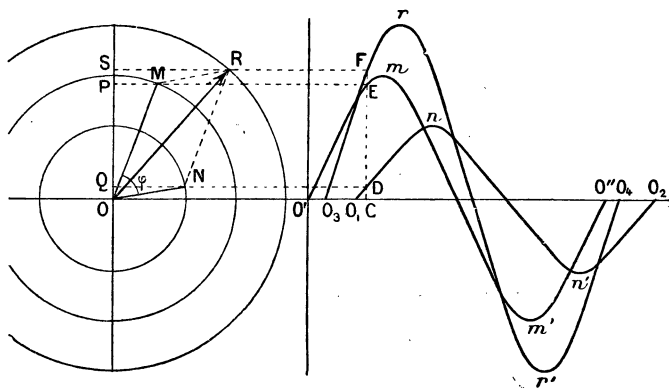


Fig. 211. — Composition de deux fonctions sinusoïdales.

par la projection S de son extrémité R, les variations de la somme des deux fonctions données.

Il suffit de prouver que, à chaque instant, on a :

$$\begin{array}{l} \text{Projection de OR} = \text{proj. de OM} + \text{proj. de ON}; \text{ ou :} \\ \text{OS} = \text{OP} + \text{OQ.} \end{array}$$

Mais $OQ = PS$ comme projections, sur une même ligne, de deux droites MR et ON, égales et parallèles; on peut donc remplacer QO par PS et l'on a :

$$OS = OP + PS$$

ce qui est évident. — On verrait, facilement, que cette démonstration s'applique à tous les cas de figure, en tenant compte des signes. On voit aussi que le vecteur résultant est plus petit que la somme des vecteurs donnés et qu'il présente un angle de phase, mesurable sur la figure, plus petit que φ .

Si les deux fonctions données étaient *en phase*, les vecteurs OM et ON seraient sur la même ligne et le vecteur résultant serait égal à leur somme et en phase avec chacun d'eux.

265. Somme de plusieurs fonctions sinusoïdales.

— **Plus de deux fonctions.** — Le vecteur tournant qui permet de figurer la somme de deux fonctions sinusoïdales s'obtient par une règle identique à celle que l'on emploie pour la composition des forces en mécanique. De même, lorsqu'il y a plus de deux fonctions, on compose la 3^e OC (fig. 212) avec la résultante Or des deux premières; la 4^e OD avec la résultante Or' des trois premières... etc., on obtient ainsi le vecteur résultant OR. La ligne OR ferme le polygone des vecteurs OArr'R dont les côtés sont égaux et parallèles aux vecteurs donnés. La ligne OR est évidemment plus petite que la somme des vecteurs. Pour abrégé le langage, on appelle souvent OR la *somme géométrique* des vecteurs.

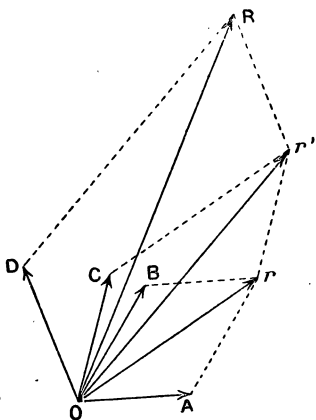


Fig. 212. — Composition de plusieurs vecteurs tournants.

264. Intensité efficace d'un courant alternatif.

— **Sa mesure.** — Dans le cas du courant alternatif, il y a à considérer trois sortes d'intensités :

1^o **L'intensité instantanée**, grandeur variable qui oscille, pendant une période, entre deux valeurs extrêmes égales et de sens contraires — nous représenterons par i l'intensité instantanée;

2^o **L'intensité maxima**, représentée par l'ordonnée maxima de la courbe représentative des variations ; nous la désignerons toujours par I_m ;

3^o **L'intensité efficace**, que nous représenterons par I , est celle que l'on mesure avec les ampèremètres ; elle est plus petite que I_m .

On appelle intensité efficace d'un courant alternatif, l'intensité que devrait avoir un courant continu pour dégager dans un même conducteur, et dans le même temps,

la même quantité de chaleur que le courant alternatif.

Si le courant est sinusoïdal, l'intensité efficace est égale à l'intensité maxima divisée par $\sqrt{2}$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m.$$

Si la forme du courant est plus compliquée, cette relation n'existe plus, on peut seulement dire que $I < I_m$.

Mesure. — Nous avons vu qu'on ne peut pas employer les ampèremètres à aimant ou à cadre mobile; on utilise :

1° **Les ampèremètres thermiques** ; un modèle très usité et très précis a été décrit au n° 165 ; il est gradué en y faisant passer un courant continu ; il mesure l'intensité efficace, par définition ;

2° **Ampèremètres à fer doux** ; plusieurs modèles ont été décrits au n° 164. Ces instruments donnent une déviation d'un seul sens avec le courant alternatif (257) ; on les gradue avec le courant continu, ou mieux, par comparaison avec un ampèremètre thermique, en utilisant un courant de même fréquence que celui auquel ils sont destinés. Leur graduation peut, en effet, varier avec la fréquence à cause des courants de Foucault ;

5° **L'électrodynamomètre**, dont le principe a été donné au n° 166, peut servir à la mesure de l'intensité efficace (voy. 256) ; il est surtout utilisé dans les laboratoires.

265. **Voltmètres pour courants alternatifs.** — Les modèles d'ampèremètres que nous venons de rappeler peuvent servir aussi bien pour les courants continus que pour les courants alternatifs ; si on leur donne une très grande résistance, on les transforme en voltmètres (163) qui peuvent servir pour les deux sortes de courants, *pourvu que la self-induction soit négligeable*. On emploie :

1° **Les voltmètres thermiques**, comme celui de Hartmann et Braun. Ils ont même forme que les ampèremètres, mais on ajoute, *en série*, avec le fil dilatable, une bobine de grande résistance qui doit être dénuée de self ; cette condition est indispensable comme on le verra plus loin (268). La graduation

faite par le courant continu est valable pour le courant alternatif et donne la *f. é. m. efficace*. Comme dans le cas du courant continu, le voltmètre se monte en dérivation.

2° **Les voltmètres à fer doux**; ils sont moins précis, on les gradue par comparaison avec un thermique en utilisant un courant de même fréquence que celui auquel ils sont destinés.

3° **Les voltmètres électrodynamiques** sont peu usités.

4° **Voltmètre multicellulaire électrostatique**; on emploie, aussi, un appareil électrostatique basé sur les attractions et répulsions des corps électrisés; cet appareil ne consomme pas de courant, il est à *circuit ouvert*; il est surtout employé dans les laboratoires.

266. **Diff. de pot. et f. é. m. efficaces.** — On appelle *diff. de pot. (ou tension) efficace* entre deux extrémités d'un conducteur sans self-induction, une quantité égale à la *diff. de pot. constante (courant continu)* qui produirait la même quantité de chaleur dans le même temps.

Considérons (fig. 213) un circuit comprenant un générateur G et des lampes à incandescence dont la self est négligeable. Si le générateur est une dynamo à courant continu, on mesure la tension entre deux points M et N en mettant, en dérivation, un voltmètre V. Un ampèremètre A mesure l'intensité, et si R est la résistance du conducteur MLAN, on sait, d'après la loi d'Ohm, que

$$E_v = R \omega I^a \quad (1)$$

E étant la lecture faite au voltmètre et I l'indication de l'ampèremètre.

Si nous remplaçons le générateur continu par un alternateur et que les instruments V et A soient des *thermiques*, on con-

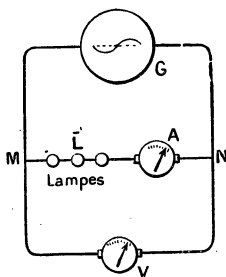


Fig. 213.

state que la loi d'Ohm s'applique et que l'on a encore $V = RI$.
 V dans ce cas est la tension efficace.

I l'intensité efficace.

Ainsi *la loi d'Ohm s'applique à un conducteur sans self en prenant pour diff. de pot. et pour intensité les valeurs efficaces.*

Nous verrons, plus loin, que cette formule (1) n'est pas applicable si le circuit est *inductif*, c'est-à-dire possède de la self-induction.

La *f. é. m. efficace* d'un alternateur se mesure en reliant ses bornes à un voltmètre thermique.

REMARQUE. — Il est évident que, pour un courant alternatif, la *f. é. m.* est aussi une quantité variable à chaque instant; comme l'intensité, cette *f. é. m.* varie périodiquement et passe par des valeurs maxima égales et de signes contraires. Si le courant est sinusoïdal, la *f. é. m.* l'est aussi et l'on démontre que la *f. é. m. efficace* est égale à la *f. é. m. maxima* divisée par $\sqrt{2}$

$$E_{\text{efficace}} = E_{\text{max}} : \sqrt{2} = 0,707 E_{\text{max}}.$$

267. Dans un circuit non inductif, la *f. é. m.* et l'intensité sont en phase. — *Lorsqu'une portion de circuit telle que MN ne possède pas de self, il y a concordance de phase entre la f.é.m. et l'intensité, c'est-à-dire que ces grandeurs sont représentées par des courbes qui ont même origine (fig. 208) : la courbe Om m'O' représente les f. é. m.; et la courbe On n'O', les intensités. Ce résultat est facile à vérifier avec deux oscillographes dont l'un donne la courbe des intensités et l'autre, auquel on a ajouté une grande résistance (sans self), joue le rôle de voltmètre et fournit la courbe des f. é. m. Ces oscillographes se placeraient en A et V (fig. 213).*

EXERCICES

1. Deux courants sinusoïdaux de même période ont pour intensités maxima 3 a. et 5 a., le second est décalé, par rapport au premier, de 50° . Déterminer l'intensité maxima du courant résultant. Calculer aussi les intensités efficaces. On fera le graphique à l'échelle de 1 cm pour 1 a.

2. Même question pour 2 courants de même intensité maxima et décalés de $1/4$ de période. Quel est le décalage du courant résultant?

3. Même question pour 3 courants de même intensité maxima, décalés les uns par rapport aux autres de $1/3$ de période.

INFLUENCE DE LA SELF-INDUCTION
ET DE LA CAPACITÉ

268. *Circuit inductif. — Effets de la self-induction.* — 1° **Augmentation apparente de la résistance** (1). — Considérons (fig. 214) une portion de circuit MN

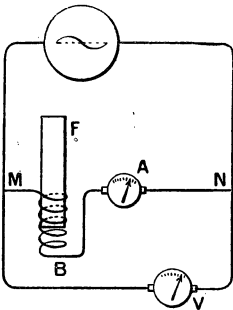


Fig. 214. — Circuit inductif. Augmentation apparente de la résistance.

contenant une bobine de réactance B dont le noyau de fer doux est mobile; A est un ampèremètre thermique et V un voltmètre.

Si le noyau de fer est enlevé, et que la bobine ait un petit nombre de tours de fil, son coefficient de self est assez petit et l'on constate que la loi d'Ohm s'applique sensiblement : $E = RI$, E étant la f. é. m. efficace lue en V; I l'intensité efficace lue en A et R la *résistance ohmique* entre M et N. Enfonçons, progressivement, le cylindre F; on voit l'intensité efficace diminuer et, si on lit la f. é. m. en V, on a :

$$E > RI \text{ ou } I < \frac{E}{R}$$

La loi d'Ohm ne s'applique plus : l'intensité du courant peut être beaucoup plus petite que celle qui serait calculée en

1. Il sera utile de relire les nos 181, 182, 183, 184.

appliquant cette loi. Tout se passe comme si la résistance avait augmenté et pris une valeur $R' > R$, et l'on peut écrire :

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

Cette résistance apparente R' s'appelle *impédance* : elle augmente avec le coefficient de self de la bobine, puisque I diminue à mesure qu'on enfonce le fer ; elle augmente aussi si l'on augmente la fréquence du courant alternatif.

2^o **Effet. Décalage de l'intensité sur la f. é. m.** — Si l'on remplace l'ampèremètre et le voltmètre par des oscillographes comme on l'a fait précédemment, et qu'on projette, en même temps, sur le tableau la courbe des intensités et celle des f. é. m., on constate qu'elles ne sont plus en phase : la courbe des intensités est en retard sur celle des f. é. m. : il y a un *décalage* qui augmente avec le coefficient de self du circuit et avec la fréquence du courant, mais ce *décalage* est toujours plus petit qu'un quart de période et correspond à l'angle φ des vecteurs tournants qui représentent les sinusoïdes. La courbe $O'mm'O''$ est celle des f. é. m. et $O_1nn'O_2$ celle des intensités (fig. 207).

269. **F. é. m. d'induction.** — Les résultats précédents que nous venons d'établir, expérimentalement, peuvent être prévus et calculés. Soit OABCD (fig. 215), la sinusoïde qui représente les variations de l'intensité. Pendant le temps $\frac{T}{4}$, l'intensité croît de zéro à sa valeur maxima ; le courant allant en augmentant, il se produit une f. é. m. d'induction de sens inverse (Loi de Lenz). Au voisinage du maximum A, le courant varie peu⁽¹⁾, et peut être regardé comme constant pendant un petit instant ; par suite, il n'y a pas de f. é. m. d'induction (on sait qu'il n'y a production de f. é. m. induite que pendant la variation). Pendant le premier quart de période, nous aurons donc une f. é. m. d'induction négative qui devient nulle à la fin

1. Nous avons expliqué précédemment qu'une fonction est sensiblement constante au voisinage d'un maximum ou d'un minimum.

de ce temps $\frac{T}{4}$ e $\frac{T}{4}$ à $\frac{T}{2}$, l'intensité diminue jusqu'à zéro, la f. é. m. d'induction est de même sens que le courant, c'est-à-dire positive. De $\frac{T}{2}$ à $3\frac{T}{4}$, l'intensité croît, mais en sens inverse, nous aurons une f. é. m. d'induction inverse du sens du courant et,

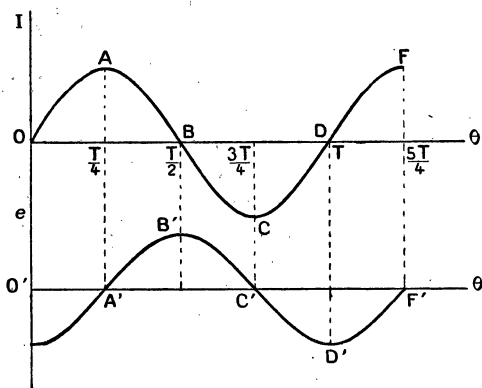


Fig. 215.

par suite, positive..., etc. La f. é. m. d'induction pourra donc être représentée par une courbe telle que $A'B'C'D'$ On voit que la f. é. m. de self-induction est périodique et de même fréquence que le courant et qu'elle est décalée, en retard, d'un quart de période $\frac{T}{4}$. Le calcul permet, en outre, d'établir que la

courbe $A'B'C'D'$... est aussi une sinusoïde si le coefficient de self du circuit est constant, ce qui a lieu lorsque le circuit contient des bobines sans fer ou, s'il y a du fer, pour les faibles intensités (perméabilité μ constante).

270. Différence de potentiel nécessaire pour produire une intensité efficace donnée dans un circuit inductif. — Considérons le courant à un instant donné, et soient v la valeur instantanée de la diff. de pot. nécessaire, e celle de la

f. é. m. d'induction et i l'intensité du courant. On a, à cet instant :

$$i = \frac{v + e}{R} \quad \text{ou} \quad v = Ri - e$$

équation qui montre qu'à un instant donné v est la somme algébrique de deux f. é. m. sinusoïdales : Ri , produit de la résistance ohmique par l'intensité variable et $(-e)$ f. é. m. d'induction prise en signe contraire. La règle donnée au n° 262 permet de construire le vecteur résultant.

Portons sur la droite Ox (fig. 216) une longueur $OA = RI_m$, I_m étant la valeur maxima du courant i ; on sait que l'on peut représenter la sinusoïde par la rotation du vecteur OA . La f. é. m. e est décalée d'un quart de période par rapport à l'intensité. Le vecteur tournant qui la représente sera $OB = e_m$ (valeur maxima de e) et $-e_m$ sera en OC . Le vecteur tournant résultant est la diagonale OR construite sur OA et OC .

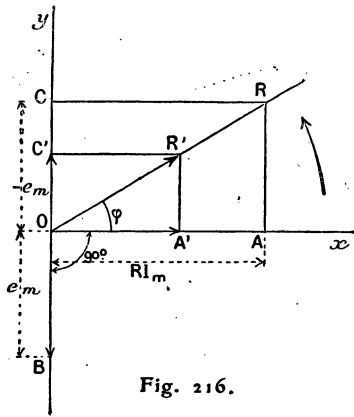


Fig. 216.

OR est égal à la valeur maxima de la diff. de pot. cherchée, $OR = V_m$.

Il est facile de passer des valeurs maxima aux valeurs efficaces : il suffit de multiplier chacune des lignes OA , OC et OR par 0,707, ce qui donne le triangle rectangle $OA'R'$ dans lequel

$$OR'^2 = OA'^2 + OC'^2; \quad \text{ou} \quad V_{\text{eff}}^2 = [RI_{\text{eff}}]^2 + e_{\text{eff}}^2 \quad (1)$$

Or, on démontre que la f. é. m. d'induction e est donnée, à chaque instant, par

$$e = 2\pi NLi \quad (2)$$

N est la fréquence, L le coefficient de self-induction que nous supposons à peu près constant; $\pi = 3,1416$.

Cette formule entraîne les suivantes :

$$e_{\text{max.}} = 2\pi NLI_{\text{max.}} \quad \text{et} \quad e_{\text{eff}} = 2\pi NLI_{\text{eff}}$$

Portons cette dernière valeur dans l'équation (1) on a :

$$V_{\text{eff.}}^2 = (RI_{\text{eff.}})^2 + (2\pi NL I_{\text{eff.}})^2$$

$$I_{\text{eff.}} = \frac{V_{\text{eff.}}}{\sqrt{R^2 + (2\pi NL)^2}} \quad (2)$$

Si nous convenons, pour simplifier l'écriture, que les grandes lettres V, I, sans indice, représentent les valeurs efficaces

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (2\pi NL)^2}} \quad (3)$$

Cette équation (3) montre que l'intensité efficace, celle que l'on mesure à l'ampèremètre, est plus petite que celle que l'on calculerait en appliquant la loi d'Ohm. Si L est nul (cas d'un circuit sans self) on retrouve la loi d'Ohm.

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

Le terme $\sqrt{R^2 + (2\pi NL)^2}$ s'appelle la *résistance apparente ou impédance*; R est la résistance ordinaire ou *résistance ohmique*; le terme $2\pi NL$ s'appelle l'*inductance* : il est proportionnel à la fréquence et au coefficient de self-induction. On pose souvent $2\pi N = \omega$ et cette grandeur s'appelle la *pulsation* du courant. La formule (3) s'écrit alors

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (4)$$

Décalage. — Nous voyons, sur la figure 216, que le courant OA est en retard sur la tension OR d'un angle φ , le triangle rectangle OAR donne

$$\text{tang. } \varphi = \frac{AR}{OA} = \frac{2\pi NL}{R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{\text{inductance}}{\text{résistance}} \quad (5)$$

Le décalage est nul pour un circuit sans self, car $L=0$ et $\text{tang. } \varphi = 0$. Pour un circuit dont l'inductance serait très grande par rapport à la résistance $\text{tg. } \varphi$ serait très grand et l'angle φ voisin de 90° angle qui n'est jamais atteint (puisqu'il faudrait $\text{tg } \varphi = \infty$).

271. **Applications. — Bobine de self.** — Il résulte de ce qui précède que l'on dispose de deux moyens pour régler un courant alternatif : faire varier la résistance ohmique ou la self-induction. Dans le cas du courant continu, on ne peut faire

varier l'intensité que par l'emploi d'un rhéostat qui consomme de l'énergie en s'échauffant. Pour un courant alternatif, on peut faire varier la self à l'aide d'une bobine de self (ou de réactance, n° 184). Cette bobine consomme très peu d'énergie car on lui donne une faible résistance ohmique, la self-induction n'entraîne pas de perte d'énergie parce que l'énergie absorbée pendant une demi-période est restituée à la demi-période suivante. On utilise des bobines de self, en particulier, avec les lampes à arc, on peut ainsi abaisser en quelque sorte la tension jusqu'à la valeur convenable sans perte appréciable d'énergie (voy. exercices).

Nous avons vu une application des bobines de self au parafoudre (n° 252).

272. Mesure de la puissance. — Puissance réelle et puissance apparente. — Facteur de puissance. — Si l'on mesure, à l'aide d'un voltmètre, la diff. de pot. efficace V entre deux points A et B d'un circuit et l'intensité efficace I , à l'aide d'un ampèremètre, le produit $V \times I$ ne représente la puissance du courant que si la diff. de pot. et l'intensité sont en concordance de phase. Dans le cas contraire, la puissance est plus petite que le produit VI . On peut le vérifier en mesurant cette puissance à l'aide d'un wattmètre.

Nous avons vu (167) que l'on peut transformer un électrodynamomètre en wattmètre; dans le cas où l'appareil doit servir pour les courants alternatifs, on donne une grande résistance à la bobine b sans lui donner une self trop grande, ce qui fausserait les résultats, en ajoutant en série à la bobine b une bobine sans self de grande résistance. L'appareil peut être gradué en watts en se servant du courant continu.

On construit aussi des wattmètres thermiques basés sur la différence des dilatations qu'éprouvent des fils parcourus l'un par le courant, l'autre par le courant pris en dérivation à travers une bobine de grande résistance. On peut aussi les graduer avec le courant continu.

Enfin, il existe encore des wattmètres basés sur les phénomènes d'induction, ils ne peuvent servir que pour les courants alternatifs; on les gradue par comparaison avec les précédents.

Lorsque le circuit compris entre les points A et B est inductif, et que l'on fait les mesures de V, I et de P^w (au wattmètre), on trouve $P < VI$.

Le produit $V \times I$ de la f. é. m. efficace par les ampères efficaces est appelé la *puissance apparente* et on l'évalue en *volts-ampères* et non en watts, cette dernière unité étant réservée pour évaluer la *puissance réelle ou effective* mesurée au wattmètre.

On appelle *facteur de puissance* le quotient

$$K = \frac{P^w}{VI} < 1$$

de sorte que $P = VIK$.

Les mesures précédentes permettent de déterminer K et si, d'autre part, on connaît à l'aide des courbes des oscillographes, le décalage de la courbe des intensités sur celle des f. é. m. et que φ soit ce décalage, on constate que

$$K = \cos \varphi, \text{ donc } P^w = VI \cos \varphi.$$

275. Explication théorique des résultats précédents. — Il est facile d'établir théoriquement la formule précédente. En effet, la puissance développée dans la résistance R du circuit est égale à RI^2 , I étant l'intensité si le courant est continu et l'intensité efficace s'il est alternatif. On peut écrire $RI^2 = RI \times I$. Or, sur la figure 216, la f. é. m. efficace RI est représentée par le vecteur OA' qui est en phase avec le courant I. D'ailleurs le triangle rectangle OA'R' donne

$$OA' = OR' \cos \varphi \text{ ou } RI = V \cos \varphi.$$

on a donc

$$P^w = RI \times I = VI \cos \varphi.$$

Courant watté et courant déwatté. — On peut aussi se rendre compte graphiquement de la diminution de la puissance par le décalage de l'intensité sur la f. é. m. Sur la figure 217 la sinusoïde A représente la f. é. m., v , la sinusoïde A' (pointillée) représente l'intensité i ; la courbe B, périodique mais non sinusoidale, est obtenue en prenant pour ordonnées les produits des ordonnées des deux courbes A et A'. On conçoit, et l'on démontre, que l'aire représentée par les hachures mesure l'énergie produite par le courant (puisque, en chaque point, on fait le produit $v \times i$). Or, dans certaines régions,

v et i sont de même signe et la surface correspondante est au-dessus de l'axe horizontal, le travail produit par le courant est positif. Dans d'autres régions, v et i sont de signes contraires, le travail est négatif;

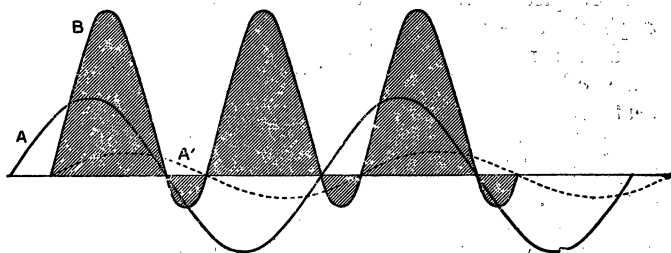


Fig. 217.

l'énergie fournie réellement par le courant est la différence des aires positives et des aires négatives.

Si le décalage est nul, il n'y a, évidemment, que des aires positives et la puissance est mesurée par VI , le facteur de puissance est égal à l'unité. Si le décalage était 90° (fig. 218), les aires positives seraient égales aux aires négatives et la puissance serait nulle. Ce cas

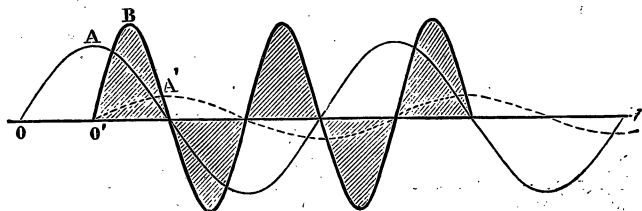


Fig. 218.

se présente pour une bobine de self de résistance négligeable, qui n'intervient que par sa self : elle ne consomme pas sensiblement d'énergie, car l'énergie absorbée pendant une demi-période est restituée à la demi-période suivante.

Un courant alternatif quelconque, qui présente un décalage, peut toujours être regardé comme la résultante de deux courants dont l'un est en phase avec la f. é. m. et l'autre décalé de 90° , c'est le cas du triangle $OA'R'$ (fig. 216). On donne le nom de *courant watté* à celui qui est en phase et qui produit la puissance (des watts) et le nom de

courant dévatté à celui qui est décalé de 90° (dévatté veut dire qui a perdu ses watts).

274. Quelques mots sur le condensateur et la capacité. — On appelle *condensateur* un appareil composé de deux surfaces conductrices placées à une petite distance l'une de l'autre et séparées par un isolant (ou diélectrique) qui peut être l'air, le verre, le mica, etc. L'étude des propriétés de ces systèmes est faite dans les cours de physique dans un des chapitres de l'électricité statique; on fera bien de revoir cette question⁽¹⁾.

Charge. — Considérons (fig. 219) deux plateaux métalliques A et B, isolés et séparés l'un de l'autre par un isolant,

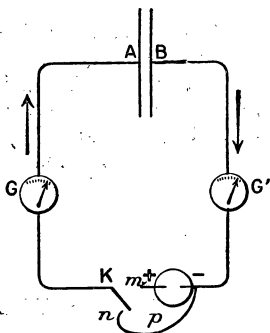


Fig. 219. — Charge et décharge d'un condensateur.

de l'air par exemple, réunissons A et B aux bornes d'un générateur p à courant continu à potentiel assez élevé — une puissante batterie d'accumulateurs. — Lorsque l'interrupteur K est mis en contact avec m , un courant de durée très courte circule de p vers A et de B vers p , une certaine quantité d'électricité passe de la source sur A et il semble qu'une quantité égale est fournie par le plateau B au générateur.

En effet, des galvanomètres très sensibles, montés en balistiques (180) permettent de constater le passage d'une même charge dans le sens des flèches. Le phénomène dure un temps très court et les aiguilles de G et G' reçoivent seulement une impulsion, puis il ne passe plus rien : l'isolant compris entre A et B arrête complètement le courant continu. On dit que le condensateur est chargé et que A a pris une certaine charge positive de q coulombs et que B a une charge égale mais négative⁽²⁾.

1. Voy. notre cours de physique, 3^e année; chap. XV.

2. La charge q n'est d'ailleurs qu'une petite fraction de coulomb (plus

Lorsque le condensateur est chargé, il y a entre A et B une diff. de pot égale à la f. é. m. du générateur.

Décharge du condensateur. — Supprimons le générateur en écartant l'interrupteur K, et amenons celui-ci en contact avec n , de façon à réunir par un conducteur les plateaux A et B; il y a production d'un courant de décharge de durée très courte et les galvanomètres indiquent le passage d'une quantité d'électricité égale à celle de la charge mais le passage a lieu en sens inverse : de A vers B en passant par G et G' (1). Après la décharge, A et B sont au même potentiel.

Capacité. — Soit q coulombs la charge de l'armature A et V la diff. de pot. entre A et B, on appelle *capacité* C

le quotient $\frac{q}{V}$

$$\text{Capacité, } C^{\text{farads}} = \frac{q^{\text{coulombs}}}{V^{\text{volts}}}$$

L'unité de capacité est le *farad* (abréviation de Faraday); cette unité, qui est celle employée dans les calculs, est extrêmement grande : l'unité pratique est le *microfarad*, millionième de farad.

La capacité d'un condensateur est proportionnelle à sa surface et en raison inverse de l'épaisseur de l'isolant; elle dépend aussi de la nature de celui-ci; elle est plus grande avec un diélectrique de verre qu'avec l'air.

Pour réaliser de grandes capacités, il faut de grandes surfaces, ce qui est encombrant. D'autre part, on ne peut pas

petite que $\frac{1}{1\ 000\ 000}$ en général). Les expressions positive et négative correspondent aux deux sortes d'électricité que l'on est obligé d'envisager dans l'électrostatique. Au point de vue du courant un déplacement de $+q$ coulombs dans un sens est équivalent à un déplacement de $-q$ coulombs en sens inverse et il revient au même de dire qu'une quantité d'électricité positive égale à q est passée de B vers p ou qu'une quantité $-q$ est passée de p vers B (voy., pour plus de précision, 3^e année, électricité statique, chap. XVIII).

1. Si le circuit AGG'B contient une self et s'il y a une relation convenable entre la self et la capacité, la décharge est oscillante; ces oscillations très rapides sont utilisées en télégraphie sans fil (voy. Cours physique, 3^e année, chap. XVIII).

diminuer l'épaisseur autant qu'on le voudrait, car on est limité par la diff. de pot. que l'on emploie. Si la distance est trop petite, une étincelle jaillit entre les armatures et le diélectrique peut être percé.

La figure 220 représente un condensateur industriel formé de feuilles d'étain séparées par des feuilles minces de mica ou

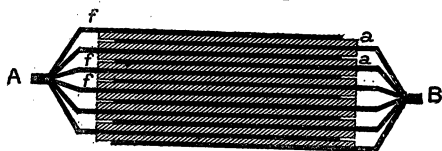


Fig. 220. — Condensateur.

de papier paraffiné; les feuilles d'étain d'ordre impair sont réunies en A et forment l'une des armatures; les feuilles d'étain

d'ordre pair sont réunies en B et constituent l'autre armature. On vend dans le commerce des condensateurs ayant des capacités de 1, 2... 10 microfarads.

Ces appareils ne peuvent supporter qu'un faible voltage, une centaine de volts. Pour certains usages, on emploie des condensateurs formés de tubes de verre recouverts intérieurement et extérieurement d'une couche mince d'argent cuivré (condensateur de Moscicki). On emploie dans les cabinets de physique les bouteilles de Leyde. Ces condensateurs peuvent résister sans *claquer*, c'est-à-dire sans être percés, à des tensions de 10 000, 20 000 volts et au delà.

275. *Effet d'une capacité sur le courant alternatif.* — 1° Un condensateur qui arrête le courant continu, lorsqu'il s'est chargé, n'arrête pas le courant alternatif. — En effet, supposons que p (fig. 219) soit un alternateur; pendant la première demi-période, A se charge positivement et B négativement, un courant circule, comme nous avons vu, dans le sens $BG'pGA$ comme s'il n'y avait pas d'isolant. A la demi-période suivante, les armatures se chargent en sens inverse et nous avons un courant dans le sens ApB . Le circuit est donc le siège d'un courant alternatif. Il est facile de vérifier ce résultat en mettant en G ou en G' un ampèremètre thermique.

2° Le condensateur se chargeant d'une manière alternative, il se décharge de même dans le circuit et il va, évidemment, réagir sur le courant en introduisant une f. é. m. périodique, de même période que le courant; on donne à cette f. é. m. le nom de *f. é. m. de condensation*. Le calcul montre que l'effet de cette f. é. m. est de diminuer l'intensité efficace du courant en donnant au circuit une résistance apparente (*impédance*) plus grande que la résistance ohmique des conducteurs qui le composent; de plus, cette f. é. m. produit un décalage de sens inverse à celui de la self-induction : *le courant est en avance sur la f. é. m. qu'il faut appliquer pour l'entretenir*. Cette f. é. m. nécessaire est, d'ailleurs, la résultante de deux autres f. é. m. périodiques, la f. é. m. effective dont la valeur efficace est RI_{eff} et la f. é. m. de condensation décalée de 90° sur la précédente. De sorte que, si l'on porte : suivant OA (fig. 221) le vecteur RI_{eff} , suivant OC le vecteur qui représente la f. é. m. efficace de condensation, la ligne OR mesure la f. é. m. à appliquer. Le courant est en avance d'un angle φ sur OR (Le sens de rotation des vecteurs est toujours le même, flèche f).

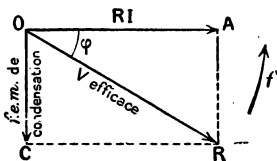


Fig. 221. — Effet d'un condensateur sur un courant alternatif.

Les résultats précédents peuvent se vérifier : 1° en mesurant l'intensité efficace du courant, on la trouve plus petite que celle que l'on calculerait par la loi d'Ohm.

2° A l'aide de deux oscillographes fonctionnant l'un comme ampèremètre, l'autre comme voltmètre, on constate le décalage des courbes d'intensité et de f. é. m.

276. *Valeurs numériques.* — On démontre que la f. é. m. de condensation a pour valeur, à chaque instant, l'intensité du courant multipliée par la fraction $\frac{1}{2\pi NC}$ dans laquelle N est la fréquence et C la capacité du condensateur (en farads). On peut aussi remplacer $2\pi N$ par ω (pulsation) comme précédemment.

La f. é. m. de condensation a donc pour valeur $\frac{I}{\omega C}$. Le triangle OAR donne :

$$V_{\text{eff.}}^2 = R^2 I^2 + \frac{I^2}{(\omega C)^2}$$

$$(1) \quad I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}$$

La quantité $\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$ s'appelle l'*impédance* et $\frac{1}{\omega C}$ la *capacité*.

Le décalage φ est donné par

$$\text{tg } \varphi = \frac{AR}{OA} = \frac{\frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{1}{\omega CR}$$

On voit que le terme $\frac{1}{\omega C}$ diminue quand on augmente C ou quand on augmente la fréquence. Pour une fréquence très grande, le courant circule comme s'il n'y avait pas de condensateur; il en est de même pour un condensateur de très grande capacité (voy. *Exercices*).

277. Circuit comprenant, en série, une self et une capacité. — Résonance. —

Considérons un circuit contenant un condensateur HH' (fig. 222), une self C, et cherchons la f. é. m. efficace qu'il faut appliquer entre A et B pour maintenir un courant efficace I. La capacité agit en sens inverse de la self et la compense plus ou moins; comme il y a diminution du décalage, il y a augmentation du facteur de puissance.

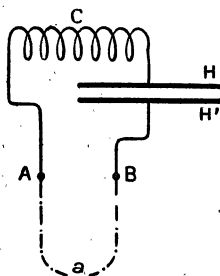


Fig. 222. — Circuit contenant, en série, une self et une capacité.

Pour trouver la f. é. m. qu'il faut appliquer, portons de O en A (fig. 225), la longueur RI; de A en B la f. é. m. efficace de self et de A en C la f. é. m. de condensation.

Les vecteurs AB et AC ont une résultante qu'on obtient en portant $BC' = AC$. La f. é. m. résultante est OC' décalée d'un angle Φ .

Si $AC = AB$, le point C' tombe en A et la capacité compense exactement la self, on dit, dans ce cas, qu'il y a *résonance* : le courant est en phase avec la f. é. m. appliquée au circuit et le facteur de puissance est égal à l'unité. On voit le rôle qu'un condensateur peut jouer dans un circuit alternatif pour augmenter la puissance disponible.

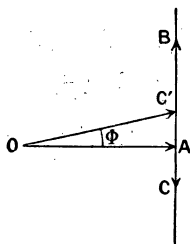


Fig. 223.

Le triangle rectangle OAC' donne $\overline{OC'^2} = \overline{OA^2} + \overline{AC'^2}$

Or, $OA = RI$, $AC' = AB - AC = \omega LI - \frac{I}{\omega C}$ et $OC' = V$; donc,

$$V^2 = R^2 I^2 + I^2 \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2$$

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \right]^2}}$$

On verrait, facilement, que $tg \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$

REMARQUE. — Lorsqu'il y a résonance, le courant est maximum et il peut arriver que la f. é. m. de self ou de condensation soit très grande, beaucoup plus grande que celle que l'on mesure au voltmètre; dans ce cas le condensateur supporte une forte tension et l'on doit surveiller son isolant pour éviter une rupture; c'est un cas qui peut se présenter pour un câble souterrain qui, avec son enveloppe, forme un condensateur.

Nous ferons encore remarquer que les lignes de transmission, même rectilignes, possèdent une certaine capacité électrique qui n'est pas toujours négligeable; cette capacité est grande pour des câbles souterrains.

278. **Groupement, en série, de plusieurs selfs et de plusieurs condensateurs.** — Proposons-nous de trouver la diff. de pot. efficace qu'il faut appliquer entre les points A et B (fig. 224) pour maintenir le courant efficace I; le circuit comprend des résistances R_1, R_2, R_3, \dots des selfs L_1, L_2, \dots des capacités

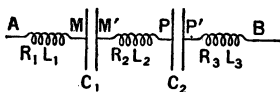


Fig. 224.

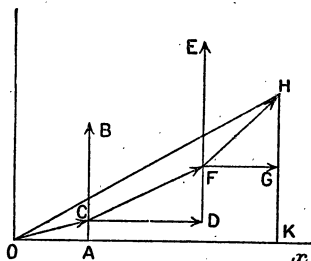


Fig. 225.

C_1, C_2, \dots Il suffit de composer plusieurs vecteurs, le vecteur résultant donnera la diff. de pot. cherchée.

A partir de O (fig. 225), portons $OA = RI$, de A en B portons ωL_1 et retranchons $\frac{1}{C_1 \omega}$ en portant la longueur qui lui correspond de B en C. Le vecteur OC donne la f. é. m. entre A et M'. En C, menons CD parallèle à Ox et égale à $R_1 I$; puis, en D, menons $DE = \omega L_2$ et retranchons $\frac{1}{C_2 \omega}$ en portant cette longueur de E en F : le vecteur CF représente la diff. de pot. entre M' et P'. Enfin menons $FG = R_3 I$ et $GH = \omega L_3$; le vecteur FH représente la diff. de pot. entre P' et B.

La diff. de pot. entre A et B s'obtient en prenant la *somme géométrique* de OC, CF et FH, c'est-à-dire la ligne OH qui ferme le polygone. Il est facile de voir que, si l'on abaisse la perpendiculaire HK, le côté OK du triangle OKH est $OK = (R_1 + R_2 + R_3) I$.

$$HK = \omega L_1 - \frac{1}{C_1 \omega} + \omega L_2 - \frac{1}{C_2 \omega} + \omega L_3$$

La diff. de pot. cherchée V, représentée par OH, est donnée par la relation $OH^2 = OK^2 + KH^2$ ou

$$V^2 = (R_1 + R_2 + R_3)^2 I^2 + \left(\omega L_1 + \omega L_2 + \omega L_3 - \frac{1}{C_1 \omega} - \frac{1}{C_2 \omega} \right)^2 I^2$$

$$I = \frac{V}{\sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + \left(\omega L_1 + \omega L_2 + \omega L_3 - \frac{1}{C_1 \omega} - \frac{1}{C_2 \omega} \right)^2}}$$

On voit que l'intensité est la même que si l'on remplaçait le circuit entre A et B par une bobine unique dont la résistance serait égale à la somme des résistances et l'inductance totale égale à la somme des inductances des bobines diminuée de la somme des capacités (1). — Si l'inductance totale est nulle, il y a résonance.

Le décalage Φ est mesuré par l'angle HOK.

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{HK}{OK} = \frac{\text{sommes des inductances} - \text{somme des capacités}}{\text{somme des résistances}}$$

279. **Groupement de selfs et de capacités en dérivation.** — Prenons le cas suivant qu'il sera facile de généraliser. La figure 226 montre clairement les données du groupement. On

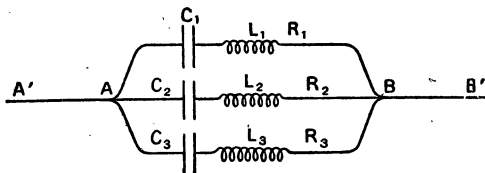


Fig. 226.

demande les intensités efficaces I_1, I_2, I_3 dans chaque dérivation et le courant I dans le circuit principal, V est la diff. de pot. efficace entre A et B.

Chaque dérivation doit être traitée séparément, comme une série dont on peut calculer l'impédance, on aura donc, facilement

$$I_1 = \frac{V}{\sqrt{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{C_1 \omega}\right)^2}}, \quad I_2 = \frac{V}{\sqrt{R_2^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{C_2 \omega}\right)^2}},$$

$$I_3 = \frac{V}{\sqrt{R_3^2 + \left(\omega L_3 - \frac{1}{C_3 \omega}\right)^2}}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\omega L_1 - \frac{1}{C_1 \omega}}{R_1}, \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\omega L_2 - \frac{1}{C_2 \omega}}{R_2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{\omega L_3 - \frac{1}{C_3 \omega}}{R_3}$$

1. Si cette dernière était plus grande le circuit serait équivalent non pas à une bobine, mais à un condensateur et une résistance.

On connaîtra donc les trois courants en grandeur efficace et en phase.

Pour trouver le courant I dans le circuit principal AA' ou BB' , il suffit de composer géométriquement les trois intensités trouvées.

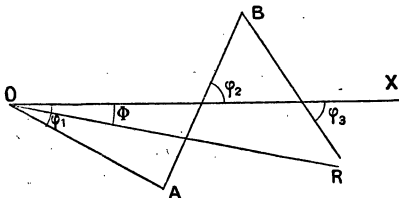


Fig. 227.

Sur Ox (fig. 227) représentant la phase de la diff. de pot. prise comme origine, on prend un point O et l'on porte le vecteur $OA = I_1$ faisant un angle φ_1 avec Ox ; φ_1 est porté au-dessous si c'est la self qui domine pour la première dérivation —

puisque, si la self domine, le courant est en retard sur la diff. de pot. prise pour origine des phases.

En A on porte $AB = I_2$ faisant un angle φ_2 avec Ox (nous avons supposé que dans la 2^e dérivation c'est la capacité qui domine, l'angle φ_2 est celui du vecteur AB prolongé avec la direction positive de Ox). Enfin on porte $BR = I_3$ faisant l'angle φ_3 avec Ox (c'est dans ce cas l'inductance qui domine).

La résultante OR (ligne qui ferme le polygone des vecteurs) qu'on peut mesurer sur le graphique et que l'on pourrait calculer par la trigonométrie, donne la valeur de I et la phase est l'angle Φ de OR avec Ox .

Il est très important de remarquer que

$$I < I_1 + I_2 + I_3$$

et que I pourrait être plus petit que certains termes du second membre. On voit qu'il ne faudrait pas appliquer la règle des courants dérivés continus.

EXERCICES

1. Aux bornes d'un électro, on établit une diff. de pot. de 20 v. — courant continu — l'intensité mesurée à l'ampèremètre est 10 a. On répète la même expérience avec du courant alternatif à 40 périodes et l'on trouve pour une diff. de pot. efficace de 20 v., une intensité efficace

de 0°,5. Montrer le rôle de la self. Calculer l'impédance de l'électro, le décalage du courant sur la force électromotrice et le coefficient de self pour $I = 0^{\circ},5$.

R : l'impédance est 40ω
le coefficient de self 0^henry,16 environ

la tg. de l'angle de décalage est 20 environ, l'angle est un peu supérieur à 87°.

Il suffit d'appliquer la formule
$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (2\pi NL)^2}}$$

la résistance se calcule avec le courant continu.

2. Une bobine de self de coefficient 0^h,005 est intercalée avec une lampe à arc; le courant efficace est 6 a., calculer la chute de tension dans la bobine dont la résistance est $0 \omega 04$; fréquence 40. Calculer la chute de tension si le courant était continu (on pose $4\pi = 12,5$).

R. chute en courant alternatif 7^v,5
— — continu 0^v,24.

Le calcul se fait en appliquant la même formule que plus haut. mais on peut, sans erreur, négliger la résistance à côté du produit $2\pi NL$, ce qui simplifie le calcul.

5. Entre deux points A et B, on intercale une lampe à incandescence de 200ω et une bobine sans fer de coefficient de self égal à 0^h,001. Calculer les tensions aux bornes de la bobine et de la lampe, si l'on applique entre A et B une tension de 120 v.; fréquence 40. Comment varient les deux tensions, si l'on introduit dans la bobine un noyau de fer qui centuple son coefficient de self.

4. Calculer la charge d'un condensateur de 5 microfarads dont les armatures présentent une diff. de pot. de 110 v.?

$$R. = 110 \times \frac{5}{1\ 000\ 000} \text{ de coulomb.}$$

il faut toujours évaluer, dans les calculs, les capacités en farads :

$$5 \text{ microf.} = \frac{5}{1\ 000\ 000} \text{ de farad.}$$

5. On considère un circuit non inductif de résistance 200ω dans lequel on entretient une force électromotrice efficace de 110 v., calculer l'intensité efficace. On coupe le circuit et l'on introduit un condensateur de 1 microf. Calculer la nouvelle intensité efficace; fréquence 40. Calculer le décalage. (On pose $4\pi = 12,5$).

R. 0^a,55 et 0^a,027.

Il suffit d'appliquer la formule du n° 276.

La tangente du décalage est 20 et l'angle un peu supérieur à 87°.

6. Traiter la même question en supposant que la fréquence soit très élevée : 2000 par seconde. Conclusion.

*7. Un circuit dans lequel on maintient une diff. de pot. efficace de 120 v. contient une bobine de résistance 4ω et de self $0^h,02$ et un condensateur de 5 microf. Calculer l'intensité efficace pour une fréquence 40. Quelle devrait être la fréquence pour qu'il y ait résonance?

8. On mesure aux bornes d'une bobine une diff. de pot. efficace de 110 v., le courant est 3 a. D'autre part, un wattmètre indique 200 watts. Quel est le facteur de puissance?

9. Avec les données du problème précédent, calculer l'angle de décalage. La résistance de la bobine étant $0 \omega 8$ et la fréquence 20. Calculer le coefficient de self (on se sert de la formule $\text{tg. } \varphi = \frac{\omega L}{R}$).

CHAPITRE XXI

ALTERNATEURS

280. *Production des courants alternatifs.* —

La production mécanique des courants alternatifs est plus simple que celle des courants continus, et ceux-ci n'ont été obtenus qu'en redressant, par l'emploi du collecteur, les courants qui sont naturellement alternatifs. Le principal avantage des alternateurs est précisément la suppression du collecteur, organe délicat, qui se détériore facilement par les étincelles. Toute machine productrice de courant se compose de pièces qui tournent dans un champ magnétique, par suite, le flux repasse, après chaque tour, par la même valeur; ses variations se présentent donc d'une façon alternative puisque, après avoir augmenté, par exemple, il doit diminuer pour revenir à la valeur initiale. Nous avons vu, en effet (174), qu'un cadre qui tourne dans un champ uniforme donne un courant alternatif dont la durée de la période est égale à celle d'un tour. Les courants qui se produisent dans les spires de l'anneau Gramme sont alternatifs, de même dans l'induit à tambour. Pour recueillir des courants alternatifs avec ces machines, il faut évidemment *exciter les inducteurs avec un courant indépendant qui doit être continu.*

Si l'on réunit par des conducteurs les fils de deux bobines M et N, diamétralement opposées, à deux bagues métalliques A et B fixées sur l'axe (fig. 228), ces bagues sont, alternativement, positive et négative, et sont les pôles de la machine employée comme alternateur. Nous verrons d'ailleurs que l'on peut conserver le collecteur et obtenir à volonté le continu

ou l'alternatif ou les deux à la fois. L'appareil, à cause de sa réversibilité, pourra servir à transformer le courant alternatif

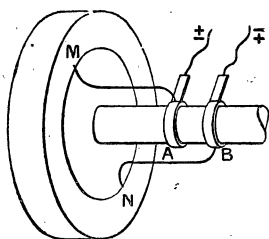


Fig. 228. — Manière d'obtenir du courant alternatif avec un anneau Gramme.

en courant continu ou inversement. La machine, ainsi employée, est appelée *commutatrice* (voy. 324).

Les machines multipolaires peuvent aussi fournir de l'alternatif; si la machine a 4 pôles, il faut mettre un fil conducteur à 4 bobines placées à angle droit, réunir la 1^{re} et la 3^e à l'une des bagues, la 2^e et la 4^e à l'autre bague. Avec une machine à 2 p pôles, il faut réunir p bobines à une bague et

les p autres à l'autre bague (en alternant l'ordre des bobines). Il est facile de voir que la fréquence est égale au produit du nombre de tours n par seconde par p , moitié du nombre de pôles. Fréquence $N = p \cdot n$.

281. Description d'un alternateur moderne.

— Les alternateurs comprennent un inducteur et un induit et n'ont pas de collecteur; dans tous ceux qui sont le plus employés aujourd'hui, l'induit est fixe et l'inducteur, placé à l'intérieur de l'induit, est mobile. Cet inducteur, fixé à l'axe, sert ordinairement de volant au moteur : on lui donne le nom de *rotor* et on appelle *stator* l'induit fixe.

Inducteur. — L'inducteur est un volant de fonte sur la jante duquel sont fixés, solidement (à cause de la force centrifuge qui est considérable), des noyaux en fer doux formés de lames de tôle mince pour éviter les courants de Foucault. Autour de ces noyaux, est bobiné le fil inducteur parcouru par un courant continu produit par une *machine excitatrice* qui, le plus souvent, est montée sur le même axe que l'inducteur⁽¹⁾.

1. On pourrait prendre une partie du courant alternatif de la machine principale, le redresser et l'envoyer dans l'inducteur : la machine serait alors auto-excitatrice; cette disposition est très rarement employée.

Le nombre des pôles est variable et dépend des dimensions de la machine. Ces pôles doivent être alternés de sorte que le sens de l'enroulement du fil inducteur change à chaque bobine (fig. 229).

Induit. — Il est formé d'une couronne feuilletée, composée de lames de tôle mince perpendiculaires à l'axe de rotation. Ces tôles sont maintenues par des joues en fonte qui servent de support. A l'intérieur de la couronne, on a pratiqué des encoches en nombre égal à celui des pôles pour le

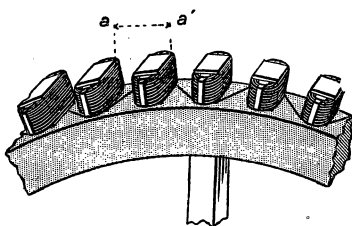


Fig. 229.
Disposition des pôles inducteurs.

courant alternatif simple (*monophasé*) (fig. 230). Dans ces encoches, on loge les bobines induites, de forme rectangulaire. Pour que toutes les bobines soient groupées en série, il faut alterner le sens de l'en-

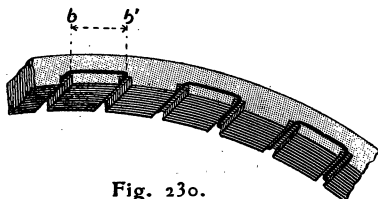


Fig. 230.

roulement parce que les variations de flux dans deux bobines consécutives, étant de sens contraire, on obtient ainsi un courant qui, à un instant donné, a même sens dans toutes les bobines (fig. 231). Le fil est coupé en un point quelconque du circuit et les bouts sont réunis aux deux bornes de l'alternateur.



Fig. 231.

Fonctionnement. — **Fréquence.** — Le fonctionne-

ment est facile à comprendre, après ce qui a été dit plus haut. Considérons l'instant où toutes les bobines induites ont leur milieu en regard d'un pôle inducteur ; et voyons ce qui se passe dans les bobines qui correspondent à des pôles nord : leur circuit est traversé par le flux maximum. A ce moment, il y a changement de sens du courant induit dans ces bobines (on sait qu'il y a changement de sens lorsqu'on passe par le maximum de flux). L'inducteur, continuant sa rotation, le flux diminue, passe par zéro lorsque les pôles inducteurs sont à égale distance de deux bobines puis le flux augmente *en changeant de sens*, car ce sont des pôles sud qui vont venir se placer en regard des bobines. Pendant la durée du passage d'un pôle d'une encoche à la suivante, le courant conserve même sens. Les effets produits sur les bobines qui étaient, au début, en regard des pôles sud, sont concordants avec ceux que l'on vient d'expliquer, à cause du changement de sens de l'enroulement sur les bobines induites.

On obtient donc un courant périodique dont la demi-période est égale au temps que met l'inducteur pour passer d'une encoche à la suivante. Supposons qu'il y ait $2 p$ pôles, et que la machine fasse n tours par seconde ; nous avons $2 p$ demi-périodes par tour ou p périodes par tour, en une seconde, $n \times p$ périodes.

fréquences $N = n \times p$.

On peut chercher, à l'oscillographe, la forme du courant, elle n'est pas, en général, sinusoïdale ; mais en donnant aux encoches et aux pièces polaires des formes convenables, on se rapproche de cette forme qui est la plus avantageuse.



Fig. 232.
Induit à trous.

282. Quelques détails complémentaires. — Les encoches dans lesquelles on loge les bobines peuvent avoir différentes formes :

1° Dans les *induits à trous* (fig. 232), les tôles sont perforées et l'on passe, dans le canal ainsi formé, le fil ou la barre de cuivre de l'induit. Le circuit est fermé par des fils appliqués sur les bases de l'induit. Cette disposition donne un courant dont la

forme est sensiblement sinusoïdale, mais le bobinage est long et doit être fait à la main.

2° **Les induits à encoches ouvertes** (fig. 233) sont faciles à construire et à réparer, car on peut employer des bobines fabriquées à l'avance, et interchangeables, il suffit de les loger dans les encoches et d'établir sur les bases la connexion d'une bobine avec la suivante. Ces induits, à cause de leurs *dents*, produisent pendant la rotation des variations supplémentaires dans le champ magnétique et le courant n'est pas sinusoïdal.



Fig. 233. — Induit à encoches ouvertes.

3° La forme la plus usitée est celle des **encoches à demi-fermées** (fig. 234) qui se prête à l'emploi des bobines interchangeables et avec lesquelles l'influence des dents est en partie corrigée.



Fig. 234. — Induit à encoches à demi-fermées.

Les conducteurs induits peuvent être des fils; on emploie aussi des barres de cuivre ou des rubans; dans ces deux derniers cas l'isolement est obtenu avec de la *micanite* ou du carton spécial (*presspahn*) logés dans les encoches.

On a reconnu qu'il y a avantage à multiplier le nombre des encoches et à répartir le fil d'une bobine sur un nombre plus grand de rainures, la forme du courant se rapproche davantage de la sinusoïde.

Le nombre des pôles d'un alternateur dépend de ses dimensions, ceux qui sont actionnés directement par une machine à vapeur ordinaire ont souvent des dimensions considérables et portent dans ces cas un grand nombre de pôles (72 pour un induit de 7 mètres de diamètre, 80 tours par minute). Les alternateurs montés directement sur l'axe d'une turbine à vapeur, dont la vitesse est très grande, ne pourraient pas, à cause de la force centrifuge, être construits avec des dimensions aussi grandes et, par suite, comportent moins de pôles (10 pôles pour une machine de 65 cm de diamètre, tournant à 600 tours par minute).

283. **Autres formes d'alternateurs.** — On a construit d'autres formes d'alternateurs mais elles ne sont plus guère usitées actuellement; nous citerons :

1° **Alternateurs système Gramme** dont l'enroulement est en anneau, c'est-à-dire que le fil est enroulé sur la couronne de l'induit de façon que le plan des spires passe par l'axe — tandis que dans l'enroulement à tambour que nous avons décrit, le plan des

spires est parallèle à l'axe de rotation. Dans ce mode d'enroulement, la partie du fil qui est sur le contour extérieur de la couronne ne subit pas d'induction, elle est inactive. On a construit des alternateurs de ce genre dans les débuts de l'éclairage électrique (1878).

2° L'alternateur que nous avons étudié est à *pôles alternés*; on a construit des alternateurs à *flux ondulé* dans lesquels le flux qui traverse une bobine, au lieu de varier d'une valeur $+\Phi$ à une valeur égale et contraire $-\Phi$, varie entre une valeur maxima Φ et une

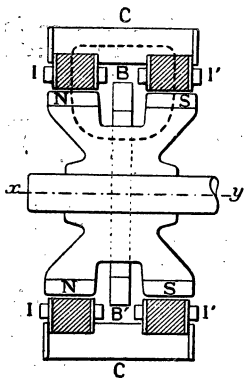


Fig. 235. — Alternateur à flux ondulé.

valeur minima Φ' de même signe, cette dernière étant toujours supérieure à zéro. La figure 235 représente la coupe simplifiée, par un plan passant par l'axe, d'un alternateur de ce genre.

On voit que tous les pôles nord N sont répartis sur une même circonférence et les pôles sud S, sur une autre, parallèle à la première.

L'induit comprend deux couronnes de fer doux réunies par une culasse circulaire de fonte C. Les bobines induites sont enroulées en I, I'. Lorsque l'inducteur tourne, et qu'un pôle nord passe devant I, le flux (représenté par la ligne ponctuée) qui traverse I est maximum. Ce flux diminue lorsque le pôle N s'éloigne de I, il est minimum lorsque I est à égale distance du pôle N

et du pôle nord qui le suit. Il est facile de voir ce qui se passe en I' et comment on fera les connexions.

La partie assez originale de cet alternateur est de n'exiger qu'une seule bobine excitatrice pour l'inducteur; cette bobine, représentée en B et B', peut être séparée du fer de l'inducteur et rester fixe, de sorte que la partie mobile est réduite au fer de l'inducteur et la machine est très robuste; elle ne se prête pas aux grandes puissances à cause de son poids. D'ailleurs, il est facile de voir que le flux est moins bien utilisé que dans un alternateur à pôles alternés. On désigne aussi ces alternateurs à flux ondulé sous le nom d'*alternateurs homopolaires*.

3° **Alternateur à fer tournant.** — **Magnéto d'allumage.** — Le mélange explosif de vapeur d'essence et d'air dans le cylindre des moteurs est enflammé par une étincelle électrique que

l'on produit de différentes façons : emploi d'accumulateurs et d'une petite bobine d'induction, emploi d'une magnéto construite de façon à donner des f. é. m. de plusieurs milliers de volts, par suite de la variation très brusque du champ magnétique. Une des formes les plus répandues est un petit alternateur à fer tournant (*magnéto Simms Bosch*) composé d'un aimant puissant dont les pôles N et S (fig. 236) sont fixes ; l'induit, également fixe, est formé de fil fin enroulé sur une sorte de navette de fer doux. L'enroulement est fait comme dans le tambour Siemens. La partie mobile comprend deux pièces de fer doux F et F' qui tournent en passant dans l'entrefer.

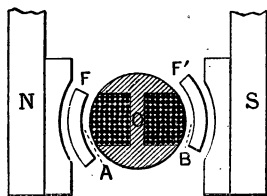


Fig. 236. — Magnéto d'allumage à fer tournant.

Les variations de flux sont très brusques et les voltages élevés. On voit facilement qu'il y a deux périodes par tour.

284. Puissance d'un alternateur. — Cette puissance dépend du circuit extérieur, puisque ce circuit peut être inductif. Nous avons vu que :

$$P_w = E \times I \times \cos \varphi$$

E étant la f. é. m. efficace, I, l'intensité efficace et $\cos \varphi$ le facteur de puissance — φ est le décalage du courant sur la f. é. m. — On a vu que l'introduction de condensateurs dans le circuit permet d'augmenter le facteur de puissance ; les condensateurs ne sont pas très employés, à cause de leur prix élevé et de leur fragilité, ils *claquent* (l'isolant est percé par une étincelle), si la tension prend, accidentellement, une valeur un peu grande.

Les constructeurs donnent pour les alternateurs la **puissance nominale ou apparente**, celle qui suppose le facteur de puissance égal à l'unité ; cette grandeur s'exprime en **volts-ampères** ou mieux en **kilovolts-ampères**. La puissance vraie s'exprime en kilowatts.

285. Mise en marche. — Régulation. — Arrêt. — Avant de mettre en marche, bien vérifier que tout est en place et qu'il n'y a aucun contact entre les fils induits et inducteurs. Mettre

en marche lentement, puis fermer le circuit d'excitation de l'excitatrice; lorsque celle-ci est amorcée, envoyer le courant dans l'inducteur et réunir, successivement, en fermant les interrupteurs, aux différents circuits d'utilisation, en maintenant le voltage normal.

Lorsqu'on augmente la charge de la machine, on lui fait débiter un courant plus intense; il en résulte, à cause de la perte de tension due à la loi d'Ohm et à la self de l'induit, une diminution de la diff. de pot. aux bornes. Cette diminution est assez grande pour qu'on puisse mettre sans danger un alternateur en court-circuit pendant un temps assez court (1). Pour ramener la tension à sa valeur normale, il suffit, lorsque le circuit ne comporte que des lampes d'agir sur le rhéostat de champ de l'excitatrice. Si le circuit contient des moteurs dont la réactance est plus grande, il faut en outre utiliser un rhéostat d'excitation sur le courant de l'excitatrice.

La régulation automatique des alternateurs se fait par le compounding qui consiste à faire varier le circuit d'excitation; c'est là un problème très complexe.

Pour arrêter, on coupe les uns après les autres les différents circuits d'utilisation; on ouvre l'interrupteur de l'inducteur puis celui de l'excitation de l'excitatrice et l'on supprime le moteur.

REMARQUE. — Il y a lieu de prendre plus de précautions qu'avec les dynamos à courant continu, car le voltage est plus élevé, en général, et le courant alternatif est plus dangereux que le continu. Il y a lieu de mettre un tapis de caoutchouc autour de l'alternateur et du tableau. Ne jamais toucher la machine en marche pour une réparation. Manœuvrer les appareils du tableau avec une seule main, les pieds sur le tapis.

286. **Couplage en parallèle.** — Le couplage en série aurait pour but d'obtenir une f. é. m. très grande; ce problème ne présente pas d'intérêt parce qu'on peut réaliser des alternateurs à haut voltage et que, de plus, on peut augmenter le voltage à l'aide d'un transformateur. D'ailleurs, le couplage en série est généralement impossible: on démontre, en effet, que deux alternateurs ainsi groupés ont un régime instable et qu'ils se mettent d'eux-mêmes en opposition, c'est-à-dire en parallèle.

1. Il est bon de remarquer que les courts-circuits sont sans danger pour un alternateur; il y a danger, au contraire, à faire rupture brusque, à cause de la self qui peut produire des étincelles capables de détruire l'isolant.

Le groupement en parallèle est très employé. Dans les usines centrales, il est souvent nécessaire d'ajouter sur la ligne un alternateur de plus pour fournir la puissance demandée.

Pour coupler deux alternateurs, il faut qu'ils aient :

1° *Même fréquence et, par suite, même vitesse;*

2° *Même f. é. m.;*

3° *Des phases opposées l'une à l'autre, mais concordantes avec celle du circuit extérieur.*

Ces conditions sont faciles à justifier : à chaque instant, les alternateurs doivent être comparables à deux dynamos à courant continu, groupées en opposition, c'est-à-dire réunies par les pôles de même nom, de façon que le courant soit nul à chaque instant dans le circuit AMBN (fig. 237). Mais, si l'on réunit le conducteur M au conducteur N par un circuit C, celui-ci devient le siège d'un courant alternatif dont l'intensité est, à chaque instant, la somme des intensités produites par chaque alternateur. Si les courants n'avaient pas même fréquence et même phase, les intensités ne s'ajouteraient pas dans le circuit C. De plus, si les f. é. m. des deux alternateurs n'étaient

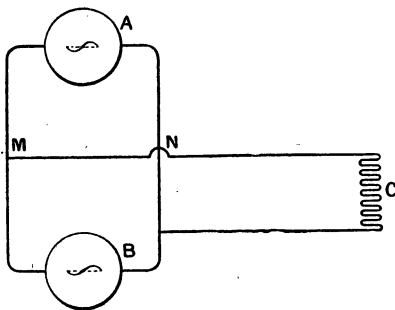


Fig. 237. — Groupement en parallèle de deux alternateurs.

pas égales, il y aurait un courant dans le circuit AMBN et l'alternateur dont la f. é. m. est la plus grande fonctionnerait comme générateur par rapport à l'autre qui fonctionnerait comme moteur : la vitesse de ce dernier tendrait à augmenter ainsi que sa f. é. m. Lorsque le réglage est établi, il est stable et tend à se maintenir de lui-même.

287. Opération du couplage. — Indicateur de phase. — Supposons qu'un alternateur A_1 (fig. 258) alimente

la ligne et qu'on veuille coupler sur celle-ci l'alternateur A_2 , qui a le même nombre de pôles ; il faudra réaliser les conditions précédentes avant d'établir les communications à l'aide de l'interrupteur bipolaire représenté en ii' .

1° L'interrupteur ouvert, on met en marche l'alternateur A_2

en le reliant au moteur, on règle l'admission de vapeur (si c'est un moteur à vapeur) de façon que A_2 ait à peu près même vitesse que A_1 .

2° On règle le voltage de A_2 et on le rend égal à celui de A_1 en agissant sur le rhéostat de l'excitatrice de l'alternateur A_2 .

3° **Indicateur de phase.** — Pour réaliser l'égalité de vitesse (et par suite de fréquence) ainsi que la concordance de

phase avec le réseau (opposition pour les alternateurs) on se sert d'un **indicateur de phase** composé de deux lampes à incandescence ayant chacune un voltage égal à celui du réseau.

Un conducteur ab réunit les pôles P et Q' d'une part et un autre conducteur cd comprenant les deux lampes en série l et l' réunit les pôles Q et P' . Pour comprendre l'emploi des lampes de phase, supposons que les deux alternateurs soient rigoureusement *synchronisés*, c'est-à-dire qu'ils aient même fréquence et qu'ils soient en concordance de phase avec la ligne (en opposition entre eux) ; à chaque instant, les pôles P et P' sont de même signe et les pôles Q et Q' ont un signe opposé à celui des pôles P et P' . Dans le circuit $ba P Q cd P' Q' b$, les machines sont à chaque instant montées en série et les f. é. m., ayant même phase, s'ajoutent de sorte que les lampes brillent d'un vif éclat qui restera constant si la synchronisation se maintient rigoureusement.

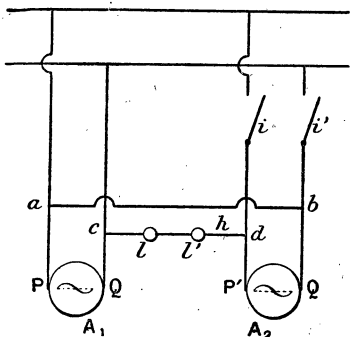


Fig. 238. — Couplage de deux alternateurs. Indicateur de phase.

Ceci posé, voyons comment on va faire le couplage. Ayant réglé le voltage de A_2 lorsque sa vitesse s'approche de celle de A_1 , on observe que les lampes l et l' subissent une série d'extinctions et d'allumages; ces oscillations d'éclairage sont d'abord rapides, puis elles deviennent plus lentes à mesure que la fréquence de A_2 se rapproche de celle de A_1 . Le nombre des allumages, par seconde, est égal à la différence des fréquences. On attend que les lampes restent brillantes, sans faiblir, pendant plusieurs secondes, et l'on couple à ce moment en fermant l'interrupteur bipolaire ii' . On a ainsi couplé pendant que les alternateurs sont en phase sur le réseau et au moment où leurs fréquences sont à peu près égales (1).

288. REMARQUE I. — Si le conducteur $a b$ réunissait les pôles P et P' et le conducteur $c d$, les pôles Q et Q' il faudrait coupler lorsque les lampes l et l' sont éteintes, cette méthode est moins sensible que le couplage à l'allumage.

289. REMARQUE II. — On peut reconnaître que l'alternateur A_2 a même vitesse que A_1 en observant A_2 éclairé par une lampe à arc

1. Le nombre des alternatives d'éclairage et d'extinction a est égal à la différence des fréquences : $a = N_1 - N_2$. Si une alternative dure 5 sec. il y a $\frac{1}{5}$ d'alternative par seconde, $\frac{1}{5} = N_1 - N_2$. Si $N_1 = 40$, on trouve $N_2 = 39,8$. Il est intéressant de remarquer que ce phénomène est analogue à celui des battements en acoustique; lorsqu'on produit deux sons qui sont sensiblement de même hauteur, on entend une série de renforcements appelés battements dont le nombre est égal à la différence des fréquences des deux sons (la fréquence est le nombre de vibrations par seconde).

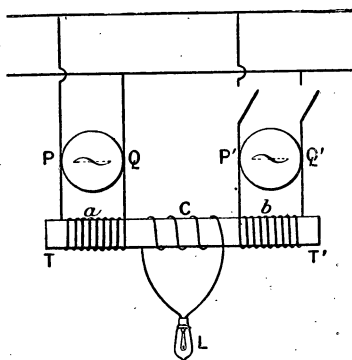


Fig. 239. — Lampe de phase montée sur un transformateur réducteur de tension.

entretenu par A_1 ; si les vitesses sont rigoureusement égales le rotor de A_2 paraît immobile. Si les vitesses sont peu différentes, le rotor de A_2 *semble* tourner lentement dans le sens de son vrai mouvement s'il va plus vite que A_1 ; en sens inverse, s'il va moins vite. Ce phénomène s'explique par la persistance des impressions lumineuses sur la rétine.

290. **Cas des alternateurs à voltage élevé.** — Dans ce cas, on ne place pas directement les lampes de phase le long du conducteur $c d$, on se sert d'un petit *transformateur réducteur de tension* composé d'un noyau de fer T T' (fig. 239) portant deux enroulements identiques, à fil fin et long reliés chacun à l'un des alternateurs. Un troisième circuit C, à fil gros, porte la lampe de phase. Le sens de l'enroulement C est tel que la lampe brille lorsque les machines sont en opposition (concordance avec la ligne).

EXERCICES

1. Un alternateur du Niagara fait 250 tours par minute, la fréquence obtenue est 25. Quel est le nombre des pôles?

2. La puissance d'un alternateur est 400 chevaux; il donne dans un circuit inductif dont le facteur de puissance est 0,8 un courant de 1000 a. Quelle est la tension efficace?

3. Un alternateur de voltage efficace 2400 v. donne dans un circuit dont le facteur de puissance est 0,75 un courant efficace de 100 ampères. Sachant qu'il emprunte une puissance de 350 chevaux à son moteur, quel est son rendement?

CHAPITRE XXII

TRANSFORMATEURS

291. **Définition.** — Nous avons vu (246) que le transport de l'énergie électrique à grandes distances n'est possible que si cette énergie est distribuée sous une tension élevée. Or les alternateurs ne donnent guère plus de 1000 à 5000 volts, et il est souvent nécessaire de transporter l'énergie sous un voltage plus élevé. On arrive à produire ces hautes tensions à l'aide d'appareils basés sur l'induction mutuelle de deux circuits ; ces appareils, *qui ne peuvent servir que pour les courants alternatifs*, sont appelés des **transformateurs**. Ils permettent, étant donnée une certaine puissance électrique P^{watts} qui est fournie par un courant d'intensité efficace I^a et de voltage efficace E^v de modifier ce courant, de façon que la même puissance (avec une faible perte) soit produite par un courant de f. é. m. efficace E' et d'intensité I' . On a donc en supposant que le transformateur ne dégrade pas d'énergie :

$$P^w = EI = E'I' \quad (1)$$

Si le transformateur donne une tension $E' > E$, on dit qu'il est **élévateur de tension** ; si $E' < E$ on dit que l'appareil est **un réducteur de tension**.

Il est évident que l'équation (1) donne

$$\frac{E}{E'} = \frac{I'}{I} \quad (2)$$

Les intensités sont inversement proportionnelles aux ten-

sions. Il s'agit, bien entendu, des f. é. m. et des intensités efficaces.

292. **Principe.** — Considérons une armature en fer doux (fig. 240) ; sur deux des côtés sont enroulées des bobines P et S ayant des nombres de tours différents ; A communique avec l'alternateur on l'appelle la **bobine primaire** ; S, qui communique avec la ligne, est appelé la **bobine secondaire** : c'est aux bornes de S que l'on recueille le courant transformé.

Le courant primaire qui circule dans P produit dans le noyau de fer un flux magnétique alternatif de même période que lui. Les spires de la bobine S, étant traversées par un flux magnétique

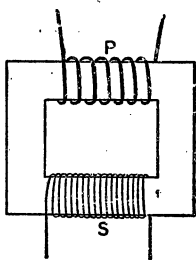


Fig. 240. — Principe des transformateurs.

variable, deviennent le siège d'un courant induit qui suit les variations du flux magnétique et qui, par suite, a même période que ce flux. Le secondaire est donc parcouru par un courant de même période que le courant primaire et si l'on suppose que les pertes (voy. plus loin) par effet Joule, hystérésis, courants de Foucault sont négligeables, la puissance du courant secondaire est égale à celle du courant primaire. On démontre que les f. é. m. aux bornes des bobines

P et S du transformateur sont à peu près dans le même rapport que les nombres des spires de ces bobines ; de sorte que, si n désigne le nombre des spires du primaire et n' le nombre des spires du secondaire, on a :

$$\frac{n'}{n} = \frac{E'}{E} \quad (3)$$

et, à cause de l'égalité (2),

$$\frac{n}{n'} = \frac{I'}{I} \quad (4)$$

Les intensités efficaces sont sensiblement en raison inverse des nombres de spires.

Le rapport $\frac{n'}{n}$ est appelé *rapport de transformation*.

Si le transformateur est un *élévateur de tension*, il y a un petit nombre de tours au primaire et un grand nombre au secondaire et le rapport de transformation est plus grand que l'unité. — On utilise des rapports de 2 à 20. — Le rapport serait pris en sens inverse pour un réducteur de tension et l'appareil est réversible, c'est-à-dire que si, en prenant P comme primaire, il y a élévation de la tension, on aura une réduction en prenant S comme bobine primaire.

295. Fonctionnement à vide. — Nous ne démontrons pas d'une façon rigoureuse l'égalité (3) ; mais on peut se rendre compte de deux manières de son exactitude dans le cas où le transformateur *fonctionne à vide*, c'est-à-dire lorsque le circuit secondaire est ouvert et n'entretient aucun récepteur :

1° Par l'expérience. — On mesure la diff. de pot. aux bornes du primaire relié à l'alternateur et la diff. de pot. aux bornes du secondaire ouvert et si l'on connaît les nombres des spires on vérifie l'égalité (3). Il y a avantage à employer un voltmètre électrostatique.

2° Théoriquement. — Lorsque le secondaire est ouvert, le transformateur peut être comparé à une bobine de self dont l'impédance est considérable : le courant est donc très faible dans le primaire de sorte que, si on néglige la chute de tension due à la loi d'Ohm, dans le primaire, on peut dire que la f. é. m. de self fait équilibre, à peu près, à la tension qu'on applique à ses bornes ; si nous admettons cette égalité, nous avons : f. é. m. de self (E) = diff. de pot. appliquée (V).

Or la f. é. m. E est produite par les variations du flux magnétique dans le noyau, si Φ est cette variation pour une demi-période et pour une spire, la variation dans les n spires du primaire est $n\Phi$.

Les spires du secondaire sont évidemment traversées par le même flux si le *circuit magnétique est fermé et ne présente pas de fuites magnétiques*, la variation de flux, pour une demi-période, à travers les n' spires de secondaire est $n'\Phi$ et il en résulte, aux bornes du secondaire une f. é. m. E'.

Or, d'après les lois de l'induction, on sait que les f. é. m. induites

sont proportionnelles aux variations de flux (pour une durée égale de cette variation, ici une demi-période) on a donc :

$$\frac{E}{E'} = \frac{n\Phi}{n'\Phi} = \frac{n}{n'}$$

294. Remarque. — *La dépense à vide est négligeable.* — Il est facile de mesurer la dépense à vide, dans le primaire, à l'aide d'un wattmètre ; on trouve, ainsi, une puissance très faible et négligeable parce que le courant primaire possède une faible intensité et surtout à cause du facteur de puissance qui est très petit — le décalage de l'intensité sur la f. é. m. est voisin de 90° (courant dévatté) à cause de la grandeur de la self. Il résulte de cette propriété qu'il n'y a pas d'inconvénient à laisser le transformateur en circuit sur l'alternateur lorsqu'on ne demande rien au secondaire.

295. Fonctionnement en charge. — *Auto-régulation.* — On dit que le transformateur *est chargé* lorsque le secondaire communique avec un circuit d'utilisation. Supposons que ce dernier ne contienne pas de self et qu'il soit formé, par exemple, de lampes. A mesure que l'on augmente le nombre des lampes en dérivation sur le secondaire, on constate que l'intensité (efficace) du courant secondaire augmente et, en même temps, celle du courant primaire augmente aussi de façon que la relation

$$\frac{n}{n'} = \frac{I'}{I} \quad (4)$$

reste à peu près satisfaite ⁽¹⁾. On voit donc que le transformateur se *règle automatiquement* sur la charge qu'on lui impose : cette propriété est capitale. On peut se rendre compte, approximativement, de ce fonctionnement, en remarquant que, lorsque le secondaire fournit un courant, il crée dans le noyau un flux qui, en vertu de la loi de Lenz, tend à s'opposer au flux inducteur ; il en résulte une diminution de l'impédance de la

¹. On démontre que la relation exacte est $\frac{n}{n'} = \frac{I'}{\sqrt{I^2 - I_0^2}}$, dans laquelle I' est le courant secondaire, I le courant primaire en charge et I_0 le courant primaire à vide.

bobine primaire de sorte qu'elle se laisse traverser par un courant plus intense et de moins en moins décalé par rapport à la f. é. m. appliquée. *Plus le secondaire fournit d'énergie, plus le primaire en absorbe à l'alternateur.*

Cette dernière conclusion s'applique encore lorsque le circuit d'utilisation contient une self, mais il est plus difficile d'établir la relation (4) à cause de l'influence de cette self sur la valeur de I' .

296. **Rendement.** — **Pertes.** — Le rendement des transformateurs est très élevé, surtout lorsqu'on les utilise pour la charge à laquelle ils correspondent ; ce rendement, qui est le *quotient de la puissance utilisée au secondaire par celle que consomme le primaire*, peut atteindre 97 pour 100.

Les pertes sont dues : 1° à l'effet Joule dans les fils des bobines ; 2° à l'hystérésis ; on rend cette perte aussi petite que possible par l'emploi de tôles très douces et spéciales ; 3° aux courants de Foucault ; on les réduit en employant des circuits magnétiques feuilletés formés de tôles de 0^{mm},3 à 0^{mm},5 d'épaisseur. Ces tôles sont isolées en les recouvrant d'un vernis ou de papier découpé et verni.

297. **Principales formes.** — Dans un transformateur, il y a à considérer *trois circuits* : le **primaire**, le **secondaire** et le **circuit magnétique**. Il y a des transformateurs à **circuit magnétique ouvert** dont le type est la bobine d'induction⁽¹⁾, ce ne sont pas de véritables appareils industriels ; tous les transformateurs utilisés dans l'industrie sont à **circuit magnétique fermé**.

Lorsque les bobines sont à l'extérieur du circuit magnétique on dit que le transformateur est à **noyau** ; dans d'autres modèles, le fer est à l'extérieur des bobines, dans ce cas, le transformateur est dit **cuirassé**. Voici quelques types usuels :

Transformateurs à noyau et à circuit fermé simple. — C'est celui que nous avons pris comme type (fig. 240). Le noyau est formé par des tôles minces et isolées ayant la forme d'U (fig. 241) que l'on empile les unes sur les autres. Par la

1. Le transformateur de l'indicateur de phase (fig. 239) est à circuit ouvert.

partie ouverte de l'U, on introduit les bobines qu'on a pu enrouler sur le tour. On ferme le circuit magnétique à l'aide d'un paquet de tôles que l'on introduit en C.

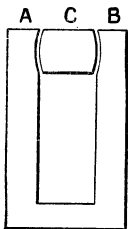


Fig. 241. — Forme des tôles d'un transformateur à noyau.

Les bobines présentent différentes positions : sur chaque branche, on introduit, l'une au-dessous de l'autre, la bobine à gros fil et la bobine à fil fin ; ou bien les deux bobines sont concentriques, dans ce cas celle à basse tension (gros fil) est placée à l'intérieur, comme pour les bobines d'induction. On forme, aussi, la bobine à haute tension de plusieurs galettes superposées.

Transformateurs à cuirasse et à circuit double.

— Voici une forme assez répandue : les tôles découpées ont la forme de la figure 242 ; elles sont fendues en *a* et *b*, de façon à pouvoir relever les parties *am* et *bn*. D'autre part, on a pré-

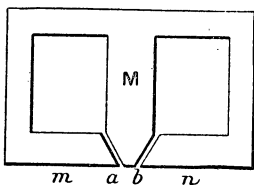


Fig. 242. — Forme des tôles de transformateur à cuirasse.

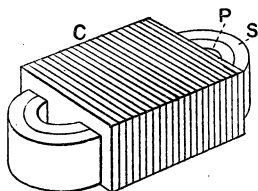


Fig. 243. — Transformateur à cuirasse.

paré les bobines primaires et secondaires qui sont enroulées concentriquement l'une sur l'autre et dans le vide central (suivant l'axe des bobines) on introduit la partie M des tôles ; et l'on rabat ensuite les parties relevées *am* et *bn* ; ces tôles sont, d'ailleurs, introduites alternativement à l'un des bouts et à l'autre de la bobine. On les serre fortement avec des boulons isolés (pour éviter les courants de Foucault). Au lieu de bobines concentriques, on peut employer des bobines placées dans le

prolongement l'une de l'autre. La figure 243 représente un schéma de l'appareil tout monté. C représente le circuit magnétique formé par les tôles, P le primaire et S le secondaire. Ces exemples suffiront à faire comprendre les autres dispositions. Ajoutons que l'on préfère souvent les transformateurs à noyau parce qu'ils s'échauffent moins que les transformateurs à cuirasse.

La figure 244 représente l'aspect extérieur d'un transformateur.

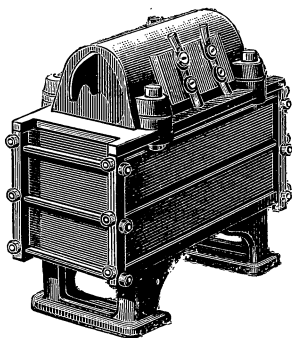


Fig. 244. — Transformateur, vue extérieure.

298. Installation. — Il est nécessaire de refroidir ces appareils; on y arrive, pour les transformateurs de faible puissance, en ménageant à travers les tôles des canaux d'aération. Avec des modèles plus puissants, on produit une ventilation forcée à l'aide d'un ventilateur mis en mouvement par un petit moteur.

Les transformateurs sont toujours placés dans des caisses en fonte et, pour ceux dont le voltage est supérieur à 3000 ou 4000 volts, on assure un bon isolement en les noyant dans l'huile (huile lourde de pétrole ou de paraffine). L'huile est refroidie par un serpentín dans lequel circule un courant d'eau froide.

Il est nécessaire que les deux circuits électriques soient parfaitement isolés l'un de l'autre; si la décharge de la bobine à haute tension venait à se produire sur le fil à basse tension il pourrait en résulter des accidents graves pour les personnes et les appareils. On évite ces accidents en plaçant des parafoudres sur le circuit.

Il est prudent de ne jamais toucher un transformateur à moins d'être bien familiarisé avec son fonctionnement.

299. Usages. — Le plus important est le transport de

l'énergie à grandes distances. A la station génératrice, on élève la tension à l'aide d'un transformateur élévateur. A la station réceptrice on intercale un transformateur réducteur entre la ligne et les appareils d'utilisation (voy. 329). On les emploie également toutes les fois qu'il est utile de modifier la tension, par exemple, pour alimenter des lampes à incandescence à bas voltage.

300. Bobine d'induction. — La bobine d'induction, souvent appelée bobine de Ruhmkorff, est un transformateur à circuit magnétique ouvert dont le primaire est à gros fil et le secondaire à fil fin et très long (plusieurs kilomètres).

Elle est entretenue, ordinairement, par un courant qui a toujours même sens mais qui est interrompu un grand nombre de fois par seconde. Comme ce n'est pas un véritable appareil industriel nous n'en ferons qu'une étude sommaire.

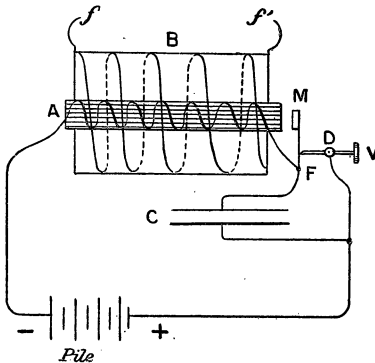


Fig. 245. — Bobine d'induction.

Le noyau magnétique est constitué par des fils de fer doux isolés au vernis ; sur ce noyau est enroulé le primaire à gros fil A (fig. 245). Le secondaire, souvent formé de plusieurs galettes juxtaposées, est placé autour du primaire et ses extrémités sont en f et f' . Le primaire est alimenté avec du courant continu (piles ou accumula-

teurs) et les interruptions sont obtenues par des interrupteurs divers. Le plus simple est le trembleur représenté dans la figure. Le courant arrive au support D qui porte la vis V ; il passe par cette vis et la lame élastique FM, circule dans la bobine A et revient à la pile. Dès que le courant passe, le noyau s'aimante, attire la petite pièce de fer M (marteau) : la vis V ne touche plus la lame et le courant cesse de passer. L'aimantation cesse également et la lame revient en contact avec la vis : le courant passe à nouveau, etc. Pour les grandes bobines, on emploie d'autres interrupteurs : les uns sont entretenus par un courant indépendant, d'autres par le courant primaire.

301. **Fonctionnement de la bobine.** — Lorsque le circuit est fermé, le courant commence à passer dans la bobine primaire; mais, comme il doit aimanter le fer doux, il y a une self-induction assez grande et le courant ne s'établit que lentement, comme le montre le graphique AMC (fig. 246). Cette courbe est obtenue en portant en abscisses les temps et en ordonnées les inten-

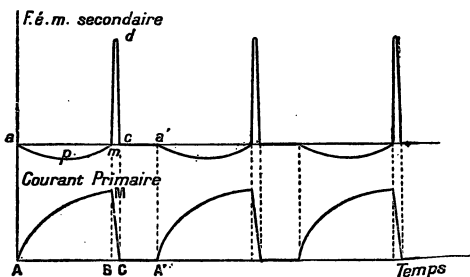


Fig. 246. — Fonctionnement de la bobine.

sités du courant primaire; le courant met le temps AB pour atteindre son intensité normale. A ce moment, le circuit est coupé, mais il se produit entre la lame et la vis une étincelle qui prolonge un peu la rupture dont la durée est représentée par BC. Fizeau, en plaçant un condensateur C (fig. 245) en dérivation sur le primaire, a considérablement diminué la durée de la rupture et amélioré la bobine; nous allons voir, en effet, que la rupture seule présente un intérêt.

Le courant primaire de fermeture produit une f. é. m. induite dans le secondaire; cette f. é. m. correspond à un courant inverse du courant primaire; mais, comme la variation de flux dure un certain temps, la f. é. m. inverse ne prend pas une grande valeur: sa variation est représentée par la courbe *apm*. La rupture produit un courant induit direct (même sens que le primaire) qui correspond à une f. é. m. très grande puisque la variation de flux est brusque et de même grandeur (sens inverse) qu'à la fermeture. La f. é. m. du courant direct est représentée par une courbe telle que *mdc*. Pendant le temps représenté par *ca'* égal à *CA'*, il n'y a rien au secondaire.

Lorsqu'on approche très près les extrémités des fils *f* et *f'*, on obtient une série d'étincelles qui correspondent au courant direct et au courant inverse. Si l'on augmente la distance, il ne passe plus

que les étincelles qui correspondent au courant direct dont la f. é. m. est de beaucoup la plus grande. C'est ordinairement de cette manière que la bobine est utilisée.

Les usages de la bobine sont très nombreux : charge de condensateurs, étude des décharges électriques dans les gaz : rayons cathodiques, rayons X, télégraphie sans fil, etc. (1). La bobine est employée pour l'inflammation des gaz combustibles dans les moteurs à explosion.

EXERCICES

1. Un transformateur placé sur une ligne à 2500 v. est destiné à alimenter 80 lampes en dérivation 110 v. et 0^a,5 ; son rendement est 0,95. Quelle est l'intensité efficace dans le primaire. Quelle est cette intensité à vide, la dépense, dans ce cas, étant 3 pour 100 de la dépense en charge ?
R. 1^a,8 et 0^a,054.

* 2. On propose de calculer le rendement d'un transformateur réducteur de tension avec les données suivantes : puissance consommée à vide 500 watts, résistances des circuits 6 ω . et 0 ω ,005, intensités en charge 6 a. et 250 a. Voltage au secondaire (circuit d'utilisation) 120 v.

R. 0,967.

La puissance utile est $250 \times 120 = 30\ 000\text{w}$.

La puissance dépensée s'obtient en ajoutant les pertes qui sont :

1^o effet Joule dans primaire (Ri^2) = 6×6^2 ,

2^o effet Joule dans secondaire = $0,005 \times 250^2$.

Les autres pertes (hystérésis, courants de Foucault) sont à peu près mesurées par la dépense à vide, 500w.

$$\text{rendement} = \frac{50\ 000}{30\ 000 + 6 \times 6^2 + 0,005 \times 250^2 + 500}$$

3. Un transformateur placé sur une ligne à 2200 v. abaisse la tension à 220 v., il emprunte à la ligne une puissance 2 kw. et son rendement est 94 pour 100. Quelle est l'intensité efficace dans le secondaire ?

* 4. Dans un transformateur, le nombre de spires du primaire est 60, la section du noyau est 120 cm² et le courant a pour intensité efficace 4^a,25 quel est le flux d'induction maximum à travers la bobine primaire (se servir du tableau de la page 154), longueur moyenne du circuit magnétique 180 cm., on suppose le secondaire ouvert.

R. 1 200 000 max. environ.

L'intensité efficace correspond à une intensité maxima 4^a,25 : 0.707 = 6 a.

Le nombre des ampères-tours par cm. est $\frac{1,25 \times 6 \times 60}{180} = 2,50$. Le tableau indique que pour 2,47 (Tôles) l'induction est 10000, le nombre est à peu près le même pour 2,5. Le flux est donc

$$\Phi = 10\ 000 \times 120 = 1\ 200\ 000 \text{ environ.}$$

1. Voy. pour ces applications notre *Cours de Physique*, 3^e année.

CHAPITRE XXIII

COURANTS POLYPHASÉS — CHAMPS TOURNANTS

302. **Définitions.** — On appelle *courants polyphasés* un ensemble de courants alternatifs de même période qui présentent entre eux une différence de phase qui est une partie aliquote de la période. On n'utilise dans l'industrie que les courants *diphasés* et *triphasés*. On désigne le courant alternatif simple sous le nom de courant *monophasé*.

On appelle *courants diphasés* deux courants alternatifs de même période présentant entre eux une différence de phase de $1/4$ de période et *courants triphasés* un groupe de trois courants de même fréquence tels que le second soit décalé de $1/3$ de période par rapport au premier; et, le troisième, décalé de $2/3$ de période par rapport au premier. On s'arrange, ordinairement, pour que les courants aient, dans chaque circuit, des intensités à peu près égales.

Nous allons étudier les courants triphasés qui sont les plus usités et nous supposerons qu'il s'agit de courants sinusoïdaux et de même intensité.

303. **Courants triphasés. — Définition.** — Le premier courant est représenté (fig. 247) par la sinusoïde 1 (trait plein) qui correspond au vecteur tournant qui est en OA. au départ. Le second est figuré par la courbe 2, identique à la précédente, qu'on aurait transporté de gauche à droite d'une longueur O'M égale à $\frac{1}{3}$ de la période O'T et le troisième corres-

pond à la courbe 3 identique à 1 qu'on aurait transportée vers la droite d'une quantité $O'N$ égale aux $\frac{2}{3}$ de $O'T$. La courbe 2 correspond à la rotation du vecteur qui, au départ, était en OB

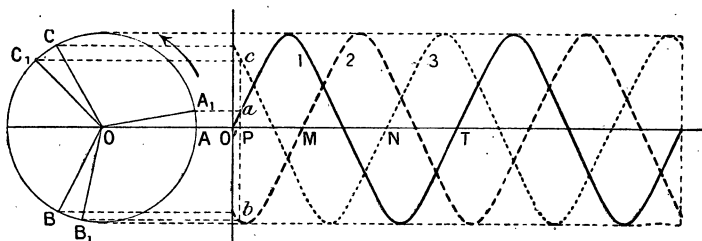


Fig. 247. — Courants triphasés.

à 120° en *arrière* de OA et la courbe 3 est engendrée par la projection de l'extrémité du vecteur OC en *arrière* de 120° sur OB et, par suite, de 240° en *arrière* de OA .

304. 1^{re} **Propriété.** — *A chaque instant, la somme des intensités des trois courants triphasés est nulle.*

Ceci est évident à l'instant où les trois vecteurs occupent les portions OA , OB , OC , car l'intensité du premier est nulle et les deux autres ont des valeurs égales et contraires.

Considérons un instant quelconque représenté par l'abscisse $O'P$, le premier courant a une intensité représentée par Pa , le second par Pb , il est de sens opposé au premier, l'intensité du troisième est Pc . On peut vérifier, sur le graphique que :

$$Pa - Pb + Pc = 0.$$

Nous remarquerons que, à l'instant considéré, les trois vecteurs tournants occupent les positions OA_1 , OB_1 et OC_1 . Les points a , b , c sont situés sur les parallèles à OO' menés par A_1 , B_1 et C_1 .

Démonstration géométrique. — Le résultat que nous venons de vérifier peut se démontrer rigoureusement. Il suffit de démontrer que, si dans un cercle on trace trois rayons à 120° et

qu'on abaisse des extrémités des perpendiculaires sur un diamètre quelconque, la somme algébrique de ces trois perpendiculaires est nulle.

Soient OA, OB et OC (fig. 248) les trois rayons à 120°; AM, BN et CP les perpendiculaires abaissées sur le diamètre Ox. Nous comptons positivement les perpendiculaires placées au-dessus de Ox et négativement celle qui est au-dessous. Il faut prouver que

$$AM + CP - BN = 0 \quad (1)$$

ou que, en valeur absolue

$$BN = AM + CP \quad (2)$$

Prolongeons BO jusqu'en B', et abaissons la perpendiculaire B'N' sur Ox; il est évident que, en valeur absolue, B'N' = BN. L'égalité (2)

peut être remplacée par B'N' = AM + CP. Menons AH parallèle à Ox, on a HN' = AM. Il reste donc à démontrer que B'H = CP.

Joignons B'A, il est facile de voir que cette droite n'est autre chose que le côté de l'hexagone régulier et qu'elle est égale et parallèle au rayon OC. On déduit, facilement, de là, l'égalité des triangles COP et AB'H et, par suite, l'égalité des droites B'H et CP.

REMARQUE. — Autre démonstration. — Les trois courants correspondent aux trois vecteurs OA, OB, OC; pour trouver le vecteur tournant qui correspond à leur somme, il suffit (265) de construire la résultante des trois lignes. Par A, on mène AB' égale et parallèle à OC et par B' une ligne égale et parallèle à OB. Il est facile de voir que l'on retombe sur le point O et que le polygone des vecteurs se ferme sur lui-même, de sorte que la résultante est nulle.

505. **Alternateurs triphasés.** — On pourrait produire des courants triphasés en montant, sur un même arbre, trois alternateurs dans lesquels les bobines induites seraient disposées exactement de la même façon et dont les pôles inducteurs seraient décalés d'un angle convenable. Cette disposition est peu pratique bien qu'elle ait été employée.

Ordinairement, on se sert d'un seul alternateur construit comme celui qui a été décrit au n° 281; mais on place sur l'induit trois circuits indépendants (fig. 249). La figure 250

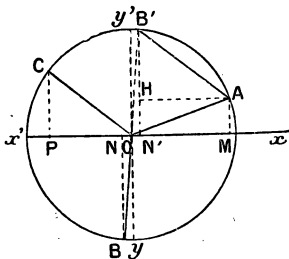


Fig. 248.

circuit est parcouru par un premier courant alternatif. Un second circuit B est enroulé dans les encoches 3, 6, 9, 12...; il est parcouru par un courant alternatif, mais ce courant est en retard d'un tiers de période sur le précédent, puisque la période correspond au temps que met un même pôle inducteur pour passer de la rainure 1 à la rainure 7 et que l'intervalle 1-3 est le tiers de 1-7. Le troisième circuit comprend des bobines

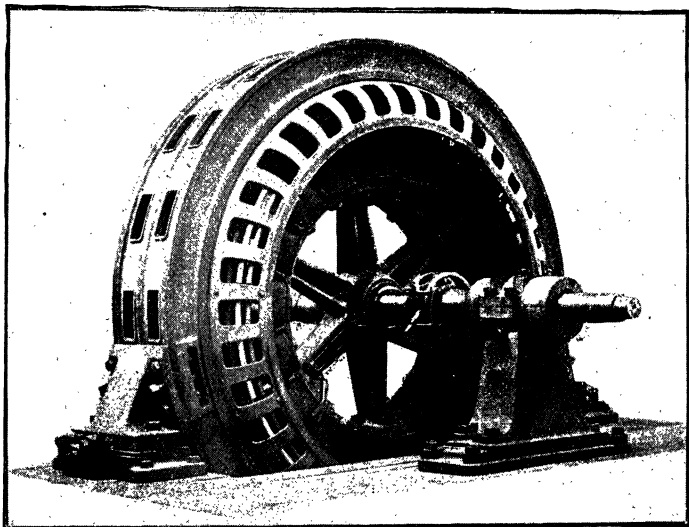


Fig. 251. — Alternateur triphasé.

enroulées dans les encoches 5, 8, 11...; il est parcouru par un courant en retard de $2/3$ de période sur le premier. Les trois circuits pourraient être tout à fait indépendants, dans ce cas, les extrémités de chacun des circuits seraient fixées à deux bornes et l'on pourrait utiliser les trois courants alternatifs séparément. Cette disposition ne présente pas d'intérêt; elle exigerait 6 bornes à l'alternateur et 6 fils de distribution.

Nous verrons, ci-dessous, que l'on réduit le nombre des fils

à 3 (ou à 4); dans ce cas, l'alternateur triphasé ne présente que 3 bornes, quelquefois une 4^e pour le fil neutre (voy. plus loin).

La figure 251 donne une vue d'ensemble d'un alternateur triphasé. Les inducteurs, comme pour les alternateurs ordinaires sont excités par du courant continu qu'on amène à l'aide de deux balais qui frottent sur deux bagues portées par l'axe. L'excitatrice est, le plus souvent, calée sur le même axe que

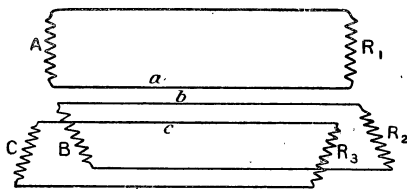


Fig. 251.

Montage en trois circuits indépendants.

alimentant les récepteurs R_1 , R_2 , R_3 , chaque circuit de l'alternateur comporte deux bornes. Une simplification se présente à

l'esprit; réunir en un seul fil les trois fils a, b, c (fig. 253): le fil OO' joue le rôle de fil de retour pour les trois circuits; on lui donne le nom de *fil neutre*. Ce montage est appelé *montage en étoile*. Le générateur comporte quatre bornes: la

borne neutre O reliée à l'une des extrémités de chaque bobine génératrice et les trois autres réunies aux trois autres extrémités. Montage analogue pour les trois groupes de récepteurs.

Si les trois lignes sont également chargées, c'est-à-dire alimentent des récepteurs identiques, elles sont parcourues par des

l'alternateur. L'inducteur sert souvent de volant au moteur qui peut être une turbine à vapeur (turbo-alternateur).

306. **Montage en étoile.** — La figure 252 représente le montage à trois circuits indépendants

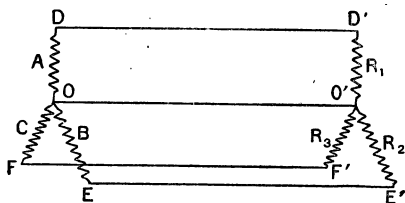


Fig. 253. — Montage en étoile. Le fil neutre OO' peut être supprimé si les trois phases sont également chargées.

courants de même intensité efficace et décalés comme il a été dit plus haut. Le courant de retour, devant être égal à la somme des trois courants de ligne, est nul et l'on peut supprimer le fil OO' . Ainsi donc, si l'on règle convenablement la charge de chaque circuit on peut se contenter de 3 fils, d'où une économie importante dans l'installation. Dans ce cas, on réunit souvent les points neutres O et O' , au sol.

Si les circuits ne sont pas également chargés, il faut conserver le fil neutre. Cette disposition est celle à laquelle on donne aujourd'hui la préférence; il y a quelques années on utilisait surtout la distribution à 3 fils.

Tension entre deux fils ou tension composée. — Supposons les circuits également chargés; la tension entre les bornes D , E et F et le point neutre a une certaine valeur efficace V , la même pour les trois bobines génératrices. Cette tension est appelée la *tension simple*. La diff. de pot. entre deux fils de ligne est plus grande que V . En effet, si nous voulons la diff. de pot. entre les deux points D et E , par exemple, il faut composer deux f. é. m. alternatives égales à V et décalées, l'une par rapport à l'autre, de 120° ; mais ces f. é.

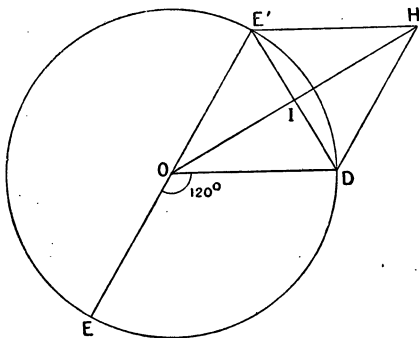


Fig. 254.

m. sont en opposition puisque, si l'on réunissait D et E par un fil, elles tendraient à produire dans ce fil des courants opposés. Ce n'est donc pas la somme, mais la différence de ces tensions qu'il faut trouver. Soit OD le vecteur tournant représentant la première tension et OE celui qui représente la seconde. Pour faire la différence nous composerons le vecteur OD (fig. 254) avec un vecteur OE' égal et opposé à OE . La diagonale OH représente la valeur efficace de la f. é. m. résultante.

Pour trouver la valeur de OH il suffit de joindre E'D, de remarquer que l'angle E'OD vaut 60° et que E'D est le côté de l'hexagone régulier dont l'apothème OI est égal à $\frac{OD \times \sqrt{3}}{2}$. Par suite :

$$OH = 2OI = OD \times \sqrt{3} = V\sqrt{3}.$$

La tension entre deux fils, ou tension composée, est égale à la tension simple multipliée par $\sqrt{3}$ (1).

Si l'on désigne par U la tension composée, $U = V\sqrt{3}$.

Intensité. — Si les fils sont également chargés, ils sont tous parcourus par un courant de même intensité efficace.

307. Montage en triangle. — Les trois circuits générateurs sont réunis en série; c'est-à-dire que le bout finissant d'une bobine est réuni au bout commençant de la suivante⁽²⁾. Aux points de jonction DEF (fig. 255)

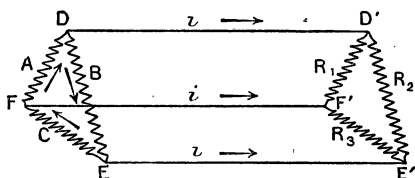


Fig. 255. — Montage en triangle.

on fixe les 3 fils de ligne. Aux extrémités D', E', F' des lignes, on monte les récepteurs sur des conducteurs qui joignent ces points deux à deux.

Tension entre deux fils. — La tension

entre les points D et E est égale à la tension due à la bobine génératrice B : *La tension composée est égale à la tension simple V.*

Intensité en ligne. — Si le circuit est équilibré, c'est-à-dire si les trois phases (les trois conducteurs) sont également chargées, le courant dans les bobines génératrices a partout même valeur efficace et la même valeur maximum; mais, à un instant donné, la somme des trois courants est nulle à cause des différences de phases (304).

Soient i_a et i_b les intensités dans A et B à un instant donné et i

1. Cette f. é. m. composée est en avance de 30° ($\frac{1}{12}$ de période) sur la f. é. m. OD.

2. Ou ce qui revient au même, on a fait sur le circuit générateur, supposé unique, 3 prises de courant placées à 120° .

l'intensité dans le fil de ligne DD'; en appliquant la règle de Kirchoff au point D on a

$$i_a = i + i_b \text{ ou } i = i_a - i_b = i_a - (-i_b).$$

On aura le courant i dans la ligne, en cherchant la résultante des deux courants i_a et $-i_b$. On trouvera l'intensité efficace I (1) dans la ligne DD' par la construction de la figure 254. OD représente l'intensité efficace I_a dans A, OE, l'intensité efficace dans B; le vecteur OE' est égal et opposé à OE et l'intensité efficace cherchée I est mesurée par $OH = OD\sqrt{3}$.

L'intensité efficace dans le fil de ligne est égale à l'intensité efficace dans l'une des bobines génératrices multipliée par $\sqrt{3}$.

$$I = I_a \sqrt{3}.$$

308. Puissance fournie par un alternateur triphasé. — 1° Montage en étoile. — Dans chaque branche de l'étoile génératrice, on a un courant efficace I (égal à celui de la ligne) et une f. é. m. entre le point neutre et l'extrémité égale à V .

La puissance fournie par chaque branche est donc égale à VI et, pour les 3 branches,

$$P^w = 3VI \tag{1}$$

Mais on ne mesure pas V , en général, on mesure la tension U entre deux bornes et I se mesure sur le fil de ligne. Remplaçons dans (1),

V en fonction de U , on sait que $U = V\sqrt{3}$. ou $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$.

$$\text{On a donc } P^w = \frac{3U}{\sqrt{3}} I = UI\sqrt{3}.$$

Cas du triangle. — Chaque côté du triangle générateur possède, entre ses extrémités, une tension U (2) et le courant a une intensité efficace I_a . La puissance développée dans une branche est donc UI_a , mais on ne mesure pas I_a l'intensité, à l'intérieur du générateur, mais l'intensité I dans le fil de ligne. Si l'on remplace I_a en fonction de I ,

1. Rappelons que les petites lettres représentent l'intensité à un instant donné et que les grandes lettres sont réservées pour l'intensité efficace.

2. U désigne toujours la tension mesurée au voltmètre, c'est-à-dire celle mesurée entre deux bornes.

$I_a = \frac{I}{\sqrt{3}}$ on obtient pour la puissance dans une branche $\frac{VI}{\sqrt{3}}$ et pour les trois côtés

$$P^w = \frac{3UI}{\sqrt{3}} = UI\sqrt{3}$$

c'est-à-dire la même valeur que dans le montage en étoile.

Lorsque le circuit est inductif, il faut multiplier les résultats précédents par le facteur de puissance

$$P^w = UI\sqrt{3} \cos \varphi$$

φ représentant l'angle de décalage de U sur I.

309. Choix du mode de montage. — Cas des générateurs. — On préfère, le plus souvent, le montage en étoile qui permet de mettre le point neutre au sol ou d'employer, dans certains cas, un fil neutre. Le montage en triangle présente un grave inconvénient : lorsque les trois circuits ne sont pas équilibrés, les trois courants qui correspondent aux branches du triangle n'ont plus une somme nulle et il circule dans l'induit un courant (*courant de circulation*) qui chauffe

les fils et produit une perte souvent très appréciable. Cet inconvénient n'est pas à craindre avec un inductif en étoile.

310. Choix du mode de montage des récepteurs. —

1° Étoile. — Ce mode de montage, sans fil neutre, exige que les trois branches réceptrices soient équilibrées; si elles sont chargées inégalement, il

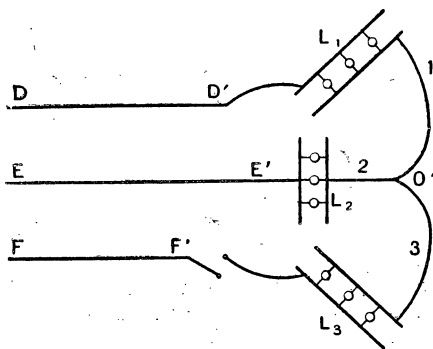


Fig. 256. — Montage des récepteurs en étoile.

en résulte des variations importantes dans le voltage des différents récepteurs.

Pour nous en rendre compte, supposons que les 3 branches alimentent des lampes de 110 volts et supprimons les lampes de l'une des phases (fig. 256), celles de la phase 3 par exemple. Le point O' n'est plus un point neutre, et un courant circule dans les conducteurs DD' $L_1 O' L_2$ $E'E$ le long desquels les lampes L_1 et L_2 se trouvent montées en série. Comme la tension entre deux fils de ligne est $U = V\sqrt{3} = 110\sqrt{3}$, chaque groupe de lampes ne dispose plus que d'un voltage égal à

$$\frac{110\sqrt{3}}{2} = \frac{110 \times 1,73}{2} = 95 \text{ volts}$$

ce qui est insuffisant.

Si l'on supprime deux groupes de récepteurs, le 3^e ne fonctionne plus puisqu'il n'est plus placé dans un circuit fermé.

On réserve donc le montage en étoile à 3 fils pour les moteurs triphasés et l'éclairage public car, dans ces cas, on peut équilibrer les trois circuits. Mais si l'on veut alimenter des lampes en nombre variable, il faut utiliser le montage en triangle ou l'étoile avec fil neutre de retour.

2^o Montage en triangle. — Dans ce montage (fig. 257) les récepteurs sont indépendants les uns des autres; des varia-

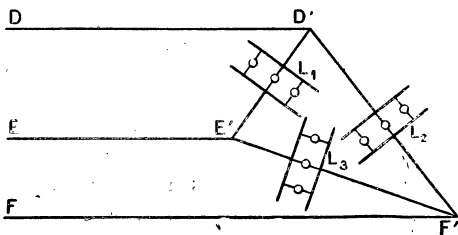


Fig. 257. — Montage des récepteurs en triangle.

tions de charge sur les côtés du triangle produisent des variations très faibles du voltage dans les autres branches.

Le montage le plus usité est donc le *montage mixte* : générateur en étoile et récepteurs en triangle.

3° **Montage en étoile avec fil neutre de retour.** — Ce mode de montage tend de plus en plus à remplacer le montage en triangle; il rend les récepteurs indépendants et, de plus, il permet une économie sur le métal de la ligne car on peut utiliser en ligne une tension plus grande que celle qui alimente les récepteurs (1).

Le calcul montre en effet que les poids de cuivre nécessaires pour construire une ligne qui alimente des récepteurs de même voltage sont dans les rapports suivants :

Système à 2 fils continu ou monophasé.	100
— triphasé à 3 fils.	75
— triphasé à 4 fils (le fil de retour ayant une section moitié de celle des autres).	29,2

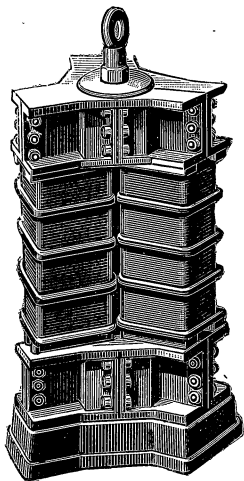


Fig. 258.

Transformateur triphasé.

311. **Transformateurs triphasés.** — Pour faire varier la tension des courants triphasés, on peut employer trois transformateurs simples, un sur chaque ligne. Cette disposition coûteuse et très encombrante est employée lorsqu'on met en jeu des puissances considérables. Pour les puissances moyennes ou faibles on emploie des transformateurs spéciaux formés de trois noyaux de tôles feuilletés. Sur chaque noyau, on enroule les bobines primaire et secondaire d'une même phase. Les bobines sont souvent réunies en triangle; mais pour les tensions très élevées en ligne (cas des transports d'énergie à grande distance) il y a avantage à monter en étoile.

1. On sait qu'en ligne la tension entre deux fils est égale à celle des récepteurs multipliée par $\sqrt{3}$.

Les noyaux sont disposés de deux façons : on peut les mettre parallèles entre eux avec leurs axes dans un même plan ou bien les disposer suivant les arêtes d'un prisme triangulaire, comme le montre la figure 258. Ces transformateurs sont très importants pour le transport de l'énergie à distance.

512. **Courants diphasés.** — On les utilise moins souvent que les courants triphasés. Ils sont formés par deux courants alternatifs de même fréquence et de même intensité, décalés d'un quart de période. Pour obtenir ces courants, on emploie des alternateurs analogues à celui qui a été décrit (305); mais au lieu de mettre trois encoches par pôle à l'induit, on n'en met que deux. L'un des circuits est enroulé dans les encoches 1, 3, 5... et l'autre dans les encoches 2, 4, 6. Il est facile de voir que l'intervalle 1-2 est égal à $1/4$ de l'intervalle compris entre deux pôles de même nom, c'est-à-dire que cet intervalle correspond bien à $1/4$ de période.

Ces courants peuvent être distribués avec quatre fils, ils sont alors indépen-

dants l'un de l'autre ; dans ce cas, la dépense de fil est la même que pour deux courants monophasés. On peut réduire les fils à trois et faire une économie importante sur l'installation en employant un fil de retour unique E (fig. 259), A et B sont les bobines génératrices R_1 et R_2 les deux groupes de récepteurs.

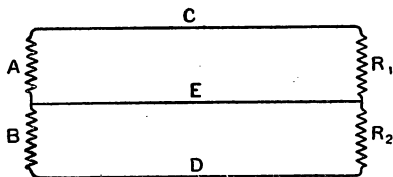


Fig. 259. — Montage à trois fils pour les courants diphasés.

Si V est la diff. de pot. entre chacun des fils C et D et le fil commun E, la différence de tension entre les fils extrêmes s'obtient en prenant la résultante de deux vecteurs égaux à V et perpendiculaires l'un à l'autre (décalage de $1/4$ de période). Il est facile de voir que la tension résultante entre les fils C et D est $U = V\sqrt{2}$ et elle est décalée de 45° par rapport à chacune des deux autres tensions, en avant de l'une et en arrière de l'autre.

L'intensité du courant, dans le fil commun E, s'obtient en prenant

la résultante de deux courants égaux décalés de 90° . Le courant résultant I' est égal au courant I dans les fils C et D multiplié par $\sqrt{2}$: $I' = I\sqrt{2}$.

Ceci suppose les deux circuits également chargés et les circuits non inductifs. Il résulte de là que le conducteur E doit avoir une section plus grande que celle des deux autres. On démontre que la puissance transmise par l'alternateur diphasé est $2VI \cos \varphi$; deux fois la puissance de chaque circuit.

313. Applications des courants polyphasés. —

Les courants triphasés et diphasés se prêtent au transport économique de l'énergie électrique, car, ainsi que nous l'avons indiqué, l'installation des lignes, surtout avec les triphasés, exige moins de cuivre. Ils peuvent servir comme les courants monophasés à l'éclairage, mais leur intérêt capital, est la facilité avec laquelle ils peuvent produire des champs magnétiques tournants qu'on utilise dans des moteurs dont nous verrons plus loin les avantages.

Les courants triphasés sont les plus usités ; dans certains cas de distribution mixte où il y a, à la fois des moteurs et des lampes, on préfère les diphasés avec lesquels le raccordement des lampes et leur réglage est plus facile.

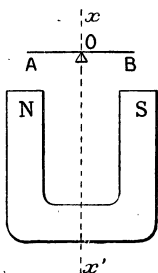


Fig. 260. — Production d'un champ tournant par la rotation d'un aimant.

314. Champs magnétiques tournants. —

Considérons un aimant en fer à cheval NS (fig. 260) ; si nous le faisons tourner autour d'un axe vertical xx' , les lignes de force qu'il engendre tournent dans l'espace autour de xx' , de sorte qu'en un point tel que O la direction du champ tourne comme l'aimant.

Une aiguille aimantée AB, mobile sur un pivot est entraînée et tourne avec la même vitesse que l'aimant. Cette expérience nous donne une image des *moteurs synchronisés à champ tournant* : l'aiguille tourne avec la même vitesse que le champ.

On peut placer en AB un disque métallique quelconque, en

cuiivre par exemple, les variations de flux qui traversent le cuivre produisent dans sa masse des courants induits (courants de Foucault) qui tendent, d'après la loi de Lenz, à s'opposer au mouvement relatif de NS par rapport à AB. Ces courants ont pour conséquence la rotation du disque AB, dans le même sens que l'aimant (1), mais la vitesse de rotation est plus petite que celle du champ : si le disque est très mobile, sa vitesse tend à s'approcher (sans l'atteindre) de la vitesse de l'aimant; si les frottements sont importants, le disque tourne lentement et s'échauffe. Tel est le principe des *moteurs asynchrones* (c'est-à-dire à vitesse différente de celle du champ) à champ tournant. Il est évident qu'il n'y a pas d'intérêt à faire mouvoir le disque AB par l'intermédiaire de la rotation de l'aimant, il serait plus simple de faire tourner mécaniquement ce disque; mais on peut produire autrement des champs tournants et c'est là la propriété capitale des courants polyphasés.

315. *Production de champs tournants par les*

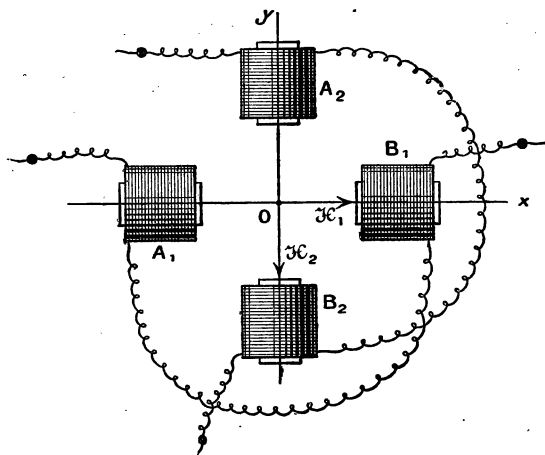


Fig. 261.

Production d'un champ tournant par les courants diphasés.

1. On remarquera que la vitesse relative de l'aimant par rapport au disque se trouve ainsi diminuée, conformément à la loi de Lenz.

courants diphasés. — Considérons deux paires de bobines en croix : $A_1 B_1$ et $A_2 B_2$ (fig. 261) parcourues par des courants alternatifs de même période et de même intensité, le courant dans le groupe $A_2 B_2$ étant en retard de $1/4$ de période sur celui du groupe $A_1 B_1$, le groupe $A_1 B_1$ produit au point O un champ magnétique alternatif dirigé suivant H_1 ; le second groupe produit, au même point, un champ alternatif décalé de 90° sur le précédent et dirigé suivant H_2 . Ces deux champs se composent, au point O, comme des forces, et le calcul, ainsi que l'expérience, montrent que leur résultante est un champ dont la grandeur est constante et égale à la valeur maxima de l'un des champs alternatifs et qui tourne autour du point O en faisant un tour par période.

Expériences. — 1° Si l'on place en O une aiguille aimantée mobile sur un pivot, elle tourne d'une manière continue et fait un tour par période. On peut évidemment remplacer l'aiguille par un aimant ou un électroaimant excité par du courant continu.

2° Si l'on place un disque métallique sur un pivot il tourne avec une vitesse inférieure à celle de l'aiguille aimantée.

Ces deux expériences prouvent qu'il y a en O un champ tournant.

Démonstration théorique. — Si le courant dans les bobines, est sinusoïdal, les champs H_1 et H_2 varieront aussi d'une manière à peu près sinusoïdale (puisque les champs sont proportionnels aux courants qui les produisent). Les variations du champ H_1 pourront se représenter par la projection sur BB' (fig. 262) d'un certain vecteur tournant OM ; les variations de H_2 seront représentées par la projection d'un vecteur OP , en retard de 90° sur OM .

Lorsque le premier vecteur est en OA , le champ H_1 est nul; au même instant l'autre champ est maximum et représenté par OB' , leur résultante est évidemment OB' .

Au bout d'un certain temps, quelconque, OA a tourné d'un angle α et se trouve en OM ; OB' a tourné du même angle α et se trouve en OP . Les projections sont OP_1 et OM_1 . Le champ H_1 a donc pour valeur, à cet instant, la longueur OM_1 , et cette force est dirigée suivant OH_1 . Portons donc $OM_2 = OM_1$ dans la direction OH_1 où elle s'exerce. La force du champ H_2 est égale à OP_1 et s'exerce dans cette

direction OP_2 . Prenons la résultante de OM_2 et de OP_1 . Il est facile de voir que cette résultante est précisément égale à OP . En effet, les triangles rectangles OMM_1 et OPP_1 sont égaux et $OM_2 = OM_1 = PP_1$. La diagonale construite sur OM_2 et OP_1 se confond avec OP . Ce résultat est évidemment indépendant de l'angle α qui est quelconque. Donc :

Le champ résultant des deux champs alternatifs égaux et rectangulaires a une grandeur constante égale à la valeur maxima de l'un de ces champs.

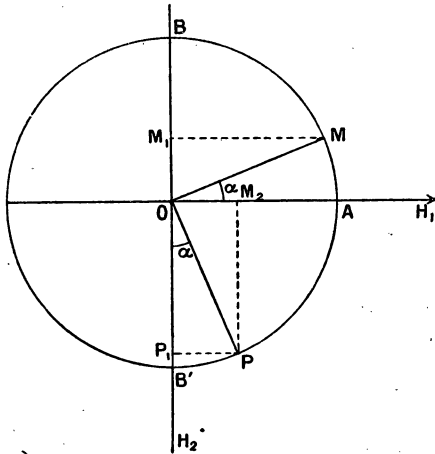


Fig. 262.

De plus, le champ résultant, qui était d'abord dirigé suivant OB' est maintenant dans la direction OP : il a tourné d'un angle α , comme les vecteurs représentatifs des champs alternatifs. **Le champ résultant fait donc un tour par période.**

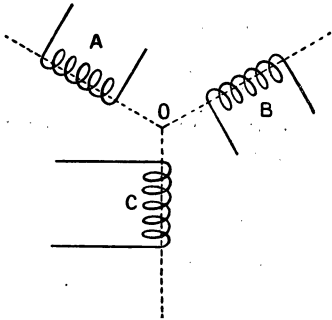


Fig. 263. — Les bobines A, B, C, parcourues par des courants triphasés produisent, en O, un champ tournant.

316. Cas des courants triphasés. — Si nous prenons 3 bobines ABC (fig. 263) parcourues par des courants triphasés; ces bobines ayant leurs axes à 120° , au point O, le champ magnétique résultant sera

un champ tournant faisant un tour pendant la durée d'une période. Pour le prouver expérimentalement, il suffit de mettre en O une aiguille aimantée mobile sur un pivot, elle fait un tour par période. On peut remplacer l'aiguille par un électro, comme plus haut. Un disque métallique tourne aussi, mais avec une vitesse moindre. — Le calcul montre que l'intensité du champ tournant est égale, dans ce cas, aux $\frac{\sqrt{3}}{2}$ de l'intensité maxima de l'un des champs alternatifs.

EXERCICES

1. Un alternateur triphasé est monté en étoile; les récepteurs sont des lampes à arc de 45 volts montées en série de 4, en triangle. Quelle est la tension de chacun des enroulements de l'alternateur (tension simple), la chute de tension en ligne étant évaluée à 6 pour 100?

R. 110 v. environ.

2. Un alternateur triphasé est monté en étoile, les récepteurs sont des lampes à incandescence de 110 v. et 0,5 montées en dérivation et en triangle (fig. 257). Il y a 40 lampes sur chaque branche. Quelle est l'intensité efficace du courant en ligne?

R. 34,6.

3. Calculer la dépense totale d'énergie dans les lampes du problème précédent. Montrer que le résultat n'est pas en désaccord avec la formule

$$P = UI \sqrt{3}, \text{ du n}^\circ 308.$$

La première partie est très facile. Pour résoudre la seconde, il suffit de remarquer que I, dans la formule, représente l'intensité en ligne et non celle dans les récepteurs.

CHAPITRE XXIV

ALTERNOMOTEURS TRANSFORMATIONS ET APPLICATIONS DES COURANTS ALTERNATIFS

317. *Moteurs synchrones et moteurs asynchrones.* — On désigne sous le nom d'*alternomoteurs* les moteurs qui utilisent le courant alternatif.

Parmi ces moteurs, on distingue :

1° **Les moteurs synchrones**, dont la vitesse est rigoureusement constante et indépendante de la *charge*, c'est-à-dire du travail qu'on leur fait produire ; cette vitesse ne dépend que de la fréquence et du nombre des pôles.

2° **Les moteurs asynchrones** (non synchrones) dont la vitesse dépend de la charge.

Les moteurs peuvent être à courant monophasé ou à courants polyphasés ; certains exigent en outre du courant continu pour l'excitation de leurs inducteurs.

318. *Moteur synchrone monophasé.* — Ce moteur n'est autre chose qu'un alternateur monophasé employé comme récepteur. La construction est la même que celle des alternateurs. Dans certains modèles, la partie mobile est constituée par l'induit, dans ce cas, ce dernier tourne dans un champ *magnétique constant* en grandeur et direction,

Mais, le plus souvent, l'induit est fixe et forme stator, il reçoit le courant alternatif de la ligne. L'inducteur, composé d'un certain nombre de pôles, est excité par du courant continu qui provient d'une excitatrice. Il est facile d'expliquer la rotation

de l'inducteur. Considérons un pôle nord N (fig. 264) de l'inducteur, et supposons-le placé au voisinage de l'une des bobines A du stator. Cette bobine étant parcourue par un courant alternatif attire N pendant une demi-période et le repousse pendant la demi-période suivante ; mais à cause de l'inertie du rotor, il

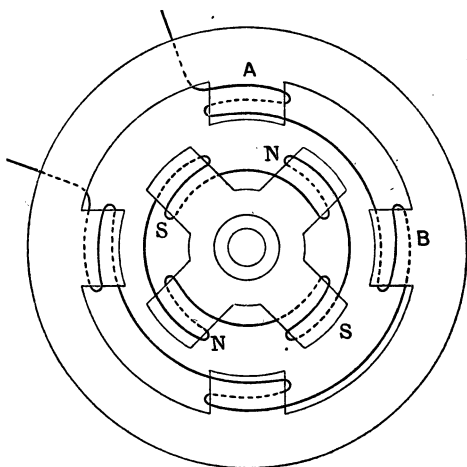


Fig. 264. — Principe du moteur synchrone monophasé.

ne se produit pas de mouvement, le courant ayant changé de sens dans A avant que le pôle N ne se soit mis en mouvement : **le moteur ne démarre donc pas de lui-même.**

Mais, supposons qu'on lui communique un mouvement tel qu'il franchisse l'arc AB pendant une demi-période ; pendant une première demi-période, N sera, par exemple, repoussé par A et attiré par B (on sait que A et B ont des enroulements inverses). A la demi-période suivante, un pôle sud du rotor est venu prendre la place de N et comme le courant a changé de sens dans les bobines de l'induit les actions sont de même sens que précédemment. D'ailleurs, il est aisé de voir que les actions sur tous les pôles sont concordantes. Le rotor tournera donc, de façon que l'intervalle compris entre deux pôles (ou deux

bobines, puisque les bobines de l'induit sont en nombre égal à celui des pôles de l'inducteur) soit parcouru pendant le temps d'une demi-période : le moteur est donc en *synchronisme* avec la fréquence du courant alternatif.

Vitesse. — Supposons que la machine ait $2p$ pôles et que la durée d'une période soit T ; pendant une demi-période $\frac{T}{2}$, l'arc parcouru est égal à la fraction $\frac{1}{2p}$ de la circonférence. Pendant une période T , l'arc parcouru est évidemment égal à $\frac{1}{p}$ de la circonférence et le temps nécessaire pour faire un tour entier est égal à $T \times p$.

Le nombre de tours par seconde n est égal à $\frac{1^s}{Tp}$. Or, la fréquence $N = \frac{1^s}{T}$; on a donc, enfin, pour le nombre de tours par seconde

$$n = \frac{N}{p}$$

Si la machine a 12 pôles, et si la fréquence est 24, le nombre de tours du moteur est $\frac{24}{6} = 4$. On voit que *la vitesse est proportionnelle à la fréquence et en raison inverse du nombre des pôles.*

Démarrage. — Pour mettre le moteur en marche, il faut lui communiquer une vitesse égale à celle qui vient d'être calculée (vitesse de synchronisme). A cet effet, on se sert souvent d'un moteur auxiliaire de puissance plus faible. En particulier, si l'on dispose d'une batterie d'accumulateurs, on peut s'en servir pour faire tourner la machine excitatrice employée comme moteur.

Lorsque la vitesse de synchronisme est atteinte on établit la communication de l'induit avec la ligne. La manœuvre présente une grande analogie avec le couplage de deux alternateurs (287) on se sert d'indicateurs (lampes) de phase pour reconnaître le

synchronisme; lorsque celui-ci est atteint, on supprime le moteur auxiliaire et l'on charge progressivement. Pour l'arrêt, on supprime d'abord le circuit de l'induit puis celui de l'inducteur.

319. Avantages et inconvénients. — 1° Les moteurs synchrones monophasés ne démarrent pas d'eux-mêmes.

2° Leur vitesse est rigoureusement constante, comme on l'a vu plus haut, cette vitesse ne dépend pas de la charge (travail qu'on leur fait produire).

3° Mais si l'on dépasse une certaine charge maxima, le moteur ne peut plus tourner en synchronisme et il s'arrête brusquement : on dit qu'il se *décroche*. Dans ce cas, le courant dans l'induit peut prendre une intensité dangereuse pour les enroulements.

4° Ces moteurs sont identiques aux alternateurs, ils n'ont ni collecteur ni balais et sont très robustes; ils peuvent supporter des tensions élevées.

5° On démontre qu'un *moteur synchrone améliore le facteur de puissance d'une ligne*, surtout si l'on augmente son excitation. Un moteur synchrone *surexcité* peut jouer le rôle d'un condensateur.

Usages. — On se sert de ces moteurs lorsqu'on a besoin d'une vitesse rigoureusement constante : métier à tisser, certaines machines-outils. On les emploie aussi, sur certains réseaux, pour améliorer le facteur de puissance.

320. Moteur synchrone polyphasé. — Les alternateurs polyphasés sont réversibles et jouent le rôle de moteurs synchrones. En effet, supposons l'induit fixe et parcouru par le courant polyphasé; ce courant détermine à l'intérieur de l'induit un champ tournant.

Un aimant ou un électro-aimant excité en courant continu, mobile autour d'un axe passant par le centre de l'induit se mettra à tourner en suivant le champ tournant. Or, l'inducteur est composé d'un certain nombre d'électros entretenus par une excitatrice : l'inducteur tournera donc à l'intérieur de l'induit de façon que ses pôles suivent les pôles tournants de l'induit.

Vitesse. — Si la machine n'a que deux pôles, l'inducteur

fait un tour par période; si elle a $2p$ pôles, elle fait $\frac{1}{p}$ de tour par période et la durée d'un tour est égale à celle de p périodes ou $T \times p$. Le nombre de tours, par seconde, n , est donc :

$$n = \frac{1^s}{Tp} = \frac{N}{p}$$

N est la fréquence égale à $\frac{1}{T}$.

Ces moteurs présentent à peu près les mêmes caractères que les moteurs synchrones monophasés :

1° Les moteurs puissants ne démarrent pas d'eux-mêmes, il faut opérer comme pour les moteurs monophasés. Les moteurs de puissance moyenne ou faible peuvent démarrer d'eux-mêmes à cause des courants de Foucault qui se produisent dans les masses de fer des électros du rotor. On peut, dans ce cas, se passer d'un moteur de démarrage; mais, pour la mise en route, on ne fait pas passer le courant continu dans le rotor; celui-ci démarre comme un moteur asynchrone et lorsqu'il a atteint la vitesse du synchronisme on excite les électros et l'on charge progressivement le moteur;

2° La vitesse est rigoureusement constante, elle a été calculée plus haut;

3° Ces moteurs peuvent se *décrocher*, comme les moteurs monophasés; mais ils supportent une plus forte charge avant le décrochage;

4° Ils sont identiques aux alternateurs polyphasés, leurs dimensions, à puissance égale, sont plus petites que celles des moteurs monophasés, leur prix est moins élevé et, pour cette raison, on les préfère à ces derniers;

5° Ils permettent aussi, par *surexcitation* d'augmenter le facteur de puissance d'une ligne.

Ils ont les mêmes usages que les moteurs synchrones monophasés auxquels on les préfère.

321. Moteurs asynchrones à champ tournant ou moteurs d'induction. — Principe. — Le principe de ces moteurs a été donné aux nos 314 et 315. Tout corps métallique,

mobile autour d'un axe, placé dans un champ tournant, se met en mouvement dans le sens de rotation du champ; ce mouvement est dû aux courants de Foucault qui se produisent dans la masse métallique; ces courants, d'après la loi de Lenz, tendent à diminuer la rotation relative du flux, ce qui se trouve réalisé par la rotation, dans le même sens, de la masse métallique : la *vitesse relative du champ par rapport à l'induit est diminuée*. On appelle *glissement* la différence entre la vitesse du champ et celle du corps induit, on peut l'exprimer en nombre de tours par seconde : si n est le nombre de tours du champ, n' celui de l'induit, on a :

$$\text{glissement} = n - n' \text{ (1).}$$

Le glissement ne peut pas être nul, c'est-à-dire qu'on ne peut pas avoir $n = n'$, car, si l'induit tournait avec la même vitesse que le champ, il n'y aurait plus de variation de flux à travers l'induit et, par suite, plus de courants de Foucault.

Description. — Ces moteurs comprennent deux parties : le *stator ou inducteur* analogue à un *induit* ou stator d'alternateur bi ou triphasé avec enroulement ordinairement en étoile; ce stator peut être mis en relation avec la ligne à l'aide d'un interrupteur à 3 directions pour le triphasé. Le *rotor ou induit* se construit de deux façons.

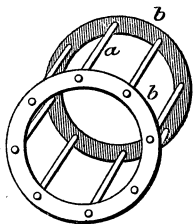


Fig. 265. — Rotor en cage d'écureuil.

a) Rotor en cage d'écureuil. — Il se compose d'une série de barres de cuivre a (fig. 265) disposées suivant les génératrices d'un cylindre; ces barres sont fixées à deux couronnes de cuivre b qui les mettent en court-circuit. Pour augmenter l'intensité du champ magnétique, l'intérieur de la cage est rempli de fer; de sorte que l'appareil est formé

par un empilement de disques de tôles percées de trous (fig. 266), tous les trous sont placés en regard de façon à former des

1. On appelle, aussi, coefficient de glissement le rapport $\frac{n - n'}{n}$.

tubes dans lesquels on introduit les barres de cuivre. Pour un bon fonctionnement, il faut un nombre de barres qui ne soit pas multiple du nombre des pôles; pour 4 pôles, par exemple, on mettra 23 barres.

Ce rotor est de construction simple, robuste, ne présente ni balais, ni collecteur, puisqu'il ne reçoit pas de courant, il tourne sous l'action des courants induits dans les barres de cuivre par la rotation du champ. Il présente l'inconvénient, au moment du démarrage, lorsque la vitesse est faible, d'être traversé par des courants induits très intenses qui réagissent fortement sur l'inducteur et, par suite, sur la ligne. La mise en marche d'un tel moteur amène des troubles dans les réseaux de distribution; aussi, on ne tolère, sur les réseaux (surtout sur ceux qui distribuent en même temps l'éclairage) que des moteurs, de ce genre, à faible puissance.

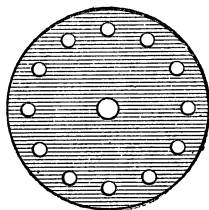


Fig. 266.

b) **Rotor à enroulements.** — Le rotor est toujours un cylindre formé par un empilement de rondelles de tôle, des

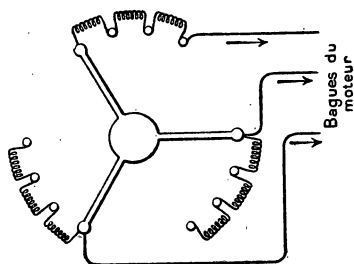


Fig. 267.

Rhéostat pour courants triphasés.

encoches placées sur la circonférence permettent des enroulements en bobines bi ou triphasés analogues à ceux du stator. Ces enroulements sont le siège des courants induits qui produisent le mouvement. Si le rotor est triphasé, on peut réunir les trois enroulements en étoile et les autres extrémités à trois bagues portées par l'axe. Des frot-

teurs permettent de réunir ces enroulements à un rhéostat pour courants triphasés. Ce rhéostat (fig. 267) est composé de

trois séries de résistances réunies chacune aux bagues du *moteur*; un bras triangulaire permet d'introduire, à la fois, avec une seule manette, les résistances sur les trois circuits. Le rhéostat est utilisé pour le démarrage, il introduit une résistance supplémentaire qui diminue l'intensité du courant dans le rotor. Lorsque la vitesse du régime est obtenue, on supprime le rhéostat qui consomme de l'énergie. On utilise aussi le rhéostat pour produire des changements de vitesse.

Avantages et usages. — 1° Le moteur asynchrone à champ tournant démarre à vide ou en charge sans le secours

d'un moteur auxiliaire. Si la charge est grande, il faut utiliser un rhéostat de démarrage;

2° La vitesse est plus faible que celle du synchronisme et diminue avec la charge. Si l'on force la vitesse, de façon à dépasser le synchronisme l'appareil fonctionne comme générateur de sorte qu'il y a *recupération* de l'énergie (cas d'une locomotive qui descend une pente);

3° Le rendement est faible pour les faibles charges, il ne faut donc pas utiliser les moteurs de grande puissance pour un faible travail, on doit proportionner le moteur à l'effort qu'on lui demande.

Ces moteurs sont les plus utilisés et tendent à remplacer dans un grand nombre d'applications les moteurs à courants continus.

La figure 268 représente l'aspect extérieur d'un moteur triphasé.

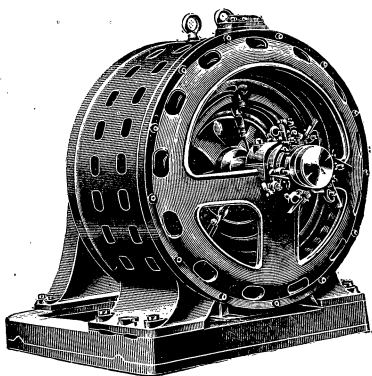


Fig. 268. — Moteur triphasé (Cie Générale d'Électricité de Creil).

322. **Moteur asynchrone monophasé.** — Ces machines ont à peu près la même constitution que les moteurs asynchrones à champ tournant, avec cette différence que le stator est parcouru par un courant alternatif simple. Le rotor est en cage d'écureuil ou à enroulements. Lorsque le rotor est lancé, il devient le siège de courants induits et la rotation se continue sous l'action de ces courants; c'est donc aussi un moteur d'induction. Ces moteurs ont à peu près les mêmes propriétés que les moteurs asynchrones à champ tournant, ils en diffèrent par deux caractères :

1° Leur rendement est moins bon que celui des moteurs polyphasés et, à puissance égale, ils ont des dimensions plus grandes que celles des moteurs à champ tournant.

2° Ils ne démarrent pas d'eux-mêmes : pour les petits moteurs, il suffit de les lancer à la main et ils peuvent tourner dans les deux sens; les moteurs puissants présentent divers artifices de démarrage; par exemple, un enroulement supplémentaire servant à créer au départ un champ tournant. Ils sont employés aux mêmes usages que les moteurs à champ tournant, on les emploie lorsqu'on est obligé de s'alimenter sur une ligne monophasée.

323. **Moteur à champ alternatif à collecteur.** — Nous avons vu que les moteurs à courant continu ont même sens de rotation quel que soit le sens du courant d'alimentation; il résulte de cette propriété, que les moteurs à courant continu tournent si on les alimente avec du courant alternatif monophasé. Le moteur-dérivation n'est pas employé à cause de la trop grande self de son inducteur (qui est à fil fin et à grand nombre de tours) : les courants de l'induit et de l'inducteur seraient ainsi décalés l'un par rapport à l'autre et le facteur de puissance serait faible. Le moteur-série ne présente pas cet inconvénient et c'est à peu près le seul usité. On peut diminuer la perte par courants de Foucault dans la masse des inducteurs en les feuilletant, ce qui augmente leur prix. Ces moteurs présentent les caractères suivants :

1° Ils démarrent d'eux-mêmes et sont susceptibles de produire un couple élevé au départ; de là, leur emploi pour les ascenseurs, monte-charges, locomotives....

2° On peut régler la vitesse à l'aide d'un rhéostat, comme en courant continu. Les bobines des rhéostats sont remplacées par des bobines de self qui consomment moins d'énergie.

3° Leur rendement est plus faible qu'en courant continu, mais ils permettent l'emploi de l'alternatif que l'on transporte plus économiquement. On améliore le rendement en employant des

fréquences faibles, 15 à 20, car on diminue les effets de la self.
4° Ils produisent de vives étincelles au collecteur.

Ces moteurs, convenablement perfectionnés, ont permis de résoudre le problème de la traction sur de longs parcours.

TRANSFORMATIONS DES COURANTS ALTERNATIFS

524. **Commutatrice.** — On appelle *commutatrice* une machine qui permet de transformer le courant alternatif simple ou polyphasé en courant continu et inversement. On l'utilise

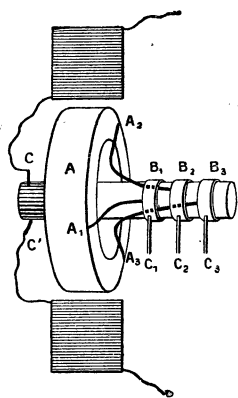


Fig. 269. — Principe de la commutatrice.

presque exclusivement pour la production du courant continu à l'aide de l'alternatif. Voici le principe de cette machine. Considérons une machine (fig. 269) à courant continu bipolaire, pour simplifier, l'axe porte, d'un côté un collecteur et deux balais C et C' et, de l'autre, trois bagues métalliques isolées B₁, B₂, B₃ reliées par des fils conducteurs à trois points A₁, A₂, A₃ pris à 120 sur le fil de l'induit; des balais C₁, C₂, C₃, sont appliqués sur les bagues. Cette machine peut être utilisée de différentes façons :

- a) Si les inducteurs sont reliés à l'induit et que l'on fasse tourner celui-ci, on recueille entre C et C' du courant continu : c'est une dynamo ordinaire ;
- b) Si les inducteurs sont excités par une excitatrice indépendante et qu'on fasse tourner l'induit, on peut recueillir, à volonté, du courant continu entre C et C' ou du courant triphasé aux balais C₁, C₂, C₃.
- c) La machine peut transformer le courant continu en courant triphasé; pour cela, les inducteurs étant excités par une petite machine séparée, on fait arriver par C et C' du courant continu ; l'induit se met à tourner (moteur à courant continu) et l'on recueille en C₁, C₂, C₃ du courant triphasé.

d) Mais l'usage le plus important consiste à faire l'opération inverse : on amène en C_1, C_2, C_3 , du courant triphasé et l'on recueille entre C et C' du continu. Dans ce cas, la machine fonctionne d'un côté comme moteur synchrone triphasé et de l'autre comme générateur continu. Comme on l'a indiqué, à propos des moteurs synchrones, il faut utiliser un moteur auxiliaire pour le démarrage et prendre les précautions indiquées. Comme moteur auxiliaire on peut employer la machine même, si on dispose d'une batterie d'accumulateurs; on démarre en continu du côté du collecteur et lorsqu'on a atteint le synchronisme on établit la communication du côté triphasé en supprimant les accumulateurs de l'autre côté : la machine débite alors du continu.

Si l'on mettait deux bagues au lieu de trois et qu'on les réunisse à deux points diamétralement opposés de l'induit, on transformerait le monophasé en continu ou inversement. Avec quatre bagues réunies aux extrémités des deux diamètres rectangulaires on transformerait le diphasé en continu, ou inversement.

525. *Usages.* — Citons comme exemple l'emploi fréquent à la traction : sur le métropolitain de Paris, on produit, à l'usine de la Rapée, du courant à 5000 volts et de fréquence 25; ce courant arrive dans des sous-stations où un transformateur abaisse la tension à 430^v; le courant transformé fait mouvoir une commutatrice qui donne du continu à 600^v.

On peut se servir de commutatrices pour l'électrolyse lorsque la ligne est alimentée par de l'alternatif.

REMARQUE. — Dans une commutatrice, le voltage est plus élevé du côté continu que du côté triphasé; on démontre que la tension efficace entre deux bornes triphasées est égale à la tension continue, multipliée par $\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 0,61$, si le courant est sinusoïdal.

Dans le cas d'une transformation de diphasé en continu, la tension efficace diphasée est égale à la tension continue divisée par $\sqrt{2}$, c'est-à-dire multipliée par 0,707.

526. *Autres dispositions.* — 1^o *Groupe moteur-*

générateur. — On réunit, par un lien mécanique, les arbres d'un alerno-moteur et d'une dynamo à courant continu : il suffit d'alimenter le premier avec de l'alternatif pour que la dynamo fournisse du courant continu.

Cette disposition exige deux machines et le rendement n'est pas très bon, mais les deux circuits sont indépendants.

2° **Permutatrice à balais tournants.** — Considérons un induit de dynamo avec son collecteur et ses balais, si on le place dans un champ magnétique de direction constante et qu'on fasse tourner l'induit, on a la dynamo ordinaire à courant continu. Au lieu de faire tourner l'induit, laissons-le fixe et faisons tourner le champ inducteur, en sens inverse de celui dans lequel tournait l'induit, les effets d'induction seront les mêmes dans les spires de l'induit, mais si l'on veut recueillir le courant continu, il faudra faire tourner les balais sur le collecteur avec la même vitesse que le champ pour que les balais soient toujours (à l'angle de calage près) sur la ligne neutre. On réalise les conditions précédentes en prenant un stator entretenu par du courant triphasé, à l'intérieur de ce stator, qui est le siège d'un champ tournant, on place un induit de dynamo, avec son collecteur sur lequel on installe deux balais tournant synchroniquement avec le champ. Cette rotation est obtenue avec un petit moteur synchrone. Cette machine est moins encombrante qu'une commutatrice.

3° **Clapet électrolytique de Nodon.** — Lorsqu'on fait l'électrolyse d'un sel en prenant une électrode d'aluminium le courant ne passe que si la lame d'aluminium est cathode — si elle est anode, elle se couvre d'une couche mince d'alumine qui arrête le passage du courant. — Le meilleur électrolyte à employer est une solution de phosphate de sodium ou d'ammonium. Un voltamètre contenant cette dissolution, dans laquelle plongent une électrode de fer et une d'aluminium, joue le rôle de *soupape électrique*, c'est-à-dire que, mis sur un courant alternatif, il ne laisse passer que le courant d'un seul sens (allant du fer à l'aluminium) et l'on peut charger des accumulateurs. — Cette disposition n'utilise donc que la moitié du courant, puisqu'il ne passe que pendant une demi-période. En disposant en dérivation plusieurs soupapes il est facile d'utiliser les deux demi-périodes.

4° **Soupape Cooper Hewitt.** — Nous verrons plus loin que la lampe au mercure Cooper-Hewitt ne fonctionne que lorsque le mercure est cathode; alimentée par du courant alternatif, elle joue le

rôle de soupape électrique et ne laisse passer que le courant qui va du fer au mercure. On pourra utiliser cette lampe d'une manière analogue à celle qui a été indiquée plus haut pour la soupape Nodon.

327. Autres transformations. — Nous avons vu que le courant alternatif peut se transformer facilement en continu ; qu'on peut, à l'aide des transformateurs statiques faire varier à volonté sa tension ; il est susceptible de subir d'autres transformations que nous ne ferons qu'indiquer : on peut changer la phase, c'est-à-dire transformer du diphasé en triphasé ou inversement ; on peut changer la fréquence. Cette dernière transformation est assez importante : si l'on envisage un réseau qui entretient à la fois des moteurs ou des commutatrices qui exigent une fréquence faible, 15 à 25, et qui alimente des lampes qui exigent une fréquence de 40 à 50 pour que la lumière paraisse fixe, il est nécessaire de disposer, sur le circuit des lampes, un appareil qui élève la fréquence. Il existe différentes solutions de ce problème, la plus simple, en théorie, consiste à employer le premier courant à faire tourner un moteur dont l'arbre est réuni mécaniquement à un autre alternateur ayant un nombre convenable de pôles : en faisant varier le nombre de ces pôles on change la fréquence.

TRANSPORT DE L'ÉNERGIE A GRANDES DISTANCES

328. Exemple de calcul d'une ligne de transport. — Nous avons déjà indiqué que le transport de l'énergie, pour être économique, doit se faire sous des tensions aussi élevées que possible. Pour bien préciser cette condition, prenons un exemple.

Soit à transporter à 10 km une puissance de 100 kw en tolérant une perte de 10 pour 100 par effet Joule le long de la ligne. La perte tolérée sera 10 kw ou 10 000 watts et cette quantité est égale à Ri^2 , R résistance de la ligne.

$$10\,000^w = R \times I^2. \quad (1)$$

Supposons que le transport se fasse à basse tension, 100 volts.
La puissance $P^w = Vi$ ou

$$100\,000^w = 100 \times i$$

$$i = 1000^a.$$

De (1) on tire $R = \frac{10\,000}{1000^2} = 0^w,01.$

La ligne de 10 km et dont la longueur est 20 km (aller et retour) n'aura que $\frac{1}{100}$ d'ohm de résistance. Cherchons sa section.

On sait que $R = \rho \frac{l}{S}$

$$\rho \frac{l}{S} = 0,01, \quad S = \frac{\rho l}{0,01}.$$

Or, pour le cuivre $\rho = \frac{1,6}{10^6}$, $l = 20^m = 2 \times 10^6 \text{cm}.$

$$S_{\text{cm}^2} = \frac{1,6 \times 2 \times 10^6}{10^6 \times 0,01} = 320 \text{cm}^2 \text{ ou } 0^m^2,0320.$$

Le volume du cuivre serait

$$0^m^2,0320 \times 20\,000^m = 640^m^3$$

et le poids, la densité du cuivre étant 8,8,

$$8,8 \times 640 = 5632 \text{ tonnes.}$$

Le prix, à raison de 2500 francs la tonne,

$$2500 \times 5632 = 14\,080\,000 \text{ francs.}$$

Il est facile de voir que ce transport, sous 100 volts, est absolument impossible, à cause du prix énorme de la ligne dans lequel on n'a pas compté les supports qui seraient bien difficiles à construire pour un conducteur de pareille section.

Si l'on utilisait un voltage 100 fois plus grand, c'est-à-dire 10 000 volts, on verrait, facilement, que la section, le poids et

le prix seraient divisés par 100². La section serait de 3^m2, le prix 1408 francs et le transport serait possible.

Calcul plus général. — Soit P la puissance à transporter, l la distance, V la tension, p la perte que l'on consent par effet Joule sur la ligne dont la longueur est 2l. On a :

$$\text{Perte en watts} \quad p^w = R \omega i^2.$$

$$\text{Puissance} \quad P^w = V v i^2; \quad \text{d'où,} \quad i = \frac{P}{V}.$$

$$p = \frac{R P^2}{V^2}; \quad \text{d'où,} \quad R = \frac{p V^2}{P^2}.$$

La loi d'Ohm donne

$$R = \frac{2 \rho l}{S} = p \frac{V^2}{P^2},$$

$$S = \frac{2 \rho l P^2}{p V^2} \quad (1).$$

Le volume du métal de la ligne est égal à la section S multipliée par la longueur 2l

$$V = 2 l S = \frac{4 \rho l^2 P^2}{p V^2} \quad (2).$$

Le poids s'obtient en multipliant le volume par le poids spécifique d

$$\text{Poids,} \quad m = \frac{4 \rho l^2 P^2 d}{p V^2} \quad (3).$$

On voit que le poids du métal, pour une même puissance transportée et une même distance, est en raison inverse du carré de la tension V. Il en est de même de la section.

Le calcul montre que le résultat précédent s'applique au courant alternatif simple et que, pour les courants triphasés à 3 fils, il y a économie de 25 pour 100 sur le poids du métal.

329. Conclusion. — Avantage des courants alternatifs. — Emploi des transformateurs. — Il résulte du calcul précédent qu'il est impossible de transporter à grandes distances l'énergie sous de faibles voltages. Or, les courants continus ne peuvent pas être produits sous tension

élevée, il faudra donc employer les courants alternatifs et surtout les courants triphasés.

Pour des distances de quelques kilomètres, on peut utiliser directement la tension des alternateurs, 2000 à 5000 volts. Pour des distances dépassant 10 km, on emploie, en outre, au départ, un transformateur élévateur de tension qui porte celle-ci à 30, 40 ou 50 000 volts. Le courant ainsi transporté économiquement est ramené à 2000 ou 3000 volts par un transformateur-réducteur. Sous cette forme, le courant peut être utilisé par des moteurs ou par des commutatrices. Pour l'éclairage, on ramène à 110 ou 220 volts par un nouveau transformateur. L'utilisation peut d'ailleurs se faire de façon très diverses suivant les besoins des applications, grâce aux appareils de transformation étudiés plus haut.

Il y a quelques années, on n'osait guère dépasser des tensions de 30 à 40 000 volts, on est allé plus loin, surtout en Amérique où l'on a atteint et même dépassé 100 000 volts.

Nous pouvons citer en particulier, en France, le projet d'utilisation des eaux du Rhône à Génissiat (Ain) où l'établissement d'un barrage de 70^m de haut avec un débit moyen de plus de 200^m³ fournirait une puissance de plus de 100 000 kw. Ce projet, qui semble parfaitement réalisable, permettrait de transporter sous 120 000 v. l'énergie jusqu'à Paris, à 500 km.

Les lignes à haute tension exigent des précautions particulières pour l'isolement et pour la sécurité : elles comportent toujours des parafoudres pour limiter la tension (voy. 232).

330. Conclusions relatives aux applications des courants alternatifs. — De ce qui précède, il résulte que les courants alternatifs permettent de réaliser les mêmes applications mécaniques que le courant continu et, comme leur transport peut se faire plus économiquement, grâce à l'élévation de la tension, on tend à les employer de plus en plus. On ne peut les utiliser pour l'électrolyse, à moins de les transformer à l'aide d'une commutatrice. Dans la traction des tramways on utilise encore, le plus souvent, le courant continu à 550 ou 600 volts, mais on le produit souvent comme au Métropolitain de Paris, dans des sous-stations qui conver-

tissent l'alternatif de l'usine génératrice en courant continu.

Les applications à l'éclairage et au chauffage se font, comme nous allons voir, aussi bien avec les deux espèces de courants.

EXERCICES

1. Un moteur synchrone possède 12 pôles, il est actionné par un courant alternatif de fréquence 24; combien fait-il de tours par minute?

2. Un moteur synchrone de 36 pôles fait 80 tours par minute; quelle est la fréquence du courant d'alimentation?

3. Un moteur asynchrone de 30 pôles dont le coefficient de glissement est 0,05 est alimenté par du courant alternatif de fréquence 24; combien fait-il de tours par minute?

R. 91 tours, 2.

4. Un alternomoteur est alimenté sous 1800 v. eff. et le courant est 2,5 a eff.; le facteur de puissance est 0,8. Calculer son rendement, sachant que l'essai au frein de Prony a donné une puissance utile de 4 HP $\frac{1}{4}$.

R. 0,88.

5. On veut transporter une puissance de 10000 HP à 100 km en tolérant une perte de 20 pour 100 sur la ligne. Si la distribution était faite en continu sous 500 v., quels seraient la section, le poids et le prix de la ligne — on emploie du cuivre, $\rho = 1,6 \cdot 10^{-6}$, la densité est 8,8 et le prix 2000 fr. la tonne?

Même question en prenant de l'alternatif, la perte totale tolérée étant toujours 20 pour 100, y compris la perte introduite par les deux transformateurs dont le rendement est 0,95 pour chacun d'eux, le voltage est 30000 v.

CHAPITRE XXV

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

331. Différents modes d'éclairage. — Il existe plusieurs modes d'éclairage par l'électricité. 1° *L'éclairage par lampes à incandescence* dans lequel un filament conducteur est porté à haute température par le passage du courant ;

2° *L'éclairage par arc voltaïque.* Dans ces deux procédés, la température de la source lumineuse est très élevée et elle produit une quantité de chaleur considérable ; la plus grande partie de l'énergie consommée est rayonnée sous forme de chaleur et quelques centièmes seulement de l'énergie dépensée sont rayonnés sous forme lumineuse.

3° *Les tubes de Geissler,* contenant des gaz ou des vapeurs sous faible pression s'illuminent par le passage de la décharge électrique, ils produisent de la lumière et, relativement peu de chaleur : leur rendement lumineux est supérieur à celui des deux premiers types d'éclairage.

LAMPES A INCANDESCENCE

332. Éclairage par incandescence. — *Principe, choix du filament.* — On fait passer le courant dans un fil fin de façon que le dégagement de chaleur le porte au rouge vif et qu'il devienne une source lumineuse. Le filament doit donc avoir une assez grande résistance pour consommer suffisamment d'énergie électrique, il doit être difficilement fusible et présenter une ténacité suffisante malgré son petit diamètre.

Ces conditions empêchent l'emploi des métaux fusibles et des métaux bons conducteurs.

On a d'abord essayé le platine, mais la température à laquelle le rendement lumineux est suffisant doit être au voisinage de 1600 à 1700°; à cette température, les alternatives de chauffage et de refroidissement désagrègent rapidement les filaments de platine.

535. **Lampe ordinaire à filament de charbon.** — Edison a eu l'idée de prendre des fils de charbon. Ce corps ayant une résistivité beaucoup plus grande que celle du platine, il n'est pas nécessaire de prendre des fils aussi fins pour avoir une grande résistance. Mais, le charbon étant combustible, on doit l'enfermer dans une ampoule où l'on fait un vide presque complet à l'aide de pompes à mercure.

Description et fabrication. — Les filaments de charbon sont obtenus en passant à la filière une pâte obtenue en dissolvant de la cellulose (coton) dans une solution concentrée et chaude de chlorure de zinc. Le fil qui sort de la filière est reçu dans une solution d'alcool et d'eau qui le coagule. On le lave avec de l'eau additionnée d'acide chlorhydrique pour le débarrasser des composés de zinc qui l'imprègnent. Le filament, comparable à de la soie artificielle, est chauffé à l'abri de l'air ce qui le transforme en charbon. On le coupe à la longueur voulue et on lui donne souvent la forme d'une boucle (fig. 270).

D'autre part, on a préparé un morceau de tube de cristal dans lequel on a soudé deux petits fils de platine⁽¹⁾ auxquels sont soudés vers l'extérieur de la lampe, des fils de cuivre terminés par des boutons

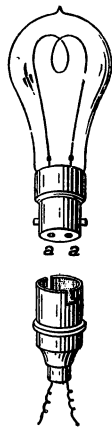


Fig. 270. — Lampe à filament de charbon.

1. Le platine se soude facilement au verre parce que ces deux corps ont même coefficient de dilatation; on peut aussi employer un acier-nickel spécial qui se dilate aussi comme le verre.

a, a et toute cette partie inférieure est noyée dans un culot de plâtre. Vers l'intérieur, on soude aux fils de platine deux petits fils de nickel auxquels on fixe le filament avec un peu de goudron. Le filament est placé dans une atmosphère de gaz d'éclairage et on y fait passer le courant, la chaleur décompose les carbures d'hydrogène et le filament se *nourrit*, s'égalise et se soude au nickel; on l'introduit avec son petit support de cristal dans l'ampoule de verre, on soude, on fait le vide et on ferme au chalumeau. La lampe est placée dans une douille (représentée au-dessous); les boutons *a, a* se mettent en contact avec des tiges de cuivre qui amènent le courant. Un interrupteur ou commutateur permet de faire passer ou de supprimer le courant.

Durée. — Dépense. — Intensité lumineuse. — La température du filament est voisine de 1600° ; il y aurait avantage à pousser cette température plus haut, le rendement lumineux serait considérablement augmenté; les sources lumineuses sont d'autant plus avantageuses que leur température est plus haute (aux températures peu élevées, elles émettent surtout des rayons calorifiques). Il semble que le charbon, qui n'est volatil que dans l'arc électrique, pourrait supporter des températures très supérieures à 1600° ; mais on est arrêté par un autre phénomène : le charbon est désagrégé par le courant et ses particules viennent tapisser l'ampoule de verre qui, peu à peu, perd sa transparence; la lampe diminue d'intensité et devient assez vite inutilisable. On est donc obligé de s'arrêter à la température que nous avons indiquée. Dans les conditions ordinaires de fonctionnement, la lampe à filament de carbone dépense environ $3^{\text{watts}},4$ par bougie et sa durée est de 600 heures. Si on la pousse de façon qu'elle soit mise hors d'usage en 300 heures, elle peut ne dépenser que $2^{\text{v}},7$ par bougie. L'intensité lumineuse est exprimée avec une unité appelée *bougie-décimale* qui vaut $1/20$ de l'étalon international *Violle*. Cet étalon est réalisé par une surface de 1^{cm^2} de platine à la température de fusion. La bougie-décimale est voisine de la bougie vulgaire stéarique, laquelle est, évidemment, assez mal définie⁽¹⁾.

1. On exprime aussi l'intensité lumineuse en carcel (lampe à huile de

On caractérise les lampes en indiquant le voltage pour lequel elles sont construites — ordinairement 110 volts pour les lampes usuelles — et l'on donne aussi leur intensité exprimée en bougies-décimales.

334. Lampes à filament métallique. — Depuis quelques années, un progrès considérable a été réalisé dans l'éclairage par l'emploi d'un filament métallique dans les lampes à incandescence. Les principales lampes que l'on a construites sont :

1° **La lampe à filament d'osmium.** — L'osmium est un métal très rare que l'on trouve en petite quantité dans le minerai de platine.

Les filaments s'obtiennent en portant à l'incandescence, par le courant, un filament de charbon placé dans une atmosphère formée d'hydrogène, de vapeur d'eau et acide *osmique*. Cet acide est réduit et le métal osmium prend la place du charbon, l'osmium fond à une température bien supérieure à 2000° ce qui permet de pousser la lampe et d'obtenir un rendement de 1 bougie pour 1^w,5. L'osmium pouvant s'oxyder, le filament est, comme celui de carbone, enfermé dans une ampoule vide d'air.

2° **Lampe au tantale.** — Métal rare, fondant bien au-dessus de 2000°, très tenace lorsqu'il est pur de sorte que les filaments se préparent par étirage dans une filière très dure, en diamant. Les fils ont un diamètre de

$\frac{1}{20}$ de mm environ et, pour avoir la résistance capable de supporter 110 volts, il faut donner au filament une grande longueur brûlant 42 gr. d'huile à l'heure). La lampe carcel vaut environ 10 bougies.

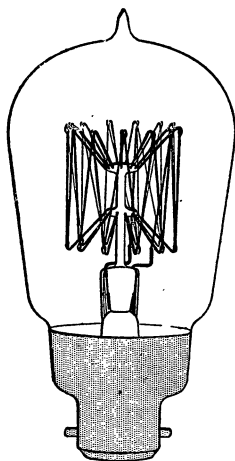


Fig. 271. — Lampe au tantale (figure empruntée au cours d'électricité médicale du D^r Ler-moyez).

gueur, 50 à 60 cm. Ce filament passe dans une série de crochets fixés à un support de verre (fig. 271). La dépense est environ $1^w,5$ par bougie et la durée de la lampe peut atteindre 1000 heures.

3° **Lampe au tungstène.** — **Lampe Osram.** — Le tungstène est un métal dont le minerai appelé wolfram est utilisé pour la préparation de certains aciers (aciers au tungstène). Le filament est obtenu de diverses manières que l'on garde secrètes. On fabrique des lampes dont le filament est du tungstène pur et d'autres dans lesquelles le filament contient à la fois de l'osmium et du tungstène. La plus répandue est la lampe *Osram* construite par Auer. Le filament long de 40 à 50 cm pour une lampe de 110 volts est formé de plusieurs parties en forme d'A soutenues à une potence de verre (fig. 272). Le rendement est sensiblement 1^w par bougie et la durée de la lampe est très grande (1000 heures environ). Son seul défaut est la fragilité du filament qui se brise facilement par le choc.

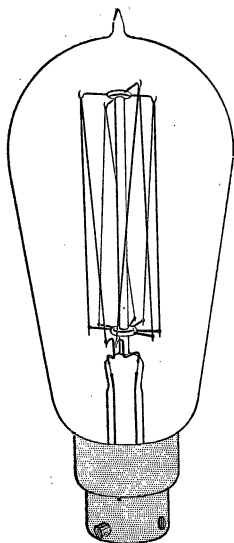


Fig. 272. — Lampe au tungstène (figure empruntée au cours d'électricité médicale du D^r Lermoyez).

Le tantale et le tungstène étant oxydables, il faut enfermer les filaments, comme ceux de carbone, dans des ampoules vides d'air.

Avantages des lampes métalliques. — 1° Pour une même intensité lumineuse, la dépense d'énergie est plus petite qu'avec le charbon; et bien que le prix de ces lampes soit plus élevé⁽¹⁾, il y a économie à les employer à moins que l'énergie électrique

1. Les lampes 16 bougies, 110 volts, au charbon, se vendent au détail 0^{fr},40 à 0^{fr},50; les lampes métalliques coûtent environ 2 fr.

ne soit à très bas prix (comme dans le pays de chutes d'eau).

2° La supériorité du rendement tient à ce que l'on utilise ces lampes à température plus élevée que les lampes au charbon, ce qui est possible parce que le phénomène de désagrégation par le passage du courant (qu'on appelle aussi *électro-vaporisation*) est plus faible avec les métaux qu'avec le charbon.

3° Les métaux ont une résistivité qui croît avec la température, tandis que celle du charbon diminue; cette propriété constitue un avantage : l'éclat de la lampe est moins sensible aux variations de voltage. Si celui-ci augmente, la température monte, mais comme la résistance croît, cette variation tend à diminuer l'influence du voltage.

335. **Montage des lampes.** — Les lampes sont toujours montées en dérivation; on emploie les dispositions indiquées aux n^{os} 216 et suivants. Cette disposition rend les lampes indépendantes; l'allumage ou l'extinction d'une lampe n'a pas sensiblement d'action sur les autres foyers.

Les interrupteurs ou commutateurs employés sont de formes variées, des dispositions faciles à imaginer permettent de commander plusieurs lampes avec un même commutateur ou d'avoir plusieurs commutateurs pour une même lampe. L'installation comprend évidemment des coupe-circuits fusibles, un compteur et un interrupteur général, le tout placé sur un tableau de distribution.

Principe de la lampe Nernst. — Cette lampe peut servir à l'air libre, sa partie essentielle est un filament constitué par des oxydes analogues à ceux qui forment le manchon Auer. Ces oxydes ne conduisent pas bien le courant à froid, mais ils le laissent passer lorsqu'on les a chauffés. La lumière produite par l'incandescence de ce filament est très belle et la consommation est de 2^w par bougie. Pour que la lampe s'allume d'elle-même, on place à côté du filament une spirale de platine dans laquelle le courant passe au début; cette spirale chauffe le filament d'oxydes et, lorsque la lampe commence à briller, une disposition automatique met la spirale de platine hors circuit.

REMARQUE. — *Emploi des courants alternatifs.* — Les lampes à incandescence peuvent être alimentées aussi bien par le

courant alternatif que par le courant continu, nous avons vu (255) les moyens que l'on peut employer pour distinguer ces deux modes d'alimentation : un aimant dévie dans un seul sens le filament entretenu par le continu ; avec le courant alternatif, le filament oscille et paraît élargi à sa partie supérieure. Un objet déplacé rapidement dans le voisinage d'une lampe alternative donne lieu à plusieurs images.

LAMPES A ARC

536. *Arc voltaïque.* — *Arc entre charbons.* — Prenons deux tiges conductrices (fig. 273) réunies aux deux pôles d'un générateur ; ces tiges, d'abord au contact, laissent passer

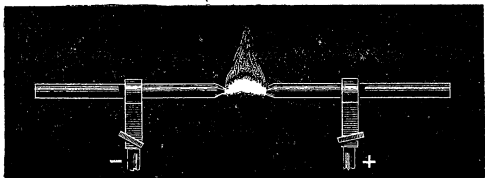


Fig. 273. — Arc voltaïque.

le courant. Écartons-les, une étincelle produite par l'extra-courant de rupture jaillit. Si le générateur est à faible voltage, moins de 50 volts environ, tout cesse après cette étincelle ; mais, si le voltage est suffisant et que l'écartement se fasse progressivement, on obtient entre les extrémités un trait de feu continu, éblouissant, auquel on donne le nom d'*arc voltaïque*. Ce phénomène a été découvert par Davy (1808) qui employait comme tiges des crayons de charbon. L'expérience réussit aussi avec des tiges métalliques ; l'arc présente, dans ce cas, une couleur qui dépend du métal employé, l'arc entre métaux est utilisé quelquefois dans les laboratoires pour certaines recherches ; mais, pour l'éclairage, on n'emploie que l'arc entre tiges de charbon. Lorsque les charbons sont horizontaux, le courant d'air chaud courbe la flamme comme le montre la figure, de là le nom d'*arc*

qu'on lui donne. Si les crayons sont verticaux, la flamme n'est pas courbée en arc.

557. Intensité lumineuse. — Température. — L'éclat de l'arc est si grand qu'on ne peut guère l'observer qu'à travers un verre enfumé ou, mieux, en le projetant sur un écran, à l'aide d'une lentille (fig. 274). On observe, ainsi, que le charbon positif se creuse en cratère et que cette partie est celle qui produit la plus grande partie de la lumière, 85 pour 100 environ. C'est pour cette raison que le charbon positif est placé à la partie supérieure de façon à éclairer le sol. Le charbon négatif se taille en pointe mousse et il est moins lumineux, il produit environ 5 pour 100 de la lumière totale. L'arc proprement dit a une couleur violacée et il est moins brillant que les charbons.

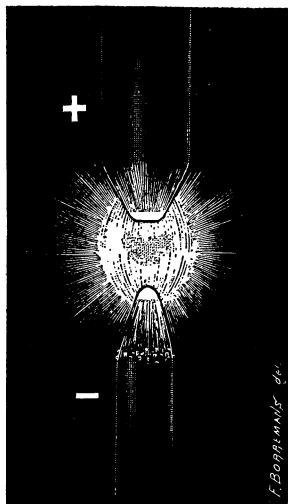


Fig. 274. — Arc voltaïque.

Le charbon positif se creuse parce qu'il y a transport de charbon par le courant, ce charbon existe à l'état de vapeur dans l'arc. La température du cratère est évaluée à 5500° et semble correspondre à la température de sublimation du carbone. Cette température paraît constante; en effet, si on augmente l'intensité du courant, le cratère augmente de surface, mais l'éclat lumineux par cm² reste constant. La température du charbon négatif est plus basse, on l'évalue à 2700°. La température de l'arc est plus élevée que celle du charbon positif; mais, comme l'arc est formé de matière à l'état gazeux, son éclat est relativement faible, nous verrons qu'on peut l'augmenter en mélangeant certains sels (arc à flamme) au charbon.

L'intensité lumineuse totale d'un arc dépend de l'intensité du courant et du voltage. Un arc de 700 bougies est produit par un courant de 10 ampères sous 45 volts, soit une dépense de 450 watts. La dépense par bougie est donc : $\frac{450}{700} = 0^w,64$.

338. Usure des charbons. — Écartement. — Tension. — Les charbons s'usent surtout par combustion ; s'ils ont même diamètre, le charbon positif s'use deux fois plus vite que le négatif ; aussi on donne au positif un diamètre plus grand de façon que l'usure soit à peu près la même : elle est en moyenne de 12 à 13 mm. par heure ; et des charbons de 20 à 25 cm de longueur sont largement suffisants pour assurer l'éclairage public pour les plus longues nuits d'hiver. Les diamètres les plus employés pour un arc sous 40 volts sont 18 mm. et 12 mm.

L'écart des charbons dépend du voltage employé. — Pour un voltage donné, si les charbons sont trop rapprochés, l'arc produit un bruit strident : il *siffle*. De plus, le charbon négatif cache une partie importante de la lumière du cratère. Si l'arc est trop long, il est *instable* et moins lumineux, on dit *qu'il flambe*. Pour obtenir un arc stable et silencieux, il faut maintenir les crayons à une distance convenable que l'on maintient constante à l'aide d'un *régulateur*.

Tension de l'arc. — Il est à peu près impossible d'obtenir un arc fixe avec un voltage inférieur à 30 volts, même en mettant les charbons à très petite distance. Ceci avait conduit à penser que l'arc présente une f. é. m. inverse comme un récepteur électrolytique. Les derniers travaux ne semblent pas confirmer cette supposition. On ne peut cependant pas appliquer simplement la loi d'Ohm, car la résistance de l'arc n'est pas proportionnelle à sa longueur, l'arc changeant d'aspect et de forme quand on fait varier la longueur. Voici deux résultats qui donnent une idée des voltages employés ; pour une intensité de 10 ampères :

voltage	40 ^v	écart	3 ^{mm} ,6	intensité lumineuse	680	bougies
—	45	—	4 ^{mm} ,4	—	700	bougies

Dans le premier cas, le rendement lumineux est de 0^w,58 par

bougie, dans le second de $0^w,64$. On se maintiendra donc au voisinage de 40 volts.

339. Fabrication des charbons. — Charbon à mèche. — **Arc à flamme.** — On emploie des charbons artificiels obtenus en pulvérisant des charbons de cornue bien triés; à la poudre, on ajoute du noir de fumée et du goudron. La pâte obtenue est calcinée en vase clos, puis réduite à nouveau en poudre que l'on mélange à du goudron pour faire une pâte que l'on passe à la filière. Les cylindres obtenus sont chauffés en vase clos, à très haute température, pendant plusieurs semaines. Les crayons très durs s'usent moins vite, mais donnent moins de lumière, ceux qui contiennent plus de noir de fumée sont plus tendres, s'usent plus vite et donnent un meilleur rendement.

Pour que l'arc ne se déplace pas à l'extrémité du charbon positif et reste toujours bien dirigé suivant l'axe, on emploie des *charbons positifs, à mèche* (ou à âme). Ce sont des charbons portant un canal central que l'on a rempli avec du charbon plus tendre (plus riche en noir de fumée) additionné de silicate de potasse. Les charbons négatifs sont toujours homogènes.

Arc à flamme. — On augmente la puissance lumineuse de l'arc en imprégnant les charbons avec des sels minéraux : fluorure de calcium principalement. La lumière est alors colorée en jaune ou en rouge, et toute la lumière est dans l'arc qui ressemble à une flamme colorée (lampes de Brenner, de Blondel, etc.). Il n'y a plus de cratère⁽¹⁾. Ces arcs ne peuvent s'employer qu'à l'extérieur, à cause des fumées qu'ils produisent; ils ont une consommation spécifique de $0^w,2$ à $0^w,3$ par bougie.

340. Régulateurs. — Dans les lampes utilisées pour les appareils de projection, on règle ordinairement l'arc à la main; mais, pour les lampes qui servent à l'éclairage, on emploie des *régulateurs automatiques* qui doivent satisfaire aux conditions suivantes :

1° Les charbons doivent être en contact pour l'allumage;

1. Dans les lampes genre Brenner les charbons ne sont pas placés l'un au-dessous de l'autre, ils sont disposés inclinés comme les branches d'un V dont la pointe est formée par l'arc, le régulateur dans ce cas est très simple.

2° Le mécanisme doit ensuite les écarter à la distance convenable pour que l'arc soit stable et silencieux, et cet écart doit être maintenu malgré l'usure des charbons;

3° Les mouvements doivent être assez lents pour éviter les variations brusques et les oscillations de l'éclat lumineux. Lorsque des oscillations se produisent, on dit que l'arc *pompe*.

Le seul moyen d'obtenir ces réglages consiste à employer, pour produire les mouvements, le courant lui-même, et la pièce essentielle du régulateur est un électro entretenu par le courant. Cet électro peut être excité de différentes façons.

a) **Réglage à courant constant ou régulateur en série.** — Le charbon positif A (fig. 275) et son support sont fixés à une cordelette qui passe sur une poulie; leur poids est,

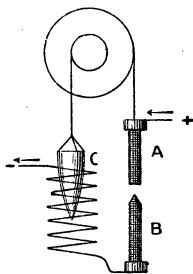


Fig. 275.
Régulateur en série.

en partie, équilibré par un noyau de fer doux de forme conique qui s'engage dans un solénoïde à gros fil mis en série avec l'arc et parcouru par tout le courant. Lorsque le courant ne passe pas, A, à cause de son poids, est appliqué sur B. Lorsqu'on ferme le circuit, l'arc peut s'allumer et l'attraction du solénoïde sur le fer doux soulève le charbon A. La résistance augmente avec la distance entre A et B et l'intensité diminue, les poids sont réglés de façon que l'on ait la longueur convenable de l'arc. On voit que la distance est réglée

pour une intensité constante : si elle vient à diminuer, par suite de l'usure des charbons, l'attraction sur le fer diminue et A descend pour revenir à la même distance.

La forme conique du noyau a pour but de rendre l'attraction du solénoïde constante, pour un même courant, quelle que soit la position du noyau.

Ces régulateurs ne peuvent servir que pour des lampes isolées. S'il y a plusieurs lampes en série, elles sont parcourues par le même courant et ne sont pas indépendantes : si les charbons de l'une des lampes s'usent plus vite, le courant diminue, les

charbons de toutes les lampes se rapprochent et l'écart de celles qui avaient un fonctionnement normal devient trop petit.

b) Régulateur en dérivation ou à tension constante. — On emploie un solénoïde à fil fin et ayant un assez grand nombre de spires ; ce solénoïde est mis en dérivation sur les charbons A et B (fig. 276). Le noyau de fer est à la partie inférieure et son poids est un peu supérieur à celui de A, de sorte qu'en l'absence du courant, les charbons sont écartés. Lançons le courant : le fer doux est soulevé et A vient en contact avec B ; l'arc s'allume. Mais, dès que le courant passe dans les charbons, la chute de tension aux bornes du solénoïde diminue brusquement, le fer C est moins attiré et les charbons s'écartent jusqu'à ce qu'il y ait équilibre. Les poids sont choisis de façon que l'écart corresponde à un arc stable et silencieux. Lorsque l'écart augmente, par l'usure des charbons, la diff. de pot. croît ainsi que l'intensité dans le solénoïde, de sorte que le fer doux est plus attiré, ce qui rapproche les charbons. C'est ici la diff. de pot. aux extrémités du solénoïde qui est maintenue constante de façon que l'intensité du courant dérivé dans cette bobine soit elle-même constante.

Si plusieurs lampes avec régulateur-dérivation sont montées en série, elles ont très peu d'influence les unes sur les autres, car une augmentation exagérée de l'écart, dans une des lampes, fait baisser l'intensité du courant dans cette lampe, mais ne modifie pas la diff. de pot. aux bornes des autres. Ces lampes sont très employées bien qu'elles soient influencées par les variations de tension du réseau.

c) Régulateur différentiel. — On obtient une plus grande fixité avec le régulateur différentiel. Le noyau de fer doux (fig. 277), en forme de cône double, est sollicité dans deux sens opposés par deux solénoïdes dont l'un, à gros fil, placé au-dessous, est en série et l'autre, à fil fin, en dérivation. Sup-

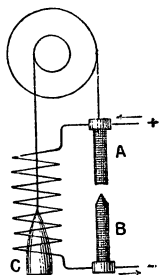


Fig. 276. — Régulateur en dérivation.

posons les charbons au contact et faisons passer le courant, celui-ci est très intense dans le solénoïde en série, très faible dans l'autre, les charbons s'écartent. Il y a ici un double réglage, à la fois sur la tension et sur l'intensité et le régulateur est plus sensible.

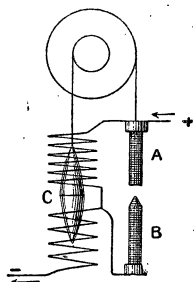


Fig. 277. — Régulateur différentiel.

Ces régulateurs sont un peu plus compliqués que ceux à tension constante; ils peuvent se placer sur des lampes en série qui restent complètement indépendantes. On peut remarquer qu'ils sont réglés pour une résistance constante de l'arc puisque la tension et l'intensité sont constantes à la fois (1).

341. Dispositions mécaniques. — Les appareils que nous venons de décrire ne donnent que le principe des régulateurs, dans la plupart des lampes, les électros n'agissent pas aussi directement sur l'un des charbons. Ils font mouvoir le plus souvent des mécanismes plus ou moins complexes et très variés, de façon à obtenir plus de douceur dans les déplacements et éviter le *pompage*. L'électro peut agir sur un dé clic qui commande un système de roues dentées; ou bien sur un frein qui règle le mouvement d'une poulie, etc.

Dans les systèmes simplifiés que nous avons expliqués, le foyer descend à mesure que les charbons s'usent; il existe des lampes à foyer fixe dans lesquelles les deux charbons se déplacent en sens inverse et de quantités égales. Nous ne cite-

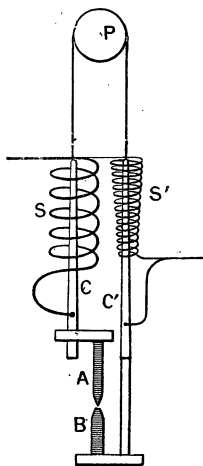


Fig. 278.
Lampe Pilsen.

1. Ceci résulte de ce que $R = \frac{E}{I}$; si E et I sont fixes, il en est de même de R.

rons que la lampe Pilsen à cause de sa simplicité. Les portecharbons sont fixés aux extrémités d'une cordelette qui passe sur une poulie P (fig. 278). Des noyaux de fer doux C et C' s'engagent l'un dans le solénoïde en série, l'autre dans le solénoïde S' en dérivation. Le point lumineux reste à hauteur constante.

342. Montage des arcs. — Résistances de réglage. — Dériveurs. — Les distributions d'énergie électrique se font le plus souvent sous 110 volts; comme les lampes à arc demandent 40 à 45 volts, environ, on les monte

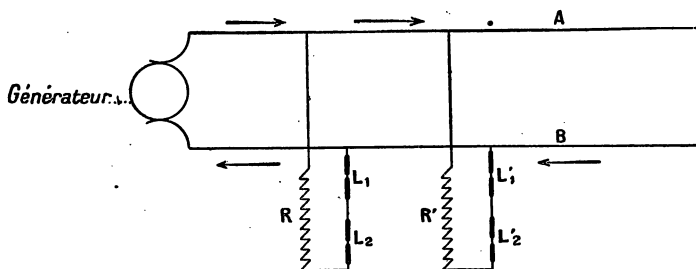


Fig. 279. — Montage des lampes à arc.

par série de deux, en dérivation sur le réseau. Avec une distribution à 220 volts on les monte par série de cinq. Considérons (fig. 279) le cas de 110 volts. Il faut ajouter aux lampes une résistance de réglage R qui a l'inconvénient de consommer, par effet Joule, une partie de l'énergie. Mais cette résistance présente quelques avantages; en particulier, elle est indispensable pour le bon fonctionnement des régulateurs en dérivation ou différentiels que l'on emploie.

Lorsque plusieurs lampes sont en série, il peut arriver, accidentellement, que l'une d'elles s'éteigne (brisure d'un charbon, mauvais fonctionnement du régulateur); dans ce cas, les autres n'ont plus le courant nécessaire pour continuer à brûler et elles s'éteignent aussi. De plus, tout le courant passe par les bobines à fil fin des régulateurs et les détériore. On

évite cet inconvénient à l'aide d'un *dériveur*, c'est une résistance à peu près égale à celle de la lampe qu'un électroaimant introduit automatiquement dans le circuit, pour remplacer l'arc au cas où celui-ci s'éteint.

343. Arc en vase clos. — Pour diminuer l'usure des charbons, on supprime la combustion en faisant jaillir l'arc à l'intérieur d'un globe étanche; dès que l'oxygène de l'air est consommé, l'arc jaillit dans un mélange d'azote, de gaz carbonique et d'oxyde de carbone qui n'entretient pas la combustion. Dans ce cas, la température des charbons est moins élevée et le rendement lumineux moins bon; de plus, pour un bon fonctionnement, on est obligé de donner à l'arc une longueur plus grande et il faut l'alimenter sous 75 à 80 volts ce qui diminue encore le rendement: la consommation spécifique dépasse 2^w, 5 par bougie, mais on économise sur les charbons et sur la main-d'œuvre. Les arcs en vase clos sont très employés aux États-Unis.

344. Cas des courants alternatifs. — Il faut employer des courants dont la fréquence est de 40 à 50 de façon que la lumière paraisse continue à cause de la persistance des impressions lumineuses. Les deux charbons ont le même éclat lumineux, ils s'usent également et il n'y a pas de cratère. Le voltage efficace nécessaire est plus faible que pour le courant continu, une tension d'environ 30 volts suffit — les 2/3 de celle employée en continu. — La puissance lumineuse est donc plus petite, pour une même intensité efficace, elle est encore diminuée parce que les charbons n'atteignent pas une température aussi élevée que le charbon positif de l'arc en continu. Les régulateurs décrits plus haut peuvent servir pour le courant alternatif puisqu'ils sont basés sur les propriétés des électroaimants et nous avons vu que cet appareil attire le fer doux quand il est excité par un courant alternatif; mais il faut, dans ce cas, employer des noyaux de fer feuilleté pour éviter les courants de Foucault. On emploie, d'ailleurs, aussi, d'autres régulateurs dans lesquels la partie essentielle est une sorte de petit moteur à induction.

345. Répartition de la lumière. — La lumière émise par un arc n'a pas la même intensité dans toutes les directions;

l'arc continu éclaire surtout vers le bas (puisque le charbon positif est en haut), ce qui est un avantage. On enferme cependant l'arc dans un globe translucide qui donne, par diffusion, une meilleure répartition de la lumière, mais ce globe entraîne une perte assez importante.

Les arcs alternatifs sont munis d'un réflecteur qui renvoie vers le sol la lumière du charbon inférieur; on les enferme aussi dans un globe translucide.

346. Tubes de Geissler. — Arc au mercure. — Toutes les sources lumineuses usuelles présentent le défaut de produire une grande quantité de chaleur qui atteint souvent 99 pour 100 de l'énergie émise, une très petite portion seulement étant de l'énergie lumineuse.

Il y aurait un grand intérêt économique à réaliser des sources produisant de la *lumière froide* analogue à celle des êtres vivants phosphorescents. Les tubes de Geissler réalisent, dans une certaine mesure, cette condition. On sait que l'on désigne sous ce nom des tubes dans lesquels on a enfermé différents gaz sous des pressions réduites à quelques millimètres de mercure, ces tubes portent deux électrodes pour faire passer le courant. Sous ces faibles pressions, les gaz sont relativement conducteurs et, par le passage de la décharge, ils s'illuminent en produisant une lumière dont la couleur dépend du gaz employé; de plus, la chaleur dégagée est relativement faible. Ces tubes employés dans les laboratoires pour l'étude des spectres lumineux, n'ont pas en général un éclat suffisant pour un usage industriel; en outre, ils exigent un voltage très élevé, plusieurs milliers de volts. On a, cependant, employé dans ces derniers temps de longs tubes à azote (lumière Moore) et des tubes à néon⁽¹⁾ (G. Claude).

Mais l'application la plus importante est l'*arc à vapeur de mercure* que l'on utilise surtout sous la forme que lui a donnée *Cooper Hewitt*. La lampe comprend un long tube d'environ 1 mètre (fig. 280), que l'on maintient légèrement incliné.

1. Le néon est un gaz qui existe en très petite quantité dans l'air et exige un voltage relativement faible 1000 volts pour un tube de 6 m. La lumière est rouge orangé.

Une petite quantité de mercure, placée dans la partie basse, sert de cathode; l'anode est en fer. Pour allumer la lampe, il faut la basculer de façon qu'une légère colonne de mercure réunisse les deux électrodes pour amorcer l'arc; on remet ensuite le tube dans sa position inclinée. La lumière produite est très intense et violette; cette coloration limite beaucoup

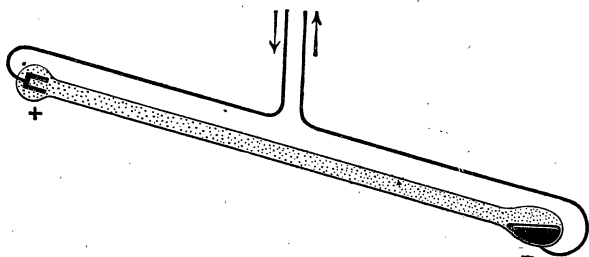


Fig. 280. — Lampe à vapeur de mercure de Cooper Hewitt.

l'emploi de cette source. La dépense est faible. La lampe de 1 m de long fonctionne sous 110 volts avec un courant d'environ 3^a,5. On évalue la consommation à 0^w5 par bougie. La lumière produite est très riche en rayons ultra-violets surtout si le tube est en quartz, corps très transparent pour ces rayons : l'arc au mercure dans le quartz est utilisé pour stériliser les eaux à cause des propriétés microbicides des rayons ultra-violets.

347. **Remarque.** — **Soupape électrique.** — La lampe Cooper Hewitt ne fonctionne que si le mercure est relié au pôle négatif de la source; dans le sens inverse, le courant ne passe pas. Nous avons vu (326) que cette propriété permet de l'utiliser comme soupape électrique pour transformer le courant alternatif en courant continu (1).

1. Voyez les exercices à la fin du chapitre suivant.

CHAPITRE XXVI

CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE FOUR ÉLECTRIQUE — COMPTEURS

548. *Différents procédés.* — Le chauffage électrique peut se faire par trois procédés :

- 1° Chauffage par effet Joule ;
- 2° Chauffage par arc électrique ;
- 3° Chauffage par courants de Foucault ou par induction.

Les deux premiers procédés utilisent le courant continu ou le courant alternatif, le dernier n'est applicable qu'avec le courant alternatif.

1° *Chauffage par effet Joule.* — Le courant, comme dans les lampes à incandescence, passe dans une résistance qui s'échauffe et sert de source calorifique. On emploie, comme résistances :

1° *Des filaments de charbon* que l'on enferme dans des tubes de verre dans lesquels on

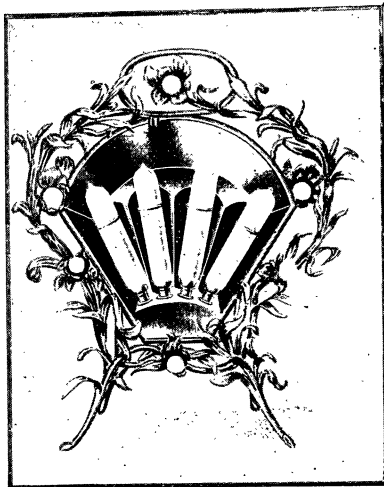


Fig. 281. — Radiateur électrique.

a introduit un gaz qui n'entretient pas la combustion (du gaz d'éclairage par exemple);

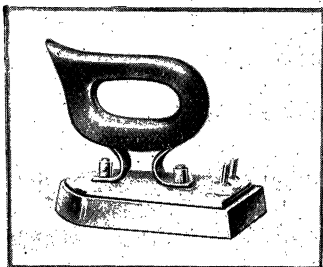


Fig. 282.

Fer à repasser électrique.

2° Des fils ou des rubans métalliques noyés dans des pâtes céramiques pour empêcher l'oxydation et pour isoler;

3° Des mélanges agglomérés formés d'un corps conducteur : charbon, nickel... et d'un corps semi-conducteur devenant conducteur à chaud : silicium, carborundum, etc.

Les principales applications de ces procédés sont :

a) *Le chauffage domestique* qui se fait par radiateurs dont les uns sont formés de foyers lumineux analogues à de fortes lampes à incandescence (fig. 281), les autres sont des radiateurs obscurs. Ce mode de chauffage est évidemment propre, commode et très hygiénique, mais le prix est trop élevé.

b) Citons aussi un grand nombre de petits accessoires domestiques que l'on peut aussi entretenir électriquement, chauffe-pieds, fer à repasser (fig. 282), fer à souder (fig. 283), etc.;

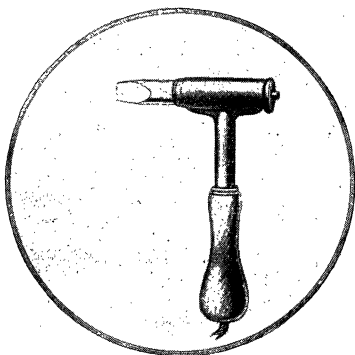


Fig. 283. — Fer à souder électrique.

c) Dans les laboratoires, on emploie de petits fours dans lesquels un tube de porcelaine est chauffé par le passage d'un courant dans une résistance enroulée autour du tube.

Nous verrons plus loin le four électrique à résistance.

2° *Chauffage par arc.* — Nous savons que la température de l'arc est la plus élevée que l'on ait réalisée, 3 500° environ. On utilise l'arc dans le four électrique et on l'emploie aussi dans le *chalumeau électrique* qui sert à la soudure autogène des pièces de fer.

3° *Chauffage par courants de Foucault.* — Ce mode de chauffage peut être employé pour des applications domestiques si l'on utilise le courant alternatif. La pièce essentielle est un électroaimant entretenu par le courant alternatif, les variations de flux produites par cet électro déterminent dans les conducteurs voisins des courants de Foucault. On emploie dans l'industrie métallurgique des *fours à induction*.

349. *Fours électriques.* — Ils présentent, sur les fours industriels chauffés à l'aide d'un combustible, les avantages suivants :

- 1° Réalisation d'une température plus élevée ;
- 2° La source de chaleur, étant à l'intérieur du four, est mieux utilisée ;
- 3° Le réglage de la température est facile ;
- 4° On peut éviter l'action de l'oxygène de l'air sur les matières chauffées.

1° *Four à arc.* — Le premier four utilisé, celui de Moissan,

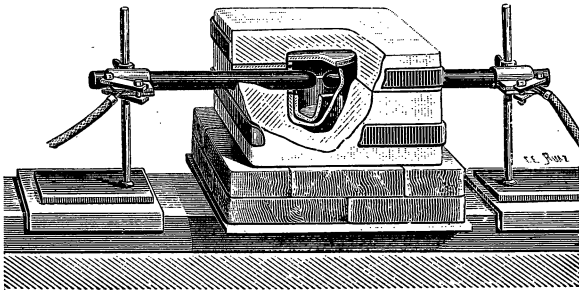


Fig. 284. — Four électrique de laboratoire.

était un four chauffé par l'arc jaillissant entre deux gros char-

bons placés à l'intérieur d'une cavité en chaux recouverte intérieurement de charbon. Cette disposition a été longtemps employée pour la préparation du carbure de calcium. La figure 284 représente un modèle de laboratoire.

Le four à arc est employé dans la préparation du **phosphore** (on chauffe un mélange de phosphate tricalcique, de charbon et de sable : le phosphore se dégage à l'état gazeux). On l'utilise dans la préparation de certains **aciers**. Dans le *four Héroult*, on fait jaillir deux arcs en série (fig. 285) entre les électrodes de graphite et le bain métallique à la surface duquel est la scorie liquide.

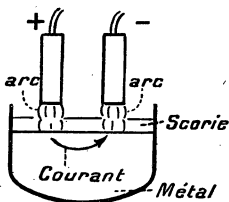


Fig. 285.

Principe du four Héroult.

2° **Four à résistance**. — Dans ce four, on utilise la chaleur de Joule. Prenons comme exemple le four actuel à **carbure de calcium**.

On sait que ce corps s'obtient en chauffant un mélange de chaux et de charbon, il se fait de l'oxyde de carbone qui se dégage ($\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CaC}_2 + \text{CO}$). Le mélange de chaux et de charbon est placé dans le four dont le fond est formé par du graphite (fig. 286), l'électrode plonge dans la

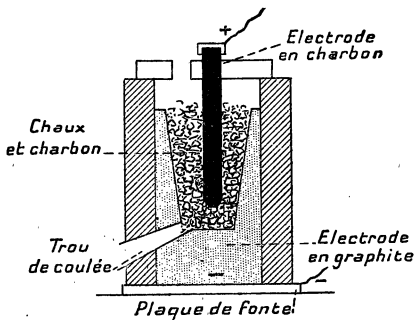


Fig. 286. — Four à résistance pour la préparation du carbure de calcium.

s'échauffe par le passage du courant.

On prépare, de même, le **carborundum** (carbure de silicium, corps très dur, employé pour le polissage), en mettant

dans le four un mélange de charbon, de sable (silice) et de sel marin qui facilite la fusion.

5° *Four à induction.* — Dans ce four, que l'on emploie pour la fusion de l'acier, on évite le contact des électrodes de charbon avec le métal en supprimant les électrodes. Un courant alternatif à haut voltage dont l'intensité est relativement faible

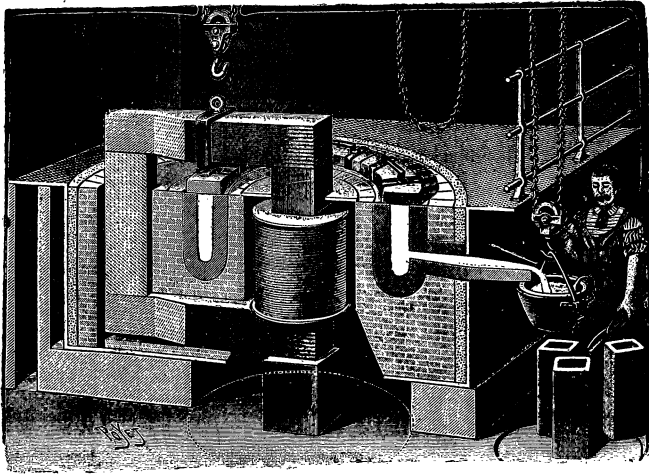


Fig. 287. — Four à induction pour la fusion de l'acier.

circule dans la bobine primaire d'un transformateur (fig. 287), il en résulte des variations considérables du flux magnétique dans la masse rectangulaire de fer du transformateur. Le secondaire n'a qu'un tour, et il est formé par une rigole circulaire dans laquelle est placé le métal à traiter. Le courant alternatif, dans ce secondaire, est extrêmement grand, des milliers d'ampères : il produit la fusion.

550. *Applications.* — Les principales applications du four électrique sont : la préparation du carbure de calcium, du carborundum, du phosphore ; l'affinage ou la préparation de certains métaux ou alliages, en particulier de l'acier.

D'autres modèles de fours à arc sont employés en Norvège pour la préparation de l'acide azotique et de l'azotate de chaux employé comme engrais (1).

COMPTEURS — TARIFICATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

351. Tarification. — On peut vendre l'énergie électrique :

1° *A forfait*, en comptant un prix convenu par lampe ; ce mode de tarification est employé pour l'éclairage des rues. Il est aussi très usité par les petites usines productrices dans les petites villes ou villages.

2° On emploie des *compteurs-horaires*, sortes de petites horloges mises en marche par un électro lorsqu'on utilise le courant chez l'abonné. Le prix à payer est proportionnel au nombre d'heures d'utilisation et le prix de l'heure est fixé d'après l'installation.

3° Dans les grandes villes, le prix est fixé d'après la consommation d'énergie et l'unité est le *kilowatt-heure* ou l'*hectowatt-heure*. Le prix est très variable, moins élevé dans les pays où l'on utilise des forces hydrauliques que dans ceux où l'on emploie les machines à vapeur comme moteurs. De plus, les usines font ordinairement payer plus cher l'énergie employée pour l'éclairage que celle destinée au moteur. En outre, le tarif est moins élevé pour les gros consommateurs. Le prix du kw.-h. peut descendre, dans certaines régions, à 0 fr. 05, mais dans les villes, il oscille ordinairement entre 0 fr. 30 ou 0 fr. 40 pour les moteurs et sensiblement le double pour la lumière.

Nous allons donner le principe de quelques compteurs parmi les plus répandus en France.

352. Compteurs Elihu Thomson. — C'est un des plus répandus, il peut servir pour le continu ou pour l'alternatif. Cet appareil est un moteur sans fer dont le nombre de tours est proportionnel à l'énergie dépensée chez l'abonné.

L'inducteur de ce moteur est formé par une bobine à gros fil AA (fig. 288), parcourue par le courant I qui est consommé,

1. Voyez pour plus de détails le cours de chimie.

cette bobine est donc en série sur le circuit. Dans le champ magnétique produit par cette bobine se meut un induit B, bobiné en tambour. Cet induit est mobile autour d'un axe vertical qui porte, en haut, une vis sans fin et un système de roues analogue à celui que l'on trouve dans tous les appareils compteurs de tours (compteur de la sirène employée en acoustique, par exemple).

Le fil induit est fin et sa résistance est encore augmentée par une bobine non représentée dans le schéma. Cet induit est mis en dérivation sur les deux fils du secteur et le courant i qui passe dans B est proportionnel au

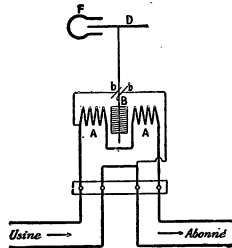


Fig. 288. — Principe du compteur E. Thomson.

voltage (principe analogue à celui des voltmètres).

Le couple moteur qui tend à faire tourner l'induit est proportionnel au champ inducteur, c'est-à-dire à I ; il est proportionnel à i et, par suite, au voltage V du réseau. Il est donc proportionnel au produit VI , c'est-à-dire à la puissance du courant utilisé chez l'abonné. Sous l'action de ce couple, le moteur tourne et sa vitesse irait sans cesse en augmentant si on ne la réduisait pas par un couple antagoniste. Ce dernier est produit par un *freinage magnétique* : l'axe vertical porte un disque de cuivre ou d'aluminium D qui passe entre les branches d'ai-

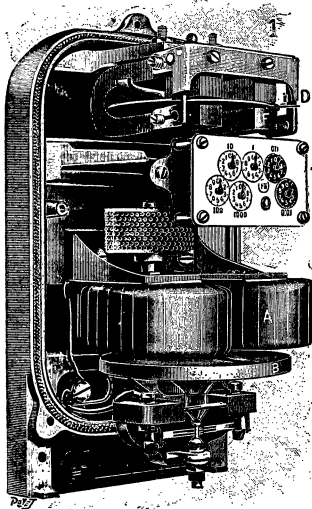


Fig. 289. — Compteur E. Thomson (vue d'ensemble).

mants en fer à cheval F. La rotation détermine dans le disque des courants de Foucault qui, d'après la loi de Lenz, tendent à s'opposer au mouvement. Il y a donc production d'un couple résistant lequel est, d'après la loi de l'induction, proportionnel à la vitesse. Lorsque celle-ci est constante, le couple moteur et le couple résistant se font équilibre.

A vitesse constante, le couple est proportionnel à la vitesse ou, ce qui revient au même, au nombre de tours par seconde. Le nombre de tours dans un temps t^s est donc proportionnel au produit VIt^s , c'est-à-dire à l'énergie dépensée (on sait que $W^j = V^v \times I^a \times t^s$). Il suffira donc d'étalonner le compteur avec un courant de f. é. m. et d'intensité connues. La figure 289 représente une vue d'ensemble.

L'appareil peut servir pour les courants alternatifs; mais il

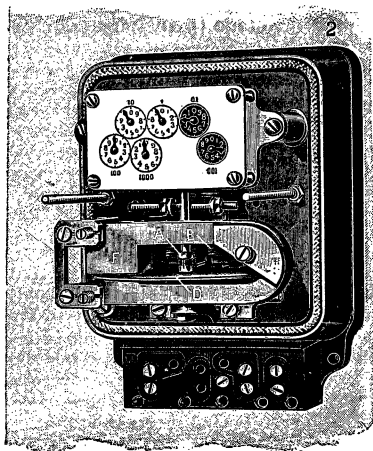


Fig. 290. — Compteur à champ tournant
A. C. T. (vue d'ensemble).

comporte dans ce cas une erreur due à la self de la bobine à fil fin. On s'arrange pour que cette self soit assez faible.

353. Compteurs à champ tournant. — Ils ne peuvent servir que pour les courants alternatifs; un type assez répandu est le compteur A.C.T. (à champ tournant) représenté figure 290. Le schéma (fig. 291) montre le principe: A est une bobine à gros fil parcourue par le courant

alternatif utilisé par l'abonné, elle est donc en série dans le circuit; B est une bobine à fil fin, mise en dérivation sur les conducteurs qui amènent le courant; elle fonctionne comme

la bobine à fil fin du compteur Thomson. Mais de plus, comme la self de cette bobine est choisie très grande, le faible courant qui la traverse est décalé de près de $1/4$ de période. Les champs magnétiques de ces bobines A et B étant alternatifs et décalés de 90° , il en résulte un champ tournant qui entraîne la rotation d'un disque de cuivre ou d'aluminium D. On démontre que le couple moteur qui agit sur le disque est proportionnel au produit VI du voltage et de l'intensité efficaces. Comme dans le compteur Thomson, on fait agir un couple résistant proportionnel à la vitesse en faisant passer le disque D entre les branches d'un aimant. La dépense d'énergie est, comme plus haut, proportionnelle au nombre de tours du moteur; cette dépense se lit sur les cadrans gradués en kw.-h.

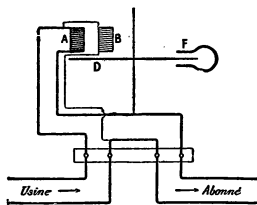


Fig. 291. — Principe du compteur A. C. T.

554. Compteur de quantité d'électricité O'K. — Les compteurs précédents sont des *compteurs d'énergie*. On peut se contenter d'un compteur de quantité d'électricité (coulombmètre) si la tension de distribution est toujours la même, car on sait que

$$W_{\text{joules}} = Q_{\text{coulombs}} \times V_{\text{volts}}$$

L'énergie dépensée, à tension fixe, est proportionnelle à la quantité d'électricité consommée. On pourrait employer un voltmètre et évaluer la quantité d'électricité d'après le poids du produit formé par électrolyse; mais on préfère des compteurs moteurs dont le plus connu est le compteur O'K (abréviation de O'Kéan l'inventeur).

Ce compteur est une sorte de petite magnéto à courant continu; elle est composée d'un aimant fixe A (fig. 292) entre les branches duquel est placé un induit en tambour dont les balais amènent le courant de la ligne ou, plutôt, une fraction de courant, car on dispose un shunt S afin de n'utiliser qu'un courant faible dans le compteur. La vitesse de l'induit qui est placé dans

un champ constant est proportionnelle au courant qui le traverse et, par suite, au courant principal. Le nombre de tours par seconde étant proportionnel à I , le nombre dans un temps t^s est proportionnel au produit $I \times t$, c'est-à-dire à la quantité d'électricité consommée. Les nombres inscrits sur le compteur ne sont pas les quantités d'électricité consommées, mais les quantités d'énergie correspondantes qui leur sont proportionnelles.

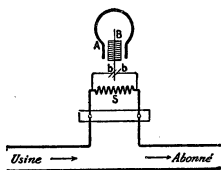


Fig. 292. — Principe du compteur O'K.

Il est évident que cet appareil ne peut servir que pour le courant continu.

EXERCICES

1. Une lampe de 16 bougies à filament de charbon, sous 110 v., consomme $3^w,5$ par bougie. Calculer sa résistance à chaud.

R. 216 ω .

2. Une lampe à filament de carbone, 16 bougies, coûte $0^r,50$ et dure 400 heures ; elle consomme $3^w,5$, par bougie. Une lampe métallique coûte $2^r,50$, consomme $1^w,5$ par bougie et dure 600 heures. Quelle économie réalise-t-on en une année, en employant cette dernière — durée de l'allumage 1200 h., prix du kw.-h. $0^r,70$?

R. $23^r,58$.

3. Une lampe au tantale de 52 bougies consomme $1^w,8$ par bougie, sachant qu'elle est alimentée sous 110 v. Calculer sa résistance à chaud.

R. 210 ω .

4. Le coefficient de température du tantale étant 0,003, quel est à 0^0 la résistance du filament précédent, température de la lampe 1800^0 ?

R. 52 ω , 1.

5. Quelle est la longueur du filament de la lampe au tantale du n° 4, sachant que la résistivité du métal est égale à 10 fois celle du cuivre pour lequel $\rho = 1,6 \cdot 10^{-6}$; diamètre du fil $0^{\text{mm}},06$? Calculer le poids du filament, la densité du tantale étant 16,6. Combien ferait-on de filaments dans 1 kg. de métal?

R. 58 cm. environ,

le filament pèse environ $0^g,027$ — 37 500 lampes environ.

6. La lampe au tungstène 110 v. 16 bougies, consomme 1 w. par bougie ; calculer la section du filament, sa longueur étant 60 cm. : $\rho = 8.10^{-6}$ à 0°, le coefficient de température est 0,004 et la température du filament 2200°. Trouver le poids du filament (densité 18,7) et le nombre de lampes que l'on peut faire avec 1 kg. de métal.

7. Deux arcs sont montés en série sur une ligne à 110 v., la résistance de réglage est 2 ω , 1 et le courant 10 a. Calculer le voltage de chaque arc. Calculer l'énergie pour 100 dépensée dans la résistance de réglage.

8. Faire le tableau du prix de revient de la bougie-heure (éclairage d'intensité, une bougie pendant 1 h.) pour les modes d'éclairage suivants :

1. Bougie stéarique, 2 fr. le kg., consommation 10 g. à l'heure par bougie.
2. Lampe à huile, 1 fr. le kg., consommation 42 g. à l'heure par carcel (10 bougies).
3. Pétrole, 0^r,50 le kg., consommation 39 g. à l'heure par carcel.
4. Bec de gaz papillon, 0^r,20 le m³, consommation 120 l. à l'heure par carcel.
5. Bec Auer, 0^r,20 le m³, consommation 13 l. à l'heure par carcel.
6. Lampe à filament de charbon, consommation 3^w,5 par bougie.
7. Lampe métallique, consommation 1^w,5 par bougie.
8. Arc ordinaire, consommation 1 w. par bougie.
9. Arc à flamme, consommation 0^w,4, par bougie.

On compte l'énergie électrique à 0^r,70 le kw.-h.

9. Un four électrique fonctionne sous une tension efficace de 45 v. et avec une intensité de 7000 a. Calculer sa puissance en kw. Sachant qu'il produit par heure 100 kg. de carbure de calcium, quelle est la dépense d'énergie par kg. de carbure ? Donner le résultat en kw.-h. et en kilogrammètres.

SONNERIES — TÉLÉGRAPHE
TÉLÉPHONE

355. *Sonnerie trembleuse ordinaire.* — Elle se compose d'un petit électro en fer à cheval : devant ses pôles, se trouve une pièce de fer doux L (fig. 293), supportée par une lame élastique qui est fixée en C. La

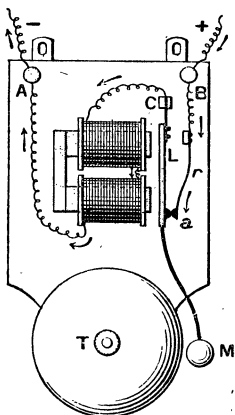


Fig. 293.
Sonnerie trembleuse.

pièce L porte une tige terminée par un petit marteau M qui peut frapper sur le timbre T. A l'état de repos, le fer doux L appuie sur un ressort *r* qui communique avec la borne B. Le courant de la pile arrive en B, passe par L, circule dans les bobines de l'électro, et se rend à l'autre pôle par la borne A. Mais, au moment où l'on établit le courant, l'électro s'aimante, attire la pièce L : celle-ci ne touche plus le ressort *r* et le courant est interrompu. L'aimantation cesse et la lame élastique ramène L contre le ressort *r*, ce qui fait passer à nouveau le courant, et ainsi de suite. On aura donc, ainsi, une série de chocs sur le timbre ; leur nombre est réglé

par l'élasticité de la lame qui porte le fer doux L. On donne souvent à cet appareil le nom de sonnerie trembleuse.

356. *Autres dispositions.* — **Sonnerie continue.**

— On peut disposer la sonnerie de façon qu'elle sonne d'une manière continue pour une seule pression, même de courte durée, sur le bouton. A cet effet, la sonnerie (fig. 294) porte trois bornes : 1 correspond à A de la figure 295 ; 3 correspond à B ; 2 est une borne supplémentaire qui est réunie à l'électro et à la lame. Au repos, il n'y a pas contact entre la lame et le ressort de la borne 3, le courant ne passe pas, bien que l'interrupteur T soit placé de façon à faire communiquer la borne 1 avec la pile. Si on appuie sur le bouton B, le courant passe, le marteau frappe un coup ; si l'on cesse d'appuyer, la lame revient vers la droite, et, à cause de sa vitesse acquise, elle dépasse sa position de repos et vient en contact avec le ressort : le courant se rétablit par la borne 3 ; nouvelle attraction de la lame, etc., la sonnerie fonctionne alors comme celle de la figure 295 lorsque l'on appuie sur le bouton d'appel. Si l'on veut arrêter la sonnerie, il faut agir sur le commutateur T pour supprimer le courant pendant un certain temps. Cette disposition est commode pour une porte d'entrée de maison de campagne.

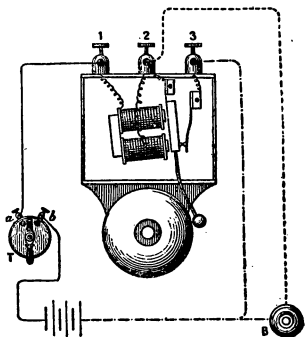


Fig. 294. — Sonnerie continue.

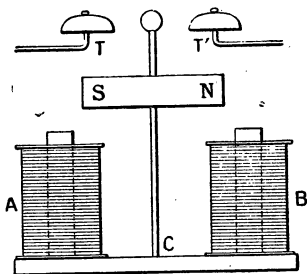


Fig. 295. — Sonnerie polarisée.

Sonnerie à courant alternatif ou sonnerie polarisée. — Elle est employée pour certains appels téléphoniques ; la tige qui porte le marteau (fig. 295) est placée entre les branches d'un électro AB, elle porte un aimant permanent NS.

Si l'on fait passer un courant alternatif de faible fréquence, la tige est alternativement attirée par l'un des pôles de l'électro et par l'autre et le marteau frappe sur les timbres T et T'

357. **Bouton d'appel. — Contacts divers.** — La

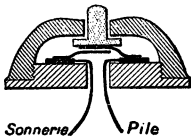


Fig. 296. — Bouton d'appel ordinaire.

figure 296 représente la forme la plus simple du bouton d'appel. Il se compose de deux petites lames métalliques élastiques, reliées : l'une à la pile,

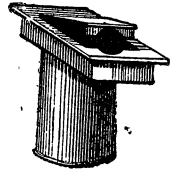


Fig. 297. Contact à pédale pour parquet (salle à manger).

Si l'on appuie sur le bouton en os, on établit le courant. On peut varier la forme, en conservant le même principe, la figure



Fig. 298. Contact en forme de poire.

297 représente un *contact à pédale* que l'on fixe souvent dans les planchers des salles à manger : en appuyant sur la pédale, on fait fonctionner la sonnerie. Le contact en forme de *poire* (fig. 298) peut être suspendu ; les deux fils souples sont tordus ensemble, on presse sur un bouton placé à la partie inférieure.

Citons encore les contacts de porte qui font retentir la sonnerie pendant tout le temps que la porte est ouverte. Le plus simple se compose d'une sorte d'équerre A (fig. 299) reliée à la pile et d'une lame métallique B reliée à la sonnerie. Lorsque la porte est fermée, elle appuie, grâce à un petit butoir, la lame sur son support. Lorsque la porte est ouverte la lame B vient s'appuyer sur A et la sonnerie retentit.

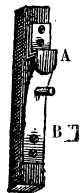


Fig. 299. Contact de porte.

Il est évident qu'on peut varier de bien des façons ces contacts de sonneries, nous nous bornerons aux exemples précédents.

358. *Installation. — Exemples de montage.* — On emploie exclusivement des piles Leclanché ; si le circuit est de faible étendue (petit appartement), un seul élément suffit ; pour de plus grandes longueurs de fil, on prend 2 ou 3 éléments en série. Le fil ordinairement employé est du fil de cuivre de 9/10 de mm, isolé à la gutta ou simplement au coton. On utilise aussi des fils doubles, souples, très commodes.

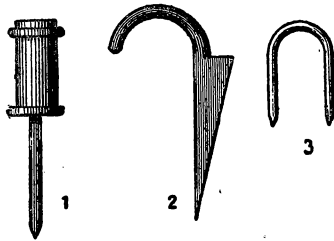


Fig. 300.

Les fils sont tendus le long des murs à la partie supérieure, on les dissimule dans les moulures et on emploie un coton isolant dont la couleur est assortie à celle de la peinture. Le fil est tendu et, de distance en distance on l'enroule sur un petit cylindre en os (fig. 300) fixé par un clou dans le mur. Aux angles, on emploie un clou à crochet émaillé ou des clous en U (fig. 300). Pour la traversée des murs ou des cloisons le fil est placé dans une gaine en caoutchouc.

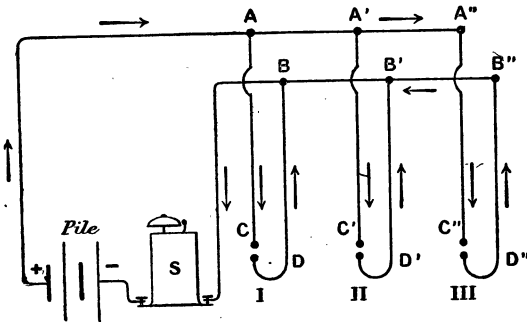


Fig. 301. — Exemple de montage simple.

De nombreuses combinaisons peuvent être réalisées ; nous nous bornerons aux suivantes :

1° La figure 301 représente le montage de plusieurs boutons commandant une seule sonnerie, c'est le type simple d'appartement.

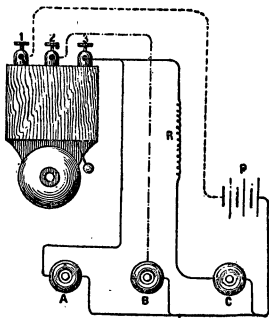


Fig. 302. — Montage à trois directions distinctes.

Les boutons sont mis en dérivation sur les deux fils AA' et BB' qui sont réunis aux pôles de la pile⁽¹⁾. Pour fixer un fil en A, par exemple, on enlève l'isolant sur une longueur de 4 ou 5 cm et on corde l'extrémité du fil A C sur le fil principal. On isole le joint avec une feuille mince de gutta.

2° Avec cette disposition, il est difficile de savoir de quel bouton est parti l'appel. La figure 302 représente une sonnerie à 3 bornes et un montage pour 3 boutons.

Il est facile de voir que :

a) En appuyant sur A on a la sonnerie ordinaire avec un son assez intense ;

b) En appuyant sur B, on utilise la sonnerie à un seul coup pour chaque pression ;

c) La pression sur C donne la sonnerie trembleuse avec un son affaibli, car on a placé en R une résistance supplémentaire. Cette disposition simple dispense d'un tableau.

359. Tableaux indicateurs. —

Lorsque le nombre des boutons qui commandent une même sonnerie est plus grand, il y a lieu d'employer un *tableau* indiquant la salle d'où est parti l'appel. Ce tableau comporte autant d'éléments qu'il y a de boutons d'appel.

Chaque élément du tableau comprend deux électros A et B

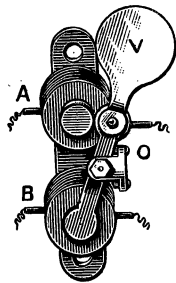


Fig. 303. — Voyant avec ses électros de commande.

1. Pour faciliter la recherche des défauts, il est commode de suivre une règle dans la pose des fils : mettre le positif au-dessus dans les parties horizontales et à gauche dans les parties verticales.

(fig. 303) qui agissent en sens opposé sur une *palette* dont la partie inférieure est constituée par une lame de fer doux et la partie supérieure, le *voyant*, par un disque d'aluminium V. Lorsque le courant passe dans l'électro inférieur, le voyant a la position de la figure qui est aussi la position de repos (sans courant). Si le courant passe dans l'électro supérieur, le voyant s'incline sur la gauche et vient se placer devant un orifice qui porte un numéro ou toute autre indication.

La figure 304 montre le montage dans le cas de 3 boutons. Il est facile de voir que, si l'on appuie sur le bouton 1, le courant part du pôle +, traverse le bouton 1 puis

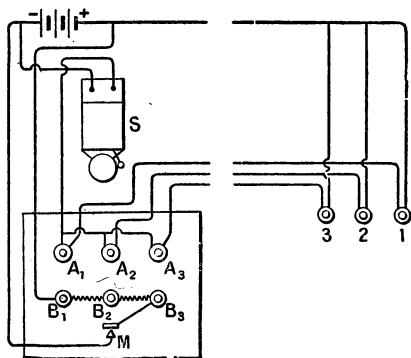


Fig. 304. — Montage d'un tableau avec trois boutons d'appel.

l'électro A_1 , dont il déplace la palette (non représentée); il traverse ensuite la sonnerie S et revient au pôle négatif. Lorsqu'on appuie sur le bouton M du tableau, le courant passe dans les trois électros inférieurs et tous les voyants sont ramenés, à la fois, à la position d'indication nulle.

REMARQUE. — Lorsque la longueur du fil est très grande, il y a avantage à employer un relais (363).

TÉLÉGRAPHE (*) — SIGNAUX DIVERS

360. — *Principe du télégraphe électrique.* — Le courant que l'on fait circuler dans un électro, permet de pro-

1. L'étude de cette question est un peu étrangère à ce qu'on étudie

duire, à distance, des mouvements qui servent à la transmission de la pensée.

Supposons qu'il s'agisse de mettre en communication deux stations A et B (fig. 305). En A, on installe une pile P dont le pôle positif est relié à un appareil M qui permet de faire passer ou d'interrompre le courant (*manipulateur* ou *transmetteur*) dans le fil de ligne qui va à la station B. Le pôle négatif est relié au sol. Le courant qui vient du fil de ligne passe dans l'électro

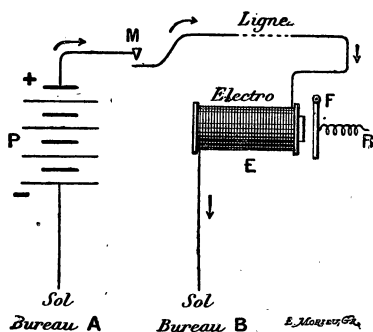


Fig. 305. — Principe du télégraphe.

retour en utilisant la terre, comme le montre la figure. Il y a, à cette disposition, un double avantage : une réduction de la dépense pour l'installation de la ligne et, de plus, la résistance du circuit est réduite de moitié, car la résistance de la terre est nulle, si les communications sont bien faites. Tout se passe comme si la terre jouait le rôle de fil de retour.

361. Parties essentielles d'une installation télégraphique. — Une installation télégraphique comprend :

1° Un générateur d'électricité ; on utilise, le plus souvent, les piles Leclanché dans les petits bureaux ; les piles Daniell ou

ordinairement dans un cours d'électricité industrielle : pour nous conformer aux programmes, nous donnerons le principe des appareils, et nous laisserons de côté la télégraphie sans fil (voir pour plus de détails notre cours de physique).

Callaud dans les bureaux plus importants. On tend, d'ailleurs, à remplacer les piles par des accumulateurs ;

2° Le transmetteur qui permet de faire passer, à volonté, le courant dans la ligne ;

3° Le récepteur, qui reçoit le courant et enregistre les dépêches à la station d'arrivée ;

4° *La ligne.* — Les lignes aériennes sont constituées par un fil de fer galvanisé (recouvert de zinc) de 4 millimètres de diamètre : sa résistance est de 10 ohms par kilomètre. Le fil est soutenu, de distance en distance, par des *isolateurs* en porcelaine (fig. 306), portés par des poteaux en bois.

Dans les grandes villes les câbles sont placés dans les égouts ; ils sont isolés avec du papier et logés dans des tubes de plomb.

Pour les lignes sous-marines, on utilise des câbles formés de plusieurs fils de cuivre isolés et protégés par une armature résistante.

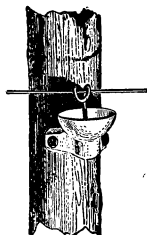


Fig. 306.

362. *Télégraphe Morse.* — Nous ne décrivons que l'appareil Morse à cause de sa simplicité. Dans ce système, on emploie pour représenter les lettres de l'alphabet des combinaisons de points et de traits qui sont imprimés, par le récepteur,

sur une bande de papier que déroule un mécanisme d'horlogerie.

Manipulateur. — Le manipulateur est formé d'un levier métallique mobile autour de l'axe S (fig. 307) qui communique constamment avec la ligne. Lorsqu'on ap-

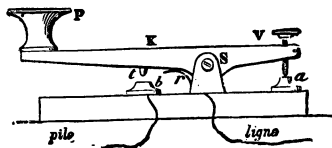


Fig. 307. — Manipulateur.

puic sur la poignée isolante P, on établit un contact entre les points *t* et *b* et le courant passe dans la ligne ; si on retire la main, le ressort *r* ramène le levier à la position représentée dans la figure. Si l'on appuie un temps très court, on obtient, au récepteur, un *point* ; une pression plus longue donne un *trait*.

Récepteur. — Il comprend un électro relié, d'une part, à la ligne et, d'autre part, au sol. Un levier AB (fig. 308), mobile

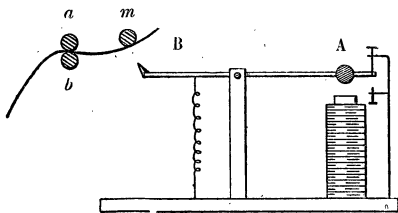


Fig. 308. — Principe du récepteur Morse.

autour d'un point, porte une petite masse de fer doux A qui est attirée par l'électro quand le courant passe. Un ressort antagoniste sert à vaincre le magnétisme rémanent. L'extrémité B appuie, lors du passage du courant, une bande de papier contre une petite roue *m* imbibée d'encre; on obtient un *point* ou un *trait*, suivant la durée de l'attraction. La bande de papier est mise en mouvement à l'aide de deux roues *a*, *b*, qui tournent en sens inverse à l'aide d'un mécanisme d'horlogerie.

Les barreaux comprennent, en outre, différents appareils accessoires : sonnerie d'appel, parafoudre, etc. Il existe des appareils multiples permettant d'envoyer plusieurs dépêches sur le même fil (appareil Baudot par exemple).

363. **Relais.** — Lorsque la distance du bureau récepteur est très grande, le courant de la ligne n'est pas assez intense pour mettre en marche un récepteur. On utilise le faible courant pour manœuvrer un appareil appelé

relais qui fonctionne avec une petite intensité et qui établit, dans le récepteur, le courant plus intense d'une pile locale.

Le courant de ligne arrive dans l'électro E (fig. 309) qui communique aussi avec le sol. Ce courant est suffisant pour attirer un levier léger mobile autour du point O; ce levier éta-

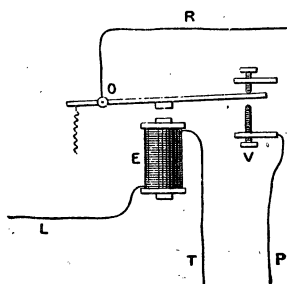


Fig. 309. — Relais.

blit la communication entre le fil P qui va à la pile locale et le fil R qui va au récepteur.

Les relais sont d'ailleurs employés dans un grand nombre d'applications autres que les télégraphes : sonneries, téléphones....

364. Signaux de chemins de fer. — L'électroaimant est la base de tous les signaux employés dans les chemins de fer. On se sert également d'électros à avalement pour la manœuvre à distance des aiguilles.

Une des applications les plus heureuses est le *block-system* qui utilise le passage même du train sur une ligne à double voie, pour le protéger du train qui le suit ou du train qui le précède. A cet effet, la ligne est partagée en un certain nombre de sections et chacune d'elles ne doit contenir qu'un train. Des signaux (rouge pour la fermeture, blanc pour la voie libre) sont placés à l'entrée et à la sortie de chaque section. Le passage des roues établit un contact qui fait fonctionner un relais et celui-ci établit un courant qui déplace les signaux. Le train se protège ainsi lui-même lorsqu'il entre dans une section.

365. Autres applications des électros. — Parmi les applications secondaires des électros nous citerons encore :

1° *Embrayage magnétique.* — Supposons, montés sur un même axe, une poulie folle et un plateau claveté sur l'axe. Si l'on a ménagé une rigole circulaire dans la masse de la poulie pour y loger des fils que l'on peut faire parcourir par un courant, on transforme celle-ci en un aimant qui adhère au plateau claveté, ce qui produit, à volonté, la rotation de l'axe ;

2° *Fixation des outils de perçage* sur les pièces métalliques à percer ;

3° Les freins peuvent être actionnés par des électros ;

4° On peut se servir d'électros pour trier les minerais de fer, etc.

TÉLÉPHONES ET MICROPHONES

366. Téléphone de Bell. — Le téléphone permet, grâce aux courants d'induction, la transmission de la parole à distance ; son invention est due à *Graham Bell* (1876). Le système primitif comprend deux appareils identiques : le *téléphone de Bell* peut servir à la fois de récepteur et de trans-

metteur ⁽¹⁾. L'appareil est composé d'un barreau aimanté A (fig. 310) dont l'une des extrémités est entourée par une bobine B sur laquelle est enroulé un fil conducteur isolé dont les deux bouts sortent en V et V'. En avant du barreau se

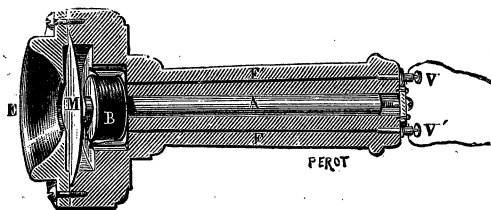


Fig. 310. — Téléphone de Bell.

trouve une plaque mince de fer doux M, placée au fond d'une petite embouchure, dans laquelle on parle. Les fils qui sortent par V et V' sont réunis aux deux bornes d'un appareil identique que la personne qui écoute, à la deuxième station, place à l'oreille.

Les sons que l'on produit, dans l'embouchure du transmetteur, mettent en vibration la plaque M qui, dans ce mouvement, s'approche ou s'éloigne du barreau A et produit des variations de flux magnétique dans la bobine B. Il en résulte des courants induits qui, en arrivant dans la bobine du récepteur, déterminent des variations dans le magnétisme de son barreau et, par suite, des forces attractives variables sur la plaque de fer doux : celle-ci prend des mouvements identiques à ceux de la plaque M du transmetteur ; mais l'amplitude de ces mouvements est plus petite et le son moins intense. L'appareil est évidemment réversible et sert alternativement de récepteur et de transmetteur. Les variations de flux que l'on obtient dans ce téléphone sont assez faibles et la transmission de la parole ne peut se faire qu'à petite distance : dans un même établissement, par exemple.

367. **Microphone de Hughes.** — Le microphone est

1. On dit aussi parleur et écouteur.

destiné à remplacer le téléphone, comme transmetteur. Il doit son nom à sa grande sensibilité : il transmet, en effet, à distance, des sons très faibles. Il est basé sur les variations de résistance qui se produisent aux points de contact des crayons de charbon devant lesquels on produit des sons.

Un petit crayon de charbon A (fig. 311) est placé entre deux supports C et C' de même matière ; il n'est pas serré dans ces supports, et peut osciller légèrement. Le tout est porté par deux petites planchettes MN et PQ. Le charbon A fait partie d'un circuit qui contient une pile et un

téléphone. Un déplacement, même très faible, du charbon A entraîne une variation dans la résistance du circuit et, par suite, dans l'intensité du courant qui circule dans la bobine du téléphone. Ces variations de courant

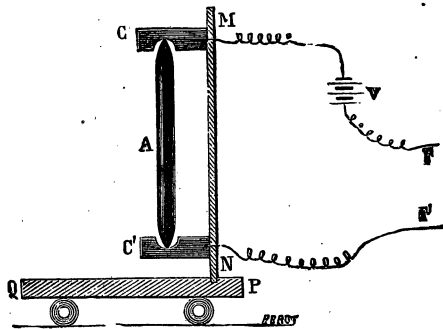


Fig. 311. — Principe du microphone.

produisent des variations de magnétisme dans le barreau aimanté ; il en résulte des déplacements de la plaque de fer doux, qui vibre, en reproduisant tous les petits mouvements qu'on a communiqués au microphone. On entend très bien, à distance, le tic-tac d'une montre placée sur la planchette PQ. Le microphone peut servir de transmetteur téléphonique : si on parle devant cet appareil, la parole est transmise nettement au téléphone. On peut ainsi communiquer à une distance plus grande qu'avec le téléphone de Bell.

568. **Emploi d'une bobine d'induction.** — **Circuit téléphonique.** — Soit E la f. é. m. de la pile, R la résistance du circuit et R' la résistance variable des points de contact des charbons. A un moment donné, l'intensité variable

du courant, qui passe dans la bobine du téléphone récepteur, est :

$$i = \frac{E}{R + R'}$$

Si R est grand, c'est-à-dire si on transmet à grande distance, les variations que subit R' , lorsqu'on parle devant le microphone, sont *très petites par rapport à R* , et les déplacements de la plaque de fer du téléphone sont trop petits pour qu'on

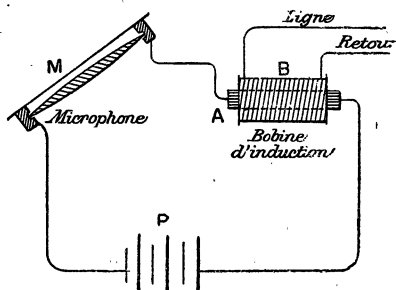


Fig. 312. — Circuit téléphonique.

entende un son : on est encore limité à une petite distance. Edison a augmenté considérablement cette distance, en employant une bobine d'induction. Le courant de la pile circule dans le primaire A d'une bobine d'induction (fig. 312). Les variations du courant, produites par la parole émise devant le microphone M, déterminent des courants induits dans le secondaire B : ce sont ces derniers qui sont transmis à la ligne et au récepteur. Comme la bobine A est à gros fil, la résistance du circuit qui contient le microphone est assez faible ; la bobine B est à fil long et sa résistance est considérable.

Le retour par la terre donne de mauvais résultats, car les courants irréguliers, même très faibles, qui circulent dans le sol (surtout depuis les nombreuses installations de canalisations et de lignes de tramways électriques) agissent sur les téléphones qui sont sensibles à des courants inférieurs au millionième d'ampère. On doit donc faire le retour par un fil. De plus, il faut employer des fils bons conducteurs, cuivre ou mieux bronze phosphoreux. Ces fils sont portés par les mêmes poteaux que les fils télégraphiques et, pour éviter que les courants de

ceux-ci ne produisent par induction des perturbations, on ne laisse pas le fil d'aller, sur toute sa longueur, au-dessus du fil de retour; mais, de distance en distance, on met au-dessus celui qui était au-dessous. Dans les villes, les fils des abonnés sont réunis par groupes dans des tubes de plomb où ils sont isolés avec du papier sec; ces tubes de plomb sont logés dans les égouts.

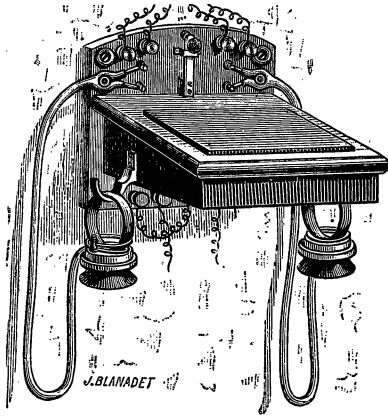


Fig. 313. — Poste téléphonique.

369. **Système Ader.** — Il existe de nombreux modèles de téléphones et de microphones; on emploie, surtout en France, le système *Ader* dont la figure 313 représente l'ensemble.

Le microphone est composé de dix ou douze crayons de charbon placés entre des supports de même matière (fig. 314); ils communiquent avec la pile et sont disposés au-dessous d'une planchette en forme de pupitre, devant lequel on parle⁽¹⁾. Le circuit est établi comme on l'a indiqué plus haut.

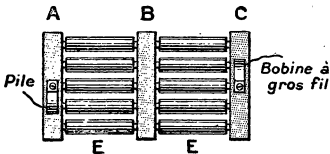


Fig. 314. — Microphone à crayons de charbon (système Ader).

Le microphone est composé de dix ou douze crayons de charbon placés entre des supports de même matière (fig. 314); ils communiquent avec la pile et sont disposés au-dessous d'une planchette en forme de pupitre, devant lequel on parle⁽¹⁾. Le circuit est établi comme on l'a indiqué plus haut.

Le récepteur est un perfectionnement de celui de Bell. L'aimant est un anneau d'acier presque fermé A (fig. 315); aux deux extrémités sont fixées deux équerres en fer doux E, E,

1. On utilise aussi des microphones formés de grains de charbon logés entre deux lames de même substance.

entourées de bobines B, B; au-dessus se trouve la plaque vibrante de fer doux P, et le champ magnétique est rendu plus intense par un anneau de fer doux CC, placé au fond de l'embouchure M.

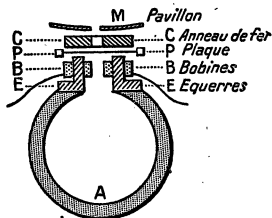


Fig. 315.
Récepteur Ader.

Chaque poste comporte deux récepteurs (un pour chaque oreille) et un transmetteur. Il y a, en outre, une sonnerie qui sert d'avertisseur. Les fils des différents postes aboutissent à des commutateurs (jacks) placés dans un bureau central. Lorsqu'on demande

la communication avec un autre abonné, l'employée réunit les commutateurs correspondants par un fil souple conducteur, et la conversation peut s'engager.

Les derniers progrès ont consisté à simplifier le plus possible le poste de chaque abonné et à tout reporter au bureau central où l'on utilise comme source d'énergie des batteries d'accumulateurs. Il en est résulté, dans les grandes villes, des appareils (*multiples*) d'une très grande complication et d'un prix très élevé. On est arrivé récemment à construire des *multiples automatiques*, dans lesquels les employées sont supprimées. Ces systèmes automatiques permettent à un abonné de communiquer directement avec un autre.

370. *Autres systèmes.* — Il existe de nombreux autres systèmes; les microphones à tiges de charbon sont fréquemment remplacés par des microphones formés de grenaille de graphite placée entre deux plaques de charbon.

La figure 316 représente un appareil combiné comprenant à

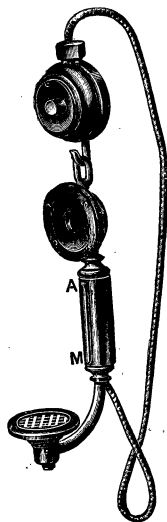


Fig. 316. — Téléphone et microphone combinés.

la fois le microphone et le téléphone. On peut fixer de tels appareils aux fils des sonneries électriques et correspondre dans un même édifice sans canalisation spéciale (1).

371. Appel magnétique. — L'appel se fait par sonnerie entretenue par une pile; on préfère, dans bien des cas, l'appel magnétique qui dispense d'entretenir des piles. Dans ce système, la poste comporte une petite machine magnéto que l'on fait tourner à l'aide d'une manivelle. Quelques tours suffisent pour produire un courant alternatif de voltage assez élevé pour mettre en marche une sonnerie polarisée (356) placée au poste récepteur. Cette magnéto est disposée de façon que, lorsqu'on tourne la manivelle, pour la mettre en marche, l'arbre se déplace parallèlement à son axe et établit les communications qui permettent au courant induit de circuler dans la ligne. Lorsque la manivelle est au repos, les connexions sont telles que le courant venu de l'autre poste passe dans la sonnerie.

372. Exemple simple de montage. — Le montage des postes téléphoniques présente souvent des complications assez grandes; nous considérerons le cas le plus simple de deux postes avec sonneries. Les appareils ont généralement 4 bornes sur lesquelles les constructeurs inscrivent souvent les lettres : L (ligne), S (sonnerie), M (microphone), C (charbon +); mais tous les constructeurs n'emploient pas les mêmes lettres et quelques-uns n'en mettent pas. Nous prendrons comme exemple le cas de deux postes à circuit primaire (sans bobine d'induction) et nous supposerons qu'il y a une pile à chaque poste. La figure 317 représente la position de repos. Supposons qu'on presse sur le bouton *a* du poste 1; le courant parti du pôle + de la pile P suit le chemin suivant : borne C, contacts *a* et *b*, borne L, ligne *l*, borne L', levier *of*, contact *f*; il traverse la sonnerie K' du poste 2 et revient au pôle négatif par la ligne *l'*. On répond du poste 2 en pressant sur *a'* qui fait retentir la sonnerie K du poste 1.

1. On désigne sous le nom de téléphone haut-parleur, un téléphone puissant, auquel on ajoute un cornet acoustique qui amplifie suffisamment le son pour qu'on entende la parole dans toute une pièce.

Lorsque les appels sont entendus, on libère les ressorts a et a' et l'on prend les téléphones T et T' : la conversation peut s'engager, car chaque téléphone est en circuit avec son micro-

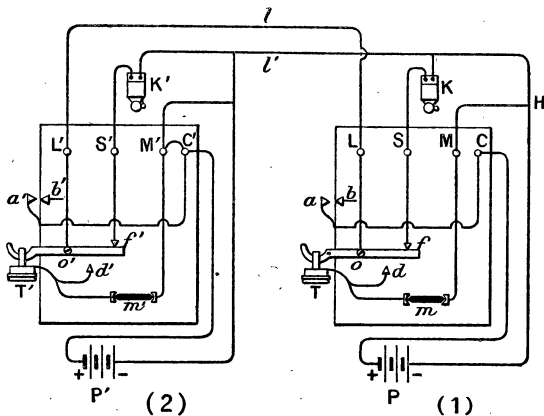


Fig. 317. — Installation d'un double poste.

phone et les deux appareils sont parcourus par le même courant. En effet, le courant parti du pôle + de P' passe par la borne C' par le microphone m' , traverse le téléphone T', la borne L' (le levier est venu en contact avec d'), la ligne l , la borne L, le levier du poste 1, le contact d , le téléphone T, le microphone m , la borne M et arrive au point H relié au pôle - de P, par la ligne l' . — La pile P' est seule utilisée pour les téléphones. — Si donc on parle au poste 2, les variations de résistance du microphone m' ont pour effet de reproduire la parole au poste 1 et inversement.

On peut employer une seule pile pour les deux postes en modifiant un peu le montage.

CHAPITRE XXVIII

APPLICATIONS CHIMIQUES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

375. Principales formes de l'énergie électrique.

— 1° *Étincelle*. — Lorsque deux conducteurs présentent une diff. de pot. suffisante, une étincelle jaillit entre eux. Cette étincelle est utilisée dans les laboratoires pour produire l'inflammation des mélanges gazeux explosifs (*eudiomètre*). Dans l'industrie des mines, on fait plutôt détoner les explosifs par le passage d'un courant dans un fil métallique fin qui provoque l'explosion par élévation de température.

Une série d'étincelles produisent, dans certains mélanges gazeux, des réactions chimiques limitées : production de vapeurs nitreuses avec un mélange d'O et d'H; d'ammoniac dans un mélange d'Az et d'H; production d'ozone, etc. Ces réactions ne sont utilisées que dans les laboratoires.

2° *Effluve*. — *Ozone*. — Lorsque deux conducteurs métalliques C et C' (fig. 318) sont recouverts par des lames isolantes (verre, mica...) P et P' et qu'on établit entre eux une diff. de pot. assez grande, mais insuffisante pour que les lames

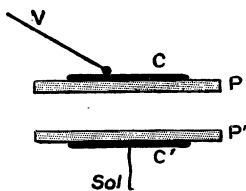


Fig. 318.

Production de l'effluve.

soient percées par une étincelle, il se produit dans l'espace compris entre P et P' une lueur violacée pâle, et cette décharge se fait sans bruit; on donne à cette forme silencieuse de

décharge, le nom d'*effluve*. L'élévation de température est beaucoup plus faible que dans le cas des étincelles. L'effluve produit de nombreuses réactions chimiques : combinaison partielle de l'Az et de l'H avec production d'ammoniac; décomposition plus ou moins complète de nombreux corps. Mais la réaction la plus importante est la transformation partielle de l'oxygène en *ozone*⁽¹⁾. Industriellement, on prépare de l'*air ozonisé*, c'est-à-dire de l'air que l'on fait passer dans des *ozoniseurs*, appareils composés de plaques métalliques recouvertes de lames de verre, ces plaques sont réunies à des secondaires de transformateurs qui établissent des diff. de pot. assez élevées et alternatives. L'air ozonisé (la quantité d'ozone est toujours faible, quelques grammes par m³ d'air) est employé : pour stériliser les eaux potables dans certaines villes ; pour la fabrication de divers produits chimiques : *vanilline* (vanille artificielle) et quelques autres parfums (aubépine, héliotropine, etc.).

3° *Arc électrique*. — L'arc est employé dans les fours électriques ; il agit surtout par sa haute température.

4° *Courant électrique*. — *Électrolyse*. — Le courant, passant dans des électrolytes dissous ou fondus, produit des réactions nombreuses dont les lois générales ont été données au chapitre V. L'énergie électrique est surtout utilisée dans l'industrie sous ces deux dernières formes ; les transformations chimiques sont ordinairement plus directes que par voies chimique ou calorifique, aussi, l'*électrochimie* et l'*électrometallurgie* sont, aujourd'hui, deux sciences très importantes.

Dans ce qui va suivre, nous nous bornerons à rappeler, sommairement, les principales applications dont on trouvera une théorie plus complète dans notre cours de chimie.

374. *Principales applications du four électrique*. — Les différents types de fours ont été indiqués au n° 349. Les principaux produits obtenus au four électrique sont :

1. On sait que l'ozone est un corps qui résulte de la combinaison de l'oxygène avec lui-même : 3 volumes d'O., donnent 2 volumes d'ozone. L'ozone se reconnaît facilement à son odeur ; c'est un oxydant beaucoup plus énergique que l'O. ; et un antiseptique.

1° **Le carbure de calcium** C^2Ca , obtenu en chauffant la chaux et du charbon ($CaO + 3C = CO + CaC^2$). Ce corps sert à préparer l'acétylène (C^2H^2); il suffit de faire agir l'eau ($CaC^2 + 2H^2O = C^2H^2 + CaO, H^2O$). L'acétylène est employé à l'éclairage.

Le carbure de calcium, chauffé au rouge, dans un courant d'azote donne la *cyanamide calcique* ou *chaux azotée*, employée comme engrais azoté.

2° **Le carborundum** est du carbure de silicium CSi , corps très dur, obtenu en chauffant, au four électrique, du sable (silice), du charbon et du sel marin (qui sert de fondant).

Ce corps sert à fabriquer des meules pour le travail des métaux.

3° **Métallurgie du fer et de l'acier.** — Jusqu'ici, la production de la fonte au four électrique n'est pas aussi économique que le procédé des hauts fourneaux; mais la préparation de certains *aciers spéciaux*, au four électrique, est très répandue dans les pays de chutes d'eau.

4° **Préparation du nitrate de chaux.** — Nous rapprocherons de ce qui précède la préparation du *nitrate de chaux de Norvège* employé comme engrais. Dans des fours spéciaux, on fait jaillir des arcs que l'on étale en forme de cercle par de puissants électros placés en dehors du four. Dans cette flamme, on fait passer un courant d'air dont l'O et l'Az se combinent partiellement pour donner de l'oxyde azotique AzO . Ce corps, en dehors du four, se combine à l'oxygène pour donner du peroxyde d'azote AzO^2 qui, en agissant sur de la chaux, forme du nitrate de calcium (il se produit aussi une certaine quantité de *nitrite*),

5° **Phosphore.** — On prépare le phosphore en chauffant le phosphate tricalcique avec du charbon et de l'alumine [ou de la silice (sable)]. Cette préparation est beaucoup plus simple et plus directe que la méthode ancienne.

575. **Principales applications chimiques de l'électrolyse.** — 1° **Aluminium.** — L'aluminium est devenu un métal commun grâce à sa préparation par l'énergie électrique. On l'obtient par l'électrolyse de l'alumine fondue.

Dans une cuve de fonte revêtue intérieurement d'une couche de charbon qui sert de cathode, on introduit un mélange de *cryolithe* (fluorure d'aluminium et de sodium) et d'alumine (préparée en prenant comme matière première la *bauxite*); le courant est amené par un prisme de charbon (fig. 319). Au début, on descend l'anode de façon à produire un arc qui pro-

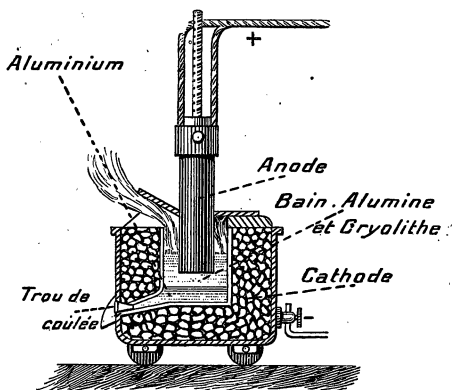


Fig. 319. — Préparation de l'aluminium.

voque la fusion du mélange (vers 800° , à cause de la cryolithe). Lorsque la fusion est opérée, on soulève l'anode, l'arc cesse, et l'on réalise l'électrolyse de l'alumine. Le métal reste fondu au fond de la cuve. On voit que, dans ce cas, le four électrique n'agit pas seulement par son effet calorifique.

2° *Autres métaux*. — On obtient de même : le *sodium* par l'électrolyse de la soude fondue, le *calcium* (aujourd'hui métal presque commun) par l'électrolyse de son chlorure fondu; le *magnésium* par l'électrolyse de son chlorure fondu; etc.

L'affinage du cuivre impur se fait par électrolyse; on prend comme bain une solution de sulfate de cuivre, l'anode est une lame de cuivre impur, la cathode une lame mince de cuivre pur. Le cuivre se rend de l'anode à la cathode

et les impuretés restent dans le bain. Cette méthode fournit du cuivre très pur.

3° *Préparation de l'oxygène et de l'hydrogène.* — On fait l'électrolyse de l'eau additionnée de soude; on opère dans des cuves en fonte avec des électrodes de fer. On obtient aussi de l'hydrogène comme sous-produit de l'électrolyse du chlorure de sodium.

4° *Soude.* — *Chlorures décolorants.* — *Chlorates*⁽¹⁾. — L'électrolyse du chlorure de sodium Na Cl, dissous dans l'eau, donne, comme produits primaires, du chlore et du sodium. Mais ce dernier, au contact de l'eau, produit de la soude et de l'hydrogène ($\text{Na} + \text{H}_2\text{O} + \text{Na OH} + \text{H}$). On obtient donc du chlore, de la soude et de l'hydrogène. Des dispositifs assez variés permettent de recueillir ces corps qui ont tous les trois des applications importantes.

Si, au lieu de séparer avec soin la soude et le chlore (et c'est la principale difficulté de l'industrie de la soude), on facilite la réaction de ces deux corps, en agitant le liquide, on obtient de l'*hypochlorite de sodium* (matière active de l'eau de Javel). Le liquide est employé pour le blanchiment de la pâte à papier.

Enfin, si on laisse la température s'élever vers 70°, le chlore et la soude réagissent pour donner le *chlorate de sodium* ClO_3Na employé pour la fabrication des explosifs (cheddite).

Le chlorure de potassium, dissous dans l'eau, donne des résultats analogues à ceux du chlorure de sodium; en particulier, on prépare le *chlorate de potassium* comme celui de sodium.

On obtient également par l'électrolyse bien d'autres produits chimiques, mais leur importance est beaucoup moins grande que celle des corps précédents (persulfates, perborates, chloroforme, etc)

376. *Galvanoplastie.* — La galvanoplastie a pour objet de modeler des métaux en les déposant sur les moules par le courant électrique. On prend, ordinairement, une dissolution

1. Voyez cours de chimie pour plus de détails sur cette importante question.

concentrée de sulfate de cuivre que l'on additionne d'une petite quantité d'acide sulfurique pour diminuer la résistance. Le courant est amené par une lame de cuivre P (fig. 320), il traverse la dissolution, et le métal se dépose sur le moule N

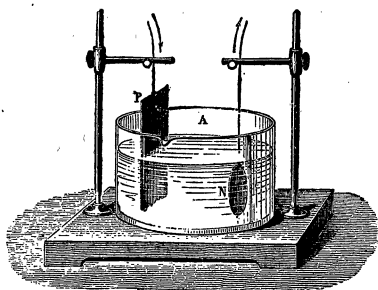


Fig. 320. — Galvanoplastie.

qui a été rendu conducteur, et qui est relié au pôle négatif de la pile. L'emploi d'une anode soluble conserve au bain une composition constante, car il se dépose autant de cuivre sur la cathode qu'il s'en dissout à l'anode. Prenons, comme exemple, la reproduction d'une médaille. On fait un moule en creux, à l'aide de gutta-percha qu'on ramollit dans l'eau tiède. En appliquant cette matière plastique sur la médaille, dont la surface a été préalablement frottée avec un peu d'huile ou de l'eau de savon, on obtient un moule que l'on sépare de la médaille lorsqu'il s'est durci, par refroidissement. Ce moule est rendu conducteur en le frottant avec de la plombagine en poudre.

On peut aussi utiliser pour faire les moules des matières facilement fusibles : cire, stéarine, soufre, alliage de Darcet.

On monte l'appareil comme on l'a vu plus haut, et on fait passer un courant, peu intense (1) au début ; puis on augmente un peu l'intensité pour accélérer le dépôt. Lorsqu'on a obtenu l'épaisseur voulue, on retire la pièce du bain et on démoule ; on lave ensuite à grande eau et on recuit pour se débarrasser de la plombagine qui reste. On donne de la résistance en coulant, dans la partie creuse, du plomb ou de l'étain.

On reproduit de cette manière de nombreux objets d'art.

1. On emploie un courant d'environ 1 ampère par dm^2 de cathode. L'intensité rapportée ainsi à la surface s'appelle la densité de courant.

Une des applications les plus intéressantes est la reproduction, par galvanoplastie, des planches gravées qui servent à l'illustration des livres. Les planches de bois seraient vite usées si on s'en servait pour faire de nombreux tirages : on se sert de ces planches comme moules pour produire, par galvanoplastie, des modèles qui servent à l'impression.

Remarque. — Au lieu de monter l'appareil, comme on l'a dit plus haut, on peut s'arranger pour que la cuve électrolytique serve de pile. Il suffit de disposer le moule dans un vase poreux contenant une dissolution de sulfate de cuivre et de plonger celui-ci dans un vase plus grand, contenant une dissolution d'acide sulfurique dans laquelle plonge une lame de zinc amalgamé qu'on relie au moule. On forme ainsi une pile de Daniell. On désigne souvent cette disposition sous le nom d'*appareil simple*.

377. Dépôts métalliques. — Argenture, dorure, etc. — On protège fréquemment les métaux contre l'oxydation, et on leur donne, en même temps, un aspect plus agréable, en les recouvrant, par électrolyse, d'une couche mince d'un métal précieux, ou moins altérable.

Cuivrage. — On recouvre de cuivre les objets en fonte ou en fer. On commence l'opération dans un bain de cyanure double de potassium et de cuivre, et, dès que le fer est recouvert d'une couche mince de cuivre on transporte l'objet dans un bain de sulfate de cuivre, comme pour la galvanoplastie. Le dépôt serait peu adhérent si on opérait, immédiatement, dans un bain de sulfate de cuivre. On est obligé de cuivrer les objets en fer qu'on se propose de dorer ou d'argenter, parce que le fer décompose les bains que l'on emploie pour la dorure ou l'argenture.

Argenture. — Les objets métalliques que l'on veut recouvrir doivent avoir une surface absolument propre, exempte d'oxyde et de matières grasses. On les dégraisse en les plongeant dans une lessive chaude de potasse, puis on les lave à l'eau chaude. On les plonge, ensuite, dans un bain d'acide sulfurique étendu (*dérochage*), puis dans un bain composé d'acide azotique, d'acide sulfurique et de sel marin (*déca-*

page); on rince à l'eau. Dans certains cas, il faut encore *amalgamer* l'objet, en le plongeant dans une solution à 1 pour 100 d'azotate de mercure. La surface se recouvre d'une couche mince de mercure qui facilite l'adhérence de l'argent ou de l'or. Les objets en fer doivent être cuivrés à l'avance.

On plonge l'objet, ainsi préparé, dans un bain de cyanure double d'argent et de potassium (obtenu en dissolvant 50 grammes de cyanure de potassium, et 25 grammes d'azotate d'argent dans un litre d'eau), et il est mis en communication avec le pôle négatif de la source électrique. L'anode est constituée par une lame d'argent qui se dissout et maintient au bain une composition à peu près constante. Lorsque le dépôt est suffisant (une bonne argenture correspond à un dépôt de 5 grammes par décimètre carré), on retire l'objet, on le plonge dans une solution de cyanure de potassium, on lave à l'eau chaude et on le sèche dans la sciure de bois. Le dépôt d'argent est mat; on le rend brillant par le *brunissage*, opération qui consiste à frotter la surface avec des outils en acier poli.

Un utilise une densité de courant de $1/5$ d'ampère par dm^2 .

Dorure. — On procède à peu près de la même façon pour préparer l'objet. On utilise, comme bain, une dissolution de cyanure d'or et de potassium et l'on opère à 70 ou 80° environ. En ajoutant au bain des sels de cuivre, le dépôt d'or est rouge; si on ajoute un sel d'argent, il prend une teinte verte.

Nickelage. — On utilise un bain de sulfate double de nickel et d'ammoniaque, et une anode en nickel pur. L'objet doit être lavé à la potasse chaude, à l'eau, passé ensuite dans un bain de cyanure de potassium, puis de nouveau à l'eau. Lorsque le bain se trouble, on ajoute un peu d'acide citrique de façon à le rendre légèrement acide au tournesol (1).

1. Pour les exercices, voy. chap. V.

TABLE DES MATIÈRES

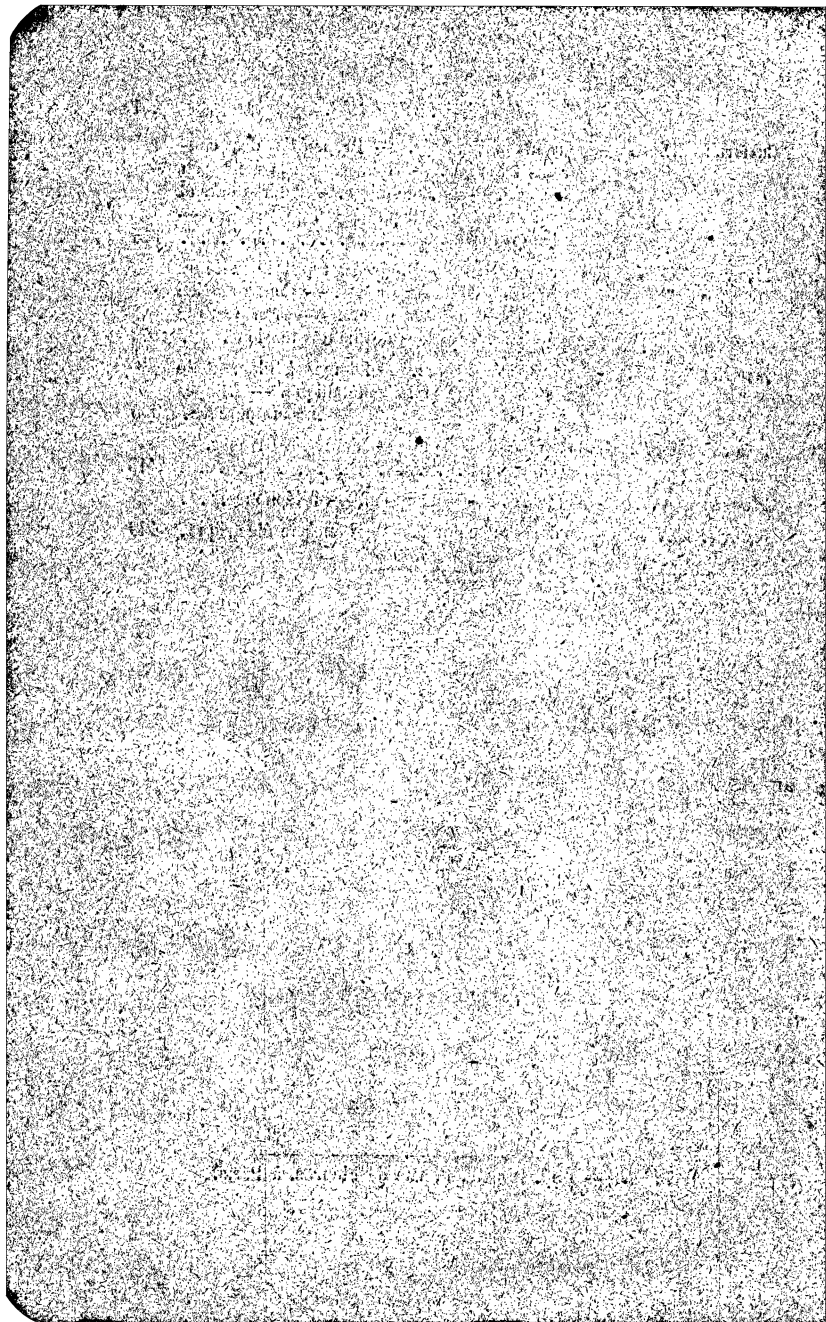
CHAPITRE PRÉLIMINAIRE.	— Matière et énergie. — Unités. — Conservation de l'énergie.	1
CHAPITRE	I. — Principaux effets du courant électrique. — Conducteurs. — Première idée de la résistance électrique. — Canalisations.	15
CHAPITRE	II. — Analogie hydraulique. — Intensité d'un courant. — Ampère et Coulomb. — Potentiel ou tension. — Force électromotrice. — Volt . . .	24
CHAPITRE	III. — Résistance électrique. — Lois et formules d'Ohm. — Résistivité. — Chute de tension en ligne. — Généralisation de la loi d'Ohm	37
CHAPITRE	IV. — Courants dérivés. — Rhéostats. — Mesure des résistances. — Énergie d'un courant. — Loi de Joule	52
CHAPITRE	V. — Électrolyse. — Polarisation des électrodes. . .	70
CHAPITRE	VI. — Piles. — Principaux modèles. — Grandeurs qui caractérisent un élément de pile, leur mesure. — Groupement des éléments	79
CHAPITRE	VII. — Accumulateurs. — Formations diverses. — Charge, décharge et entretien. — Modèles usuels. — Usages	102
CHAPITRE	VIII. — Magnétisme. — Aimants. — Champs magnétiques des aimants et des courants. — Analogie des aimants et des courants	118
CHAPITRE	IX. — Aimantation du fer et de l'acier. — Flux magnétique, analogie hydraulique. — Perméabilité. — Hystérésis.	138
MÉTAL.	— <i>Élect. indust.</i>	29

CHAPITRE	X. — Circuit magnétique. — Force magnétomotrice et réluctance. — Électroaimants. — Force portante.	161
CHAPITRE	XI. — Déplacement d'un courant dans un champ magnétique. — Travail électromagnétique. — Force électromotrice inverse d'un récepteur. — Unités C. G. S. électromagnétiques. . .	177
CHAPITRE	XII. — Mesure de l'intensité et de la force électromotrice d'un courant. — Ampèremètres et voltmètres divers. — Wattmètre.	187
CHAPITRE	XIII. — Induction. — Lois qualitatives et lois quantitatives. — Self-induction. — Courants de Foucault.	198
CHAPITRE	XIV. — La dynamo à courant continu. — Fonctionnement. — Induits divers.	216
CHAPITRE	XV. — La dynamo à courant continu (<i>suite</i>). — Inducteurs. — Différents modes d'excitation. — Rendement. — Installation.	239
CHAPITRE	XVI. — Distribution de l'énergie électrique. — Distribution à tension constante. — Feeders. — Emploi des accumulateurs. — Canalisations. — Appareils divers : interrupteurs, commutateurs, coupe-circuits, disjoncteurs, parafoudres.	258
CHAPITRE	XVII. — Moteurs à courant continu. — Rendement. — Propriétés des différents modes d'excitation.	278
CHAPITRE	XVIII. — Applications des moteurs électriques à la transmission de la puissance mécanique et à la traction	295
CHAPITRE	XIX. — Propriétés générales des courants alternatifs. — Fréquence. — Phases. — Composition des courants alternatifs. — Intensité et f. é. m. efficaces.	304
CHAPITRE	XX. — Influence de la self-induction et de la capacité. — Puissance apparente et puissance réelle. — Groupement des selfs et des capacités. — Résonance.	320
CHAPITRE	XXI. — Alternateurs. — Différents types. — Couplage.	339
CHAPITRE	XXII. — Transformateurs. — Différents types. — Fonctionnement. — Usages.	531

TABLE DES MATIÈRES.

451

CHAPITRE	XXIII. — Courants polyphasés. — Propriétés des courants triphasés. — Montages en étoile et en triangle. — Montage mixte. — Alternateurs et transformateurs triphasés et diphasés. — Champs tournants	361
CHAPITRE	XXIV. — Alternomoteurs. — Différents types de moteurs synchrones et asynchrones. — Commutatrice et transformateurs divers. — Transport de l'énergie, avantages des hautes tensions. . .	379
CHAPITRE	XXV. — Éclairage électrique. — Lampes à filament de charbon et à filament métallique. — Lampes à arc. — Régulateurs. — Arc au mercure.	396
CHAPITRE	XXVI. — Chauffage électrique — Fours électriques. — Compteurs	413
CHAPITRE	XXVII. — Sonneries. — Télégraphe. — Téléphones. . .	424
CHAPITRE	XXVIII. — Applications chimiques de l'énergie électrique.	440



ENSEIGNEMENT PRIMAIRE SUPÉRIEUR

Programmes du 26 Juillet 1909.

Enseignement de la Physique et de la Chimie

Cours de Physique et de Chimie

Par P. MÉTRAL

Agrège de l'Université,

Directeur de l'École primaire supérieure Colbert, à Paris.

Editions conformes aux programmes du 26 juillet 1909

JEUNES GENS

JEUNES FILLES

1^{re} ANNÉE. 1 vol. in-16, avec 255 fig., 2^e édition . . . 2 fr. 50

2^e ANNÉE. 1 vol. in-16, avec 293 fig., 2^e édition . . . 3 fr. »

3^e ANNÉE. 1 vol. in-16, avec 314 fig., 2^e édition . . . 3 fr. »

Cours de physique (1^{re}, 2^e, 3^e années), 1 vol. in-16. 4 fr. »

Cours de chimie (1^{re}, 2^e, 3^e années), 1 vol. in-16. 3 fr. 50

1^{re} ANNÉE. 1 vol. in-16, avec 210 fig., cart. toile . . . 2 fr. 50

2^e ANNÉE. 1 vol. in-16 avec 217 fig., cart. toile . . . 2 fr. 25

3^e ANNÉE. 1 vol. in-16, avec 168 fig., cart. toile . . . 2 fr. 25

Cours de physique (1^{re}, 2^e, 3^e années). 1 vol. in-16. 3 fr. 50

Cours de chimie (1^{re}, 2^e, 3^e années). 1 vol. in-16. 3 fr. »

L'enseignement des sciences physiques à l'école primaire supérieure doit être surtout pratique et viser aux applications. Le but n'est pas de faire des élèves des physiciens de profession, mais de leur faire connaître les grandes lois de la nature et de les mettre à même de se rendre compte de ce qui se passe autour d'eux. — L'auteur s'est conformé à ces principes en rédigeant ce cours de Physique et de Chimie: il a laissé de côté les expériences qui ne présentent qu'un intérêt historique et s'est efforcé d'arriver à l'explication des faits essentiels, le plus rapidement possible, par la voie qui a paru la plus simple et la plus logique, tout en conservant l'ordre du programme officiel. De cette manière on peut gagner du temps et le consacrer à l'exposition des grandes applications agricoles et industrielles auxquelles l'auteur donnera une large place, surtout en deuxième et troisième années.

Pour rendre plus claire et plus rapide l'exposition, on a tracé de nombreuses figures schématiques que l'élève peut suivre aisément et reproduire avec facilité. Un certain nombre d'exercices numériques, qui pourront être résolus soit par l'arithmétique, soit par l'algèbre, complètent l'ouvrage.

*Enseignement des Mathématiques***Cours d'Arithmétique** ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣
♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ **théorique et pratique**

PAR

M. H. NEVEU

Agrégé de l'Université

Directeur de l'École primaire supérieure Lavoisier, à Paris

Edition conforme aux programmes du 26 juillet 1909***5^e édition. 1 volume in-16, cart. toile. 3 fr.*****Cours d'Algèbre** ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣
♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ **théorique et pratique**

Suivi de NOTIONS DE TRIGONOMÉTRIE

PAR

M. H. NEVEU***Edition conforme aux programmes du 26 juillet 1909******5^e édition. 1 volume in-16, cart. toile. 3 fr.*****Cours de Géométrie** ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣
♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ **théorique et pratique**

PAR

MM. H. NEVEU et BELLENGER***Editions conformes aux programmes du 26 juillet 1909******1^{re} ANNÉE. 2^e édition. 1 vol. in-16, cart. toile 2 fr. »******2^e ANNÉE. 2^e édition. 1 vol. in-16, cart. toile. 2 fr. 50******3^e ANNÉE. 1 vol. in-16 cart. toile. 3 fr. »*****Cours de Comptabilité**

PAR

Gabriel FAUREAncien Professeur à l'École des Hautes Études commerciales
et à l'École commerciale***Edition conforme aux programmes du 26 juillet 1909******3^e édition. 1 volume in-16, cart. toile. 3 fr.***

*Enseignement des Sciences Naturelles
et de l'Hygiène*

Cours

d'Histoire Naturelle

PAR MM.

M. BOULE | **H. LECOMTE** | **Ch. GRAVIER**
Professeur au Muséum | Professeur au Muséum | Assistant au Muséum

Éditions conformes aux programmes du 26 juillet 1909

- 1^{re} ANNÉE : 4^e édition, 1 vol. in-16, avec 363 fig., cart. toile. 2 fr. 25
2^e ANNÉE : 3^e édition, 1 vol. in-16, avec 476 figures et 7 planches hors
texte en couleurs, cart. toile. 3 fr.
3^e ANNÉE : 3^e édition, 1 vol. in-16, avec 488 fig., cart. toile. 3 fr.

12 LEÇONS D'HYGIÈNE

Conformes aux programmes du 26 juillet 1909

PAR

P. WURTZ | **H. BOURGES**
Professeur agrégé à la Faculté | Ancien chef du Laboratoire
de médecine de Paris | d'hygiène
Membre de l'Académie de médecine | à la Faculté de médecine de Paris.
1 vol. in-16, avec figures, cart. toile souple. 2 fr.

Planches murales d'Histoire naturelle

Nouvelles planches murales d'Histoire naturelle. par P. et
H. GERVAIS. 3^e édition des *Planches murales* d'Achille Comte.
Zoologie, 34 planches, 102 fr.; *Botanique*, 14 planches, 42 fr.;
Géologie, 14 planches, 42 fr.; La collection complète, 180 fr.,
Montée sur toile avec gorges et rouleaux. 360 fr.

- Chaque planche est vendue séparément, en feuille 3 fr. 50
et montée. 6 fr. 50
Texte explicatif des trois parties. 1 vol. in-18, cartonné. 3 fr.

Tableaux d'Histoire naturelle, montés sur toile :

- Zoologie*, par MM. PERRIER et GERVAIS, 30 tableaux . . 300 fr.
Botanique, par MM. BONNIER et MANGIN, 30 tableaux . . 300 fr.
Chaque tableau séparément 10 fr.

Un prospectus spécial de ces planches murales est envoyé sur demande.

Instruction civique et sociale

Cours d'Instruction Civique

Par Albert MÉTIN

Ancien professeur aux Écoles primaires supérieures de Paris.

Édition conforme aux programmes du 26 juillet 1909

3^e édition. 1 volume in-16, cartonné toile 1 fr. 50

Cours d'Économie Politique

Par Albert MÉTIN

Édition conforme aux programmes du 26 juillet 1909

3^e édition. 1 volume in-16, cartonné toile 1 fr. 50

Cours de Droit Usuel

par Albert MÉTIN

Édition conforme aux programmes du 26 juillet 1909

3^e édition. 1 volume in-16, cartonné toile 1 fr. 50

Manuel ♣ de Gymnastique ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ ♣ Rationnelle et Pratique

(MÉTHODE SUÉDOISE)

PAR

SOLEIROL de SERVES

Medecin gymnaste.

M^{me} LE ROUX

Professeur de gymnastique
au Lycée de Versailles.

3^e édition, 1 vol. in-16, avec fig., cart. toile 2 fr.

Enseignement des Sciences appliquées

Vient de paraître :

Notions de Technologie

Par H. GIBERT

Professeur à l'École Colbert, agrégé de l'Université

*Ouvrage rédigé conformément au dernier programme
de l'Enseignement primaire supérieur*

1 vol. in-16, avec 362 figures, cart. toile 5 fr.

Enseignement de la Grammaire

Vient de paraître :

Cours

DE

LANGUE FRANÇAISE

Grammaire et Exercices

À L'USAGE DES 1^{re}, 2^e ET 3^e ANNÉES DE L'ENSEIGNEMENT PRIMAIRE SUPÉRIEUR

Par CH. WEVER

Ancien professeur d'École primaire supérieure.
Professeur au collège de Melun.

*Conforme aux programmes du 26 juillet 1909
et à l'arrêté ministériel du 25 juillet 1910*

1 volume in-16, cart. toile souple. 2 fr.

*Enseignement du Français***Textes français****Lectures et Explications**A L'USAGE DES 1^{re}, 2^e ET 3^e ANNÉES DE L'ENSEIGNEMENT PRIMAIRE SUPÉRIEURPar **Ch. WEVER**

Ancien professeur d'École primaire supérieure, professeur au collège de Melun.

*Édition conforme aux programmes du 26 juillet 1909*3^e édition. 1 volume in-16, cartonné toile souple. 3 fr.

OUVRAGES DE

MM. E. BAUER et E. DE SAINT-ÉTIENNE

Professeurs à l'École Alsacienne.

Récitations et Lectures Enfantsines

POUR LES ÉCOLES PRIMAIRES

Quatrième édition entièrement refondue. 1 volume in-16, illustré de six frontispices, cartonné toile. 1 fr. 25**Premières Lectures Littéraires***Seizième édition.* 1 volume in-16, cartonné toile 1 fr. 50*Ouvrage couronné par la Société pour l'Instruction élémentaire ; lectures intéressantes, simples et familières, qui plaisent aux enfants et forment leur goût.***Nouvelles Lectures Littéraires**

AVEC NOTES ET NOTICES

Onzième édition entièrement refondue. 1 vol. in-16, cart. toile. 2 fr. 50Cet ouvrage, suite naturelle du précédent, est divisé en sept chapitres : *Contes et Légendes ; Fables ; Anecdotes et Récits ; Etudes morales ; Portraits et Caractères ; Scènes et Tableaux de la Nature.* Il comprend 200 morceaux, prose et poésie, empruntés aux meilleurs auteurs, et renfermé la matière de deux années d'études.

*Enseignement de la Littérature***Leçons de Littérature Grecque**

Par M. CROISSET

Membre de l'Institut, professeur à la Faculté des lettres.

12^e édition. Un vol. in-16, cartonné toile. 2 fr.**Leçons de Littérature Latine**

PAR MM.

LALLIERMaître de conférences
à la Faculté des lettres de Paris**LANTOINE**Secrétaire
de la Faculté des lettres de Paris*10^e édition.* Un vol. in-16, cartonné 2 fr.**Premières leçons d'Histoire Littéraire**LITTÉRATURE GRECQUE, LITTÉRATURE LATINE
LITTÉRATURE FRANÇAISE

Par MM. CROISSET, LALLIER et PETIT DE JULLEVILLE

8^e édition. Un vol. in-16, cartonné toile. 2 fr.**Histoire de la Littérature Française**
depuis les origines jusqu'à nos jours

Par M. PETIT DE JULLEVILLE

Professeur à la Faculté des lettres de Paris.

Nouvelle édition augmentée pour la période contemporaine

1 volume in-16, cartonné toile. 4 fr.

On peut se procurer séparément :

DES ORIGINES A CORNEILLE. 1 vol. in-16, cart. toile. 2 fr.

DE CORNEILLE A NOS JOURS, mise à jour par M. A. AUDOLLENT, maître de conférences à l'Université de Clermont. 1 vol. in-16, cart. toile. 2 fr.

Nouveau Traité de versification française, par CH. LE GOFFIC et E. THIEULIN, professeurs agrégés de l'Université. *5^e édition revue et augmentée.* 1 volume in-16, cartonné toile. 1 fr. 50

*Enseignement de la Géographie***Cours de Géographie**

PAR MM.

Marcel DUBOIS

Professeur de Géographie coloniale à la Faculté des lettres de Paris
Maître de Conférences à l'École normale supérieure de jeunes filles de Sèvres

et E. SIEURIN

Professeur au Collège de Melun.

Éditions conformes aux programmes du 26 juillet 1909

- 1^{re} ANNÉE. Principaux aspects du globe. La France. 2^e édition.
1 vol. in-16, avec 221 figures, cart. toile. 2 fr. 25
- 2^e ANNÉE. L'Europe (moins la France). 2^e édition, 1 vol. in-16,
avec 177 figures, cart. toile. 2 fr. 25
- 3^e ANNÉE. Le Monde (moins l'Europe). Le rôle de la France
dans le Monde. 2^e édition, 1 vol. in-16, avec 238
figures, cart. toile 2 fr. 25

Cartes d'Étude pour servir à ♣♣♣♣♣**l'Enseignement**♣♣ **de la Géographie et de l'Histoire**

PAR MM.

Marcel DUBOIS et E. SIEURIN**Éditions conformes aux programmes du 26 juillet 1909**

- 1^{re} ANNÉE. I. Temps modernes. — II. Principaux aspects du
globe. La France, 14^e édition entièrement refon-
due avec 24 cartes nouvelles. 2 fr. 25
- 2^e ANNÉE. I. Époque contemporaine. — II. L'Europe (moins
la France), 13^e édition entièrement refondue, avec
16 cartes nouvelles et 10 cartes refaites 2 fr. 25
- 3^e ANNÉE. I. Le Monde au XIX^e siècle. — II. Le Monde
(moins l'Europe). 13^e édition entièrement refondue,
avec 8 cartes nouvelles et 9 cartes refaites 2 fr. 25

Enseignement de la Géographie (Suite)

*** **Géographie de la France
et des Cinq Parties du Monde**

A L'USAGE DES CANDIDATS AU BREVET ÉLÉMENTAIRE
ET DES ÉLÈVES DES COURS SPÉCIAUX

Par **E. SIEURIN**

Professeur de Géographie au Collège de Melun.

Cinquième édition. 1 vol. in-16, avec 149 cartes dans le texte, cartonné
toile 2 fr. 50

Chaque chapitre, souvent même chaque paragraphe, est accompagné
d'une ou de plusieurs cartes dans l'exécution desquelles on retrouve
la précision et la clarté de *Cartes d'Etude pour servir à l'Enseignement
de la Géographie.* (Voir, page 10, le cours d'Histoire correspondant.)

Géographie agricole *
*** de la France et du Monde**

PAR

J. DU PLESSIS DE GRENÉDAN

Professeur à l'École supérieure d'Agriculture d'Angers.

1 vol. in-8° avec 118 figures et cartes dans le texte. 7 fr.

Cahiers Sieurin

A L'USAGE DE L'ENSEIGNEMENT PRIMAIRE SUPÉRIEUR

Éditions conformes aux programmes du 26 juillet 1909

1^{re} ANNÉE. — Géographie générale. La France. 4^e éd. 0 fr. 75

2^e ANNÉE. — L'Europe (moins la France). 3^e éd. . . 0 fr. 75

3^e ANNÉE. — Le Monde (moins l'Europe). 3^e éd. . . 0 fr. 75

Cette publication a un but essentiellement pratique: économiser le
temps de l'élève; lui procurer le moyen de faire des croquis moins
informes et plus profitables; présenter sur le même papier les résumés
et les cartes; permettre au professeur de s'assurer rapidement que
le travail donné a été fait.

*Enseignement de l'Histoire***Cours d'Histoire**

Par E. SIEURIN et C. CHABERT

Professeurs à l'École primaire supérieure de Melun.

Éditions conformes aux programmes du 26 juillet 1909

- 1^{re} ANNÉE. — **Histoire de France depuis le début du XVI^e siècle jusqu'en 1789.** 8^e édition. 1 vol. in-16, avec 171 fig., cart. toile. 2 fr.
- 2^e ANNÉE. — **Histoire de France de 1789 à la fin du XIX^e siècle.** 7^e édition. 1 vol. in-16 avec 132 fig., cart. toile. 2 fr.
- 3^e ANNÉE. — **Le Monde au XIX^e siècle.** 8^e édition. 1 vol. in-16, avec 95 fig., cart. toile. 2 fr.

Chaque leçon est précédée d'un plan assez détaillé. elle est toujours terminée par une conclusion qui résume le chapitre. Elle est suivie de quelques sujets de devoir et de composition. De nombreuses figures, cartes et croquis ajoutent à l'intérêt du texte et en facilitent l'étude.

Histoire de France

des Origines à nos jours

A L'USAGE DES CANDIDATS AU BREVET ÉLÉMENTAIRE
ET DES ÉLÈVES DES COURS SPÉCIAUX

Par E. SIEURIN et C. CHABERT

Quatrième édition complètement refondue, 1 vol. in-16, avec nombreuses figures, cartonné toile. 2 fr. 50

Abrégé de l'Histoire

de la Civilisation

DEPUIS LES TEMPS LES PLUS REÇULÉS JUSQU'À NOS JOURS

Par Ch. SEIGNOBOS

Ouvrage couronné par la Société d'instruction élémentaire
Nouvelle édition avec figures. 1 vol. in-16, cartonné toile. . . 1 fr. 25

Enseignement du Dessin

Vient de paraître :

**Traité théorique et pratique
de Travaux à l'aiguille**

RÉPONDANT AUX PROGRAMMES DE L'ENSEIGNEMENT PRIMAIRE SUPÉRIEUR
ET DE L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE DES JEUNES FILLES

Par M. FRECHON

Professeur au collège de Melun

1 volume in-4° avec nombreuses gravures, cartonné toile. 3 fr. 50

**Traité pratique de
Composition décorative**

A L'USAGE DES JEUNES FILLES

RÉPONDANT AUX PROGRAMMES DES COURS COMPLÉMENTAIRES, DES ÉCOLES
PRIMAIRES SUPÉRIEURES ET PROFESSIONNELLES, DES ÉCOLES NORMALES

Par H. FRECHON

2^e édition. 1 vol. in-4° avec planches, cartonné. 3 fr. 50

**Traité pratique de
Composition décorative**

A L'USAGE DES JEUNES GENS

RÉPONDANT AUX NOUVEAUX PROGRAMMES DU DESSIN ET DU MODELAGE
DES ÉCOLES NORMALES D'INSTITUTEURS, DES ÉCOLES PROFESSIONNELLES,
DES ÉCOLES D'OUVRIERS D'ART

Par H. FRECHON

1 vol. in-4°, cartonné toile 3 fr. 50

**Cours élémentaire de
Composition décorative**

(A L'USAGE DES JEUNES FILLES)

RÉPONDANT AUX PROGRAMMES DES COURS SUPÉRIEURS ET COMPLÉMENTAIRES
DES ÉCOLES PRIMAIRES ET DES ÉCOLES ANNEXES, DES CLASSES ÉLÉMENTAIRES
DES COLLÈGES ET DES LYCÉES DE JEUNES FILLES, DU CERTIFICAT D'ÉTUDES PRIMAIRES

Par H. FRECHON

1 vol. in-4° avec planches, broché. 1 fr. »

Le plus sérieux — Le mieux informé — Le plus complet
Le mieux illustré — Le plus répandu

DE TOUS LES JOURNAUX DE VULGARISATION SCIENTIFIQUE

Fondé en 1873 par GASTON TISSANDIER

LA NATURE

REVUE DES SCIENCES

et de leurs Applications aux Arts et à l'Industrie

JOURNAL HEBDOMADAIRE ILLUSTRÉ

DIRECTION

L. DE LAUNAY

Membre de l'Académie des Sciences.
 Professeur à l'École des Mines
 et à l'École des Ponts et Chaussées.

E.-A. MARTEL

Ancien Président de la Commission centrale
 de la
 Société de Géographie.

Chaque Numéro comprend

SEIZE PAGES GRAND IN-8° COLOMBIER

tirées sur beau papier couché, luxueusement illustrées
 de très nombreuses figures, contenant de nombreux articles
 de vulgarisation scientifique, clairs, intéressants, variés,
 signés des noms les plus connus et les plus estimés.

UN SUPPLÉMENT ILLUSTRÉ DE HUIT PAGES, CONTENANT

Les Nouvelles scientifiques, recueil
 précieux d'informations.

Sous la rubrique **Science appliquée**,
 la description des *petites inventions
 nouvelles* et des *appareils inédits* (photo-
 graphie, électricité, outillage d'ama-
 teur, physique, chimie, etc.), *pratiques*,
intéressants ou curieux.

Des recettes et procédés utiles.
 Des récréations scientifiques.

Une bibliographie.

La Boîte aux Lettres, par laquelle
 les milliers d'abonnés de *La Nature*
 correspondent entre eux. C'est aussi
 sous cette rubrique que la Direction
 répond, avec une inlassable complai-
 sance, aux demandes les plus variées
 des abonnés.

Le Bulletin météorologique de
 la semaine.

PARIS		DÉPARTEMENTS		UNION POSTALE	
Un an	20 fr.	Un an	25 fr.	Un an	26 fr.
Six mois	10 fr.	Six mois	12 50	Six mois	13 fr.

71715. — Imprimerie LAHURE, rue de Fleurus, 9, à Paris.