ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

I

BARNI et MONTPELLIER. — **Le Monteur électricien,** 1900, 1 vol. in-16 de 500 pages avec 120 figures, cartonné *(Encyclopédie industrielle).* . . . . . 5 fr.

BOUANT (E.). — **La Galvanoplastie,** le nickelage, l'argenture, la dorure, l'électro-métallurgie et les applications chimiques de l'électrolyse, 1894, 1 vol. in-18 jés. de 384 p., avec 52 fig., cart. *(Encyclopédie industrielle).* . . . . . 5 fr

DE LA RIVE. — **Traité d'électricité** théorique et appliquée. 3 vol. in-8, avec 447 figures . . . . . 27 fr

GORDON (J.-E.-H.). — **Traité expérimental d'électricité et de magnétisme,** avec une introduction de M.-A. CORNU, de l'Institut, 2 vol. in-8, ensemble 1.332 p., 58 pl. et 371 fig . . . 35 fr.

GRANGE (E.). — **Des accidents produits par l'électricité** dans son emploi industriel, in-8, avec 1 pl. . . . . 1 fr. 50

GUN. — **L'Électricité appliquée à l'art militaire,** 1 vol. in-16 de 380 pages, avec 140 fig. *(Bibl. scient. cont.)* . . . . 3 fr. 50

LECADET. — **Le Champ électrique de l'atmosphère,** 1898, 1 vol. in-8, 200 pages avec 3 fig. et 10 planches . . . . . 6 fr.

LEFEVRE (J.). — **Dictionnaire d'électricité** comprenant les applications aux sciences, aux arts et à l'industrie, par Julien LEFÈVRE, agrégé des sciences physiques, professeur au Lycée et à l'Ecole des sciences de Nantes. Introduction par M. BOUTY, professeur à la Faculté des Sciences de Paris, *2e édition,* 1895, 1 vol. gr. in-8 de 1250 pages, avec 1250 figures . . . . . 25 fr

— **Les Nouveautés électriques,** 1896, 1 vol. in-16 de 412 pages avec 157 fig. cart. *(Bibl. des conn. utiles).* . . . . . 4 fr

MONTILLOT. — **La Télégraphie actuelle** en France et à l'étranger, lignes, réseaux, appareils, téléphones, par le colonel LOUIS MONTILLOT, directeur de télégraphie militaire, 1 vol. in-16 de 334 pages, avec figures *(Bibl. scient. contemp.).* . . . 3 fr. 50

— **L'Éclairage électrique,** guide pratique des électriciens et des amateurs, 1894, 1 vol. in-18 jésus de 408 pages, avec 190 fig., cartonné *(Bibl. des conn. utiles)* . . . . . 4 fr.

PLANTÉ. — **Phénomènes électriques de l'Atmosphère** (Foudre, grêle, trombes, aurores polaires, etc.), 1 vol. in-16 de 322 p. avec 50 fig. *(Bibl. scient. contemp.)* . . . . . 3 fr. 50

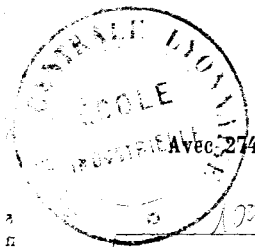
Lagny. — Imp. A. REY, 4, rue Gentil. — 21597

RAYMOND BUSQUET

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES
PROFESSEUR A L'ÉCOLE INDUSTRIELLE DE LYON
INGÉNIEUR DE L'ÉCLAIRAGE DE LA VILLE DE LYON

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE



TOME I

Avec 274 figures dans le texte.

Énergie et propriétés des courants électriques.
Magnétisme. — Courants d'induction.
Théorie et Fonctionnement des Dynamos.
Construction des Machines à courant continu.
Les courants alternatifs.
Construction des Alternateurs.

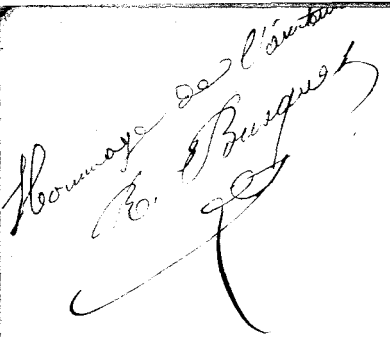
PARIS

LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS

19, RUE HAUTEFEUILLE, PRÈS DU BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1900

Tous droits réservés.



PRÉFACE

Aujourd'hui, l'électricité a définitivement acquis droit de cité parmi nous, elle prend possession de l'usine et de l'atelier par les moteurs électro-magnétiques, des voies publiques par les tramways, des établissements industriels et des habitations par l'éclairage.

Cet agent mystérieux de force et de puissance est si bien entré dans nos mœurs contemporaines qu'il devient un élément ordinaire de notre existence, comme l'eau, le gaz et le feu. Aussi l'étude de l'électricité qui semblait plus spécialement appartenir au domaine des ingénieurs et des professeurs, commence-t-elle à intéresser les personnes, en apparence les plus étrangères à ces questions, et tout le monde aujourd'hui veut savoir ce que c'est que l'électricité et se tenir au courant du langage et des applications de cette science féconde entre toutes.

Les ouvrages techniques, la plupart très bien faits, ne manquent pas aujourd'hui, mais ils s'adressent, en général, à des personnes ayant des connaissances mathématiques relativement élevées, ou possédant déjà des notions assez étendues sur la science électrique.

Il n'existe pas encore, croyons-nous, un véritable livre d'initiation, qui permette à tout homme intelligent et désireux de s'instruire, d'aborder directement les questions d'électricité industrielle, sans avoir fait, au préalable, des études spéciales.

C'est cette lacune que nous nous proposons de combler ici, en exposant simplement et sans le secours des hautes mathématiques, les phénomènes électriques et les lois qui les régissent, sans rien sacrifier toutefois des principes exacts qui servent de base à l'électricité industrielle.

Si, d'autre part, nous excluons les théories mathémati-

ques transcendantes de notre exposé, nous ne prétendons pas supprimer ni négliger les résultats numériques et les calculs simples qui permettent de les établir, dans le domaine de la pratique; seulement, nous les servirons à part, pour ainsi dire, de manière à dégager entièrement l'enseignement théorique de toute complication de chiffres ou d'opérations, et nous ne mettrons, d'ailleurs, à contribution dans ces calculs, que les opérations ordinaires de l'arithmétique ou de la géométrie.

De là, deux parties bien distinctes dans notre ouvrage : l'une, constituant l'exposé théorique de l'électricité industrielle, s'adresse à tous ceux qui veulent simplement s'initier à l'étude de cette science et se familiariser avec son langage et ses multiples applications; *elle est imprimée en caractères ordinaires et dépouillée entièrement de formules et calculs;* l'autre, imprimée en petits caractères pourra être omise, sans inconvénient, par les premiers lecteurs; elle contient les formules simples et les applications numériques, que tout praticien est appelé à connaître et à utiliser.

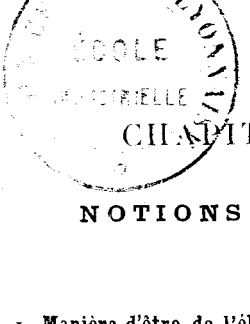
Nous pouvons donc espérer, que ce nouveau traité donnera pleine satisfaction aux nombreuses personnes qui, sans appartenir au monde technique ou scientifique, ont le légitime désir de se mettre au courant de l'électricité moderne; de même, qu'il rendra de réels services aux électriciens amateurs ou professionnels, qui trouveront dans la partie spéciale, écrite en petits caractères, tous les renseignements techniques et pratiques dont ils auront besoin dans les applications de l'énergie électrique.

R. BUSQUET.

Lyon, 1er mai 1900.

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE



CHAPITRE PREMIER

NOTIONS PRIMORDIALES

1. **Manière d'être de l'électricité.** — Nous ne connaissons pas la nature certaine de l'*électricité*, et la science actuelle n'a pu émettre encore sur ce point que des hypothèses. Mais il n'est pas nécessaire de définir l'électricité, pas plus que la chaleur et la lumière. Nous concevons l'existence de la chaleur, par exemple, par la sensation que nous éprouvons au contact des corps chauds et par les phénomènes dont ces corps sont le siège, comme la liquéfaction des solides, la vaporisation des liquides et autres effets de même nature. Ainsi l'électricité se révèle à nous par des phénomènes très divers, que l'observation et le raisonnement nous conduisent à rapporter tous à la même cause, bien qu'ils apparaissent dans toutes les branches de l'activité du monde physique.

Ces effets de l'électricité, que nous étudierons successivement dans la suite, se manifestent dans le domaine de la mécanique, par des attractions et des répulsions spontanées entre les corps matériels ; dans le domaine de la physique, par le dégagement de chaleur et de lumière ; dans celui de la chimie, par la combinaison des corps élémentaires et la décomposition des corps combinés ; enfin,

dans le domaine de la physiologie, par les contractions musculaires et les commotions violentes.

2. **L'électricité agent de force.** — On voit donc, en définitive, que l'électricité se conduit comme une force agissante, et que cet agent doit être classé dans le monde de la force. Ce monde s'offre de tous côtés à nos regards et nous sommes constamment en relation avec lui.

Si nous jetons, en effet, les yeux sur la nature qui nous environne, ce qui nous frappe tout d'abord, c'est la vue des corps de toute espèce, les roches, les métaux, tout ce qui peuple le monde de la *matière*. Mais si tout se résumait dans la matière, si rien n'existait en dehors d'elle, la nature ne serait plus qu'un immense tombeau.

Ce qui distingue avant tout le *corps matériel*, c'est son *inertie*, c'est-à-dire son incapacité à mouvoir les autres corps, inertes comme lui, et à se déplacer lui-même. Si donc nous voyons des corps en mouvement, les masses d'air s'agiter dans l'espace, les fleuves descendre des sommets des montagnes vers la mer, les locomotives franchir des distances considérables aux plus grandes vitesses, c'est qu'à côté de la matière, il y a quelque chose qui l'ébranle, qui lui transmet le mouvement et la vie, autrement dit la *force*.

Nous voyons donc que notre monde se divise en deux parties distinctes, l'une est le domaine de la *matière*, c'est un monde de corps inertes et passifs, l'autre est celui de la *force*, c'est le monde des *agents puissants* et actifs.

Les agents de force ne se présentent pas à nos yeux comme la matière qui, d'après ses formes et ses dimensions, occupe un volume limité dans l'espace ; ils n'ont, eux, ni formes, ni dimensions palpables et perceptibles à la vue ; la force étant de nature éminemment agissante, se révèle à nous par son action, par ses effets, et, comme on dit en un mot, par son *énergie*.

3. **L'électricité source d'énergie. Définition du travail.** — Au point de vue industriel, on peut donc définir l'électricité : *une source d'énergie* ou *de travail*, car ces deux termes sont équivalents.

Dans le domaine de la mécanique, on dit qu'il y a développement d'énergie ou production de travail, chaque fois qu'une force, appliquée à un corps matériel, imprime à ce corps un mouvement. Ainsi, la force expansive de la vapeur agissant sur le piston d'une machine en relation avec un outil, fait mouvoir ce piston et l'outil qu'il commande; il y a donc production de travail mécanique.

4. **Diverses formes d'énergie. Transformations.** — Si, d'autre part, nous examinons ce qui se passe dans la machine à vapeur, nous voyons que le travail mécanique a pris sa source même dans le foyer de la chaudière, car c'est bien à la *chaleur* développée par le combustible que la vapeur a emprunté sa force élastique. On peut donc admettre logiquement que l'énergie préexistait dans le foyer, sous forme de chaleur, et que la vapeur n'a joué qu'un rôle d'intermédiaire, pour transformer cette *énergie calorifique en énergie mécanique*, dans le cylindre du moteur.

De même, l'*énergie électrique* se transforme en énergie mécanique ou de mouvement, comme nous l'avons dit, en énergie calorifique ou en énergie chimique, suivant que l'agent électrique produit un travail mécanique ou calorifique ou chimique.

5. **Réversibilité des transformations de l'énergie.** — Nous savons également que si la chaleur se transforme en mouvement dans les moteurs à gaz et à vapeur, le mouvement peut se transformer inversement en chaleur, comme, par exemple, dans le travail de frottement des organes de machines, ou dans les chocs du marteau pilon.

Ainsi, ces phénomènes de *transformations* sont réversibles dans les domaines de la mécanique et de la chaleur; il en est de même pour l'électricité. On doit même ajouter que l'énergie électrique est, de toutes les formes de l'énergie, celle qui se prête le mieux aux diverses transformations mécaniques, chimiques ou thermiques, et réciproquement que toutes les *formes de l'énergie* se transforment avec la plus grande facilité en *électricité*.

L'*électricité* traversant un filament de charbon l'échauffe et le rend incandescent, on obtient ainsi la lumière élec-

trique : c'est la transformation de l'*énergie électrique en chaleur*. Le courant passe dans un corps liquide et le décompose en ses divers éléments ; il y a production de *travail chimique*, et transformation en énergie de cette espèce. Il parcourt le circuit d'un moteur de construction spéciale et fait tourner cette machine, c'est la transformation de son énergie en *énergie mécanique*. Nous verrons inversement que l'on produit de l'énergie électrique en développant des réactions chimiques dans les piles et des effets mécaniques dans les générateurs modernes d'électricité que l'on appelle des *dynamos*.

6. **L'électricité intermédiaire de transformation**. — Non seulement l'électricité se transforme elle-même très aisément en énergie de toute nature, mais elle est encore un précieux intermédiaire aux autres *formes de l'énergie*, pour se transformer les unes dans les autres. Les dynamos industrielles, qui produisent aujourd'hui l'électricité, sont des machines actionnées par des moteurs à vapeur, par exemple ; ceux-ci ont emprunté leur énergie mécanique à la chaleur d'un foyer : ils transmettent cette énergie à la machine électrique, qui, dans son mouvement de rotation, la transforme en électricité ; les courants électriques ainsi produits sont utilisés à l'éclairage. La lumière des lampes électriques n'est donc que le résultat de la transformation successive de la chaleur en énergie électrique, et c'est sous cette forme intermédiaire que la chaleur du foyer a pu parvenir aux lampes pour les rendre incandescentes et lumineuses.

7. **Conservation de l'énergie.** — On peut aller plus loin et appliquer le principe de la conservation de la matière aux effets ou travaux produits par les forces dans toutes leurs manifestations. De même qu'on ne peut détruire ni créer aucun atome de matière, on ne peut créer ni anéantir aucune parcelle de travail ou d'énergie provenant de l'action des forces naturelles.

En vertu de ce principe, si nous voyons un corps en mouvement s'arrêter et, par conséquent, un travail mécanique disparaître, nous pouvons affirmer que ce travail

n'est pas anéanti et que nous le retrouverons sous une autre forme, sous forme de chaleur généralement, et de telle sorte que l'*énergie calorifique* développée soit équivalente à l'*énergie mécanique* préexistante. C'est ainsi que le marteau frappant sur l'enclume s'échauffe, que le boulet arrêté par la plaque de blindage rougit et devient incandescent, l'énergie mécanique de mouvement se trouvant transformée en énergie calorifique.

De même, l'énergie mécanique peut se transformer en énergie électrique, en quantité équivalente, à moins qu'une partie de cette énergie, sous sa forme initiale, ne se réduise en chaleur. Dans tous les cas, la somme des *énergies électriques* et *calorifiques* est exactement égale à l'*énergie mécanique* dépensée.

En résumé, nous pouvons dire que : comme la chaleur, l'*électricité* est une *forme de l'énergie* et, par suite, une *source d'énergie;* que l'énergie électrique peut se transformer aisément dans toutes les autres formes de l'énergie, et que celles-ci peuvent reproduire à leur tour, avec la plus grande facilité, l'énergie électrique; enfin, que l'électricité, comme les autres formes de l'énergie, obéit à la grande loi de la *conservation du travail*, et que les résultats de ses transformations donnent toujours lieu à la même quantité d'énergie sous toutes ses formes.

C'est ce principe de la transformation et de la conservation de l'énergie sous toutes ses formes, qui domine entièrement la science industrielle moderne.

8. Mesure de l'énergie. Travail et puissance. — Pour mesurer l'énergie, comme pour évaluer les longueurs, il faut choisir une unité de même nature.

Quand il s'agit de travail mécanique, l'unité adoptée est le *kilogrammètre. C'est le travail effectué par une force d'un kilogramme qui fait parcourir une distance de 1 mètre à son point d'application, dans sa propre direction.*

On dira, par exemple : cette machine a produit un travail de 60.000 kilogrammètres.

Mais ce travail peut être produit en un temps plus ou moins long, suivant que la machine génératrice est plus

ou moins puissante. Le temps joue donc un rôle prépondérant dans cette question et il convient d'en tenir compte.

Par définition : *La puissance est le travail effectué pendant l'unité de temps, soit pendant une seconde.*

On peut prendre comme unité de mesure de la puissance *le kilogrammètre par seconde*, mais on adopte généralement une unité plus grande, qui vaut 75 kilogrammètres par seconde et que l'on nomme *cheval-vapeur*.

On se sert d'une unité analogue pour évaluer le travail, c'est le *cheval-heure*, qui vaut 270.000 kilogrammètres, sans condition de temps.

Il ne faut pas confondre le cheval-vapeur, qui est une puissance capable de produire indéfiniment 75 kilogrammètres par seconde, avec le cheval-heure qui est une quantité de travail parfaitement limitée et définie.

9. Équivalence mécanique de la chaleur. — La chaleur est une forme de l'énergie, comme le travail mécanique, et ces deux formes peuvent se métamorphoser l'une dans l'autre, en quantités équivalentes.

De même que l'énergie mécanique se mesure en kilogrammètre, l'énergie calorifique ou la chaleur se mesure en *calories*.

La calorie est, par définition, la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau.

On a trouvé expérimentalement que l'énergie emmagasinée dans une calorie était équivalente à l'énergie mécanique de 426 kilogrammètres. Le nombre 426 est ce qu'on appelle *l'équivalent mécanique de la chaleur*.

Réciproquement, 1 kilogrammètre vaut $\frac{1}{426}$ de calorie.

Cela veut dire que, si l'on pouvait pratiquement transformer intégralement la chaleur en travail mécanique, on produirait 426 kilogrammètres pour chaque calorie dépensée, et, inversement, que 426 kilogrammètres étant convertis entièrement en chaleur développeraient une calorie.

Ces deux quantités d'énergie de formes différentes sont donc équivalentes.

10. **Moyens de mesurer les forces et l'energie en mécanique.** — Forces. — Dans le domaine mécanique, comme dans les autres domaines des phénomènes naturels, les forces sont mesurées par les actions apparentes ou effets qu'elles produisent sur les autres corps. Ainsi l'on jugera de l'intensité d'une force ou de sa grandeur, par la pression qu'elle exerce sur une surface, par exemple, ou par la déformation qu'elle fait subir à un ressort.

C'est sur ce dernier effet que sont basés les appareils destinés à mesurer les forces et qu'on appelle *dynamomètres*.

Un des plus simples est celui de Poncelet (fig. 1). Il se compose de deux lames flexibles reliées aux extrémités par des chapes *a* et *b* articulées. L'appareil étant suspendu à un point fixe par l'anneau A, on attache au crochet inférieur C des poids croissants de kilogramme en kilogramme, et on marque sur les réglettes *r* les écartements verticaux des ressorts ou l'accroissement de la double flèche.

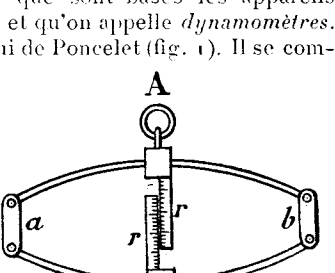


Fig. 1. — Dynamomètre de Poncelet.

On prend comme unité de force le poids de 1 kilogramme, c'est-à-dire la force attractive exercée par la terre sur la masse d'un décimètre cube d'eau distillée.

Pour une force quelconque, autre que celle de la pesanteur, qui sera appliquée au même instrument et qui produira les mêmes déformations que celles des poids de 1, 2, 10, 20, 30 kilogrammes, etc, on dira que cette force est une force de 1, 2, 10, 20, 30 kilogrammes, etc.

Énergie du travail mécanique. — Ce genre d'énergie résulte du déplacement d'un corps matériel sous l'action d'une force issue d'un second corps ou système de corps matériels.

Pour un même parcours, il est évident que le travail est

proportionnel à la force, et, pour une même force, qu'il est proportionnel au chemin parcouru dans la direction de la force considérée ; en d'autres termes, le travail T est proportionnel à la fois à la force F mise en œuvre, et au chemin L effectué dans sa direction ; ce qui exige que l'on ait :

$$T = F \times L$$

Nous savons mesurer F par le dynamomètre, L par le mètre ; le produit des kilogrammes de F par les mètres de L nous donnera la valeur de T en kilogrammètres.

Frein de Prony. — Quand il s'agit de mesurer la puissance ou travail par seconde d'un moteur mécanique tel qu'une machine à vapeur ou une roue hydraulique, on se sert plus généralement du frein de Prony ou des dynamomètres de transmission.

Le frein (fig. 2) se compose de deux mâchoires en bois qui embrassent une poulie *fixée sur l'arbre moteur* de la machine. La mâchoire inférieure porte un levier de longueur *l*, à l'extrémité duquel un plateau peut être chargé de poids.

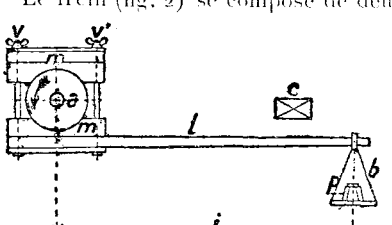


Fig. 2. — Frein de Prony.

Au repos, le poids P du plateau tend à faire baisser le levier, mais en marche, la force de frottement développé entre la jante de la poulie et les mâchoires tend à relever ce levier.

On obtient l'équilibre du système, pour une vitesse déterminée, en serrant les écrous des mâchoires et faisant varier le poids P du plateau.

Il faut avoir soin de lubrifier les surfaces de frottement, avec une dissolution de savon noir, de suif ou autre substance grasse, afin d'éviter l'échauffement excessif des surfaces frottantes.

Deux taquets tels que C limitent les oscillations du levier de part et d'autre de sa position d'équilibre

Le plateau étant immobile, le travail de frottement du frein absorbe l'énergie entière développée par le moteur et ce travail est évidemment le même que celui que *produirait* une force égale au poids P, tournant du même mouvement sur la

circonférence du rayon l, en entraînant les mâchoires autour de l'arbre.

Le chemin parcouru par seconde serait alors :

$$2\pi l \times \frac{n}{60}$$

$2\pi l$ étant la circonférence, n le nombre de tours par minute et $\frac{n}{60}$ celui par seconde. Le travail ou produit de la force par le chemin parcouru sera donc par seconde :

$$\text{Puissance} = 2\pi l \times \frac{n}{60} \times \text{P} = \frac{2\pi \text{P} l n}{60} \text{ kilogrammètres.}$$

Et comme la puissance d'un cheval vapeur comprend 75 kilogrammètres par seconde :

$$\text{Puissance en chevaux} = \frac{2\pi \text{P} l n}{60 \times 75}$$

En faisant le calcul des coefficients numériques et remarquant que $\pi = 3{,}1415$, on trouve la formule

$$\text{Puissance} = 0{,}0011395 \text{ P} l n$$

Dynamomètre de transmission. — Les dynamomètres de transmission s'emploient, comme leur nom l'indique, à mesurer l'effort transmis par un moteur à un récepteur d'énergie, tel qu'une dynamo électrique par exemple.

Pour comprendre le principe de cet appareil, observons ce qui se passe dans la transmission du travail mécanique au moyen de la courroie.

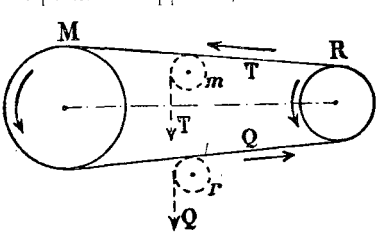


Fig. 3. — Transmission du travail par courroie.

Soit M la poulie du moteur, R celle de la réceptrice (fig. 3). On observe que le brin supérieur T, qui se déplace dans le sens de la poulie conductrice M, est plus tendu que le brin inférieur Q, mené par la poulie réceptrice R. Ainsi, la tension T du brin conducteur est supérieure à la tension Q du brin inférieur.

Tout se passe comme si, la poulie M étant supprimée et les

brins étant coupés dans le voisinage de cette poulie, on enroulait ces brins sur les poulies m et r en suspendant aux extrémités des poids T et Q.

Dans ces conditions, il est évident que la poulie R serait entraînée dans le sens voulu, par une force P égale à la différence des poids T et Q représentant les tensions respectives de chaque brin, soit :

$$P = T - Q$$

Or, le dynamomètre de transmission permet de mesurer directement cette différence de tension qui n'est autre chose que la force motrice appliquée à la poulie R.

Le dynamomètre de Siemens (fig. 4), un des plus employés, se compose d'un cadre rigide qui se prolonge aux extrémités par quatre bras portant chacun un galet. Sur les deux tra-

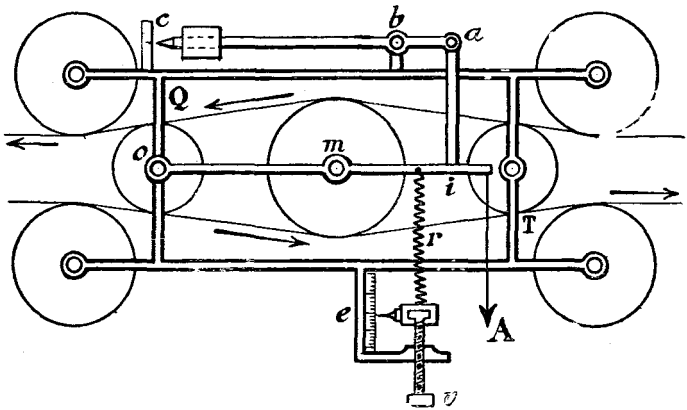


Fig. 4. — Dynamomètre de transmission.

verses du cadre se trouvent deux autres galets plus petits. Un septième galet, de plus grand diamètre, est porté par un balancier $o\,m$ qui oscille autour de l'axe o du petit galet de gauche.

Cet ensemble a pour but de diriger les brins T et Q de la courroie et de les appliquer sur la poulie mobile m. La tension Q du brin supérieur tend à abaisser cette poulie, la tension T de la courroie inférieure tend au contraire à la

relever. Cette poulie obéit donc à l'excès de pression de T sur Q. Le système articulé *o m i a b c* se déforme, et la pointe *c* du levier *c a* mobile autour de l'axe *b*, se déplace par rapport au point de repère correspondant à la position d'équilibre.

Pour ramener le levier dans cette position, on agit sur la vis *v*, de façon à développer sur le ressort *r* qui commande le levier *o m*, une tension supplémentaire égale à l'excès de T sur Q.

Cette tension est mesurée sur une échelle *e*, devant laquelle se déplace un index qui suit les mouvements d'allongement du ressort. La graduation a été faite expérimentalement, en suspendant aux deux brins de la courroie des poids différents, de telle sorte que les divisions correspondent bien aux excès de tension des deux brins.

On connaît ainsi l'effort $P = (T - Q)$ qui entraîne le récepteur, en agissant dans la direction de la courroie. La vitesse de celle-ci ou le chemin parcouru par seconde, s'obtient en multipliant le nombre de tours du récepteur pendant le même temps, par la circonférence moyenne de la jante de la poulie conduite.

Soit n le nombre de tours par minute, $\frac{n}{60}$ le nombre par seconde, r le rayon moyen de la poulie, v la vitesse, on a :

$$v = \frac{2 \pi r n}{60}$$

Et le travail transmis par seconde sera :

$$\text{Puissance} = r \times P$$

Pour éviter les trépidations nuisibles et les chocs, l'extrémité du levier *o m* est reliée par une tige A à un amortisseur constitué par un piston se déplaçant dans un cylindre à air.

Le système comporte un élément d'erreur provenant du glissement relatif de la courroie sur la poulie, de sorte que le travail ainsi calculé ne serait pas exactement celui transmis à la réceptrice, mais ses indications sont suffisantes dans la pratique industrielle.

Problèmes. — *a)* Quelle est la puissance d'une machine ayant produit un travail de 270.000 kilogrammètres en 15 minutes ?

La puissance W étant le travail produit par seconde, et 15 minutes valant 15×60 secondes, on aura :

$$W = \frac{270.000}{15 \times 60} = 300 \text{ kilogrammètres.}$$

Comme 75 kilogrammètres par seconde font un cheval, on obtient finalement en chevaux :

$$W = \frac{300}{75} = 4 \text{ chevaux.}$$

Si la machine avait mis une heure au lieu de 15 minutes pour effectuer le travail, sa puissance aurait été quatre fois moindre, soit d'un cheval seulement.

b) Calculer la puissance d'une machine dont l'arbre fait 100 tours par minute, sachant que le frein de Prony employé, ayant un bras de 1 mètre de longueur, a été équilibré par un poids de 18 kilogrammes et que le poids du bras droit réduit à la distance de 1 mètre est de 2 kilogrammes.

Le poids réduit du bras est le poids qui, placé à son extrémité, produirait le même effort que le poids du bras lui-même ; ce dernier est appliqué au centre de gravité du levier. Le poids réduit peut s'évaluer à l'aide d'une bascule sur laquelle reposerait l'extrémité du bras. On peut encore le calculer, en remarquant que deux poids produisant le même équilibre sur un levier, sont en raison inverse des longueurs des bras de levier de leurs points d'application.

Soit p le poids (fig. 2), q le poids réduit, n et l les bras de levier correspondants, on a :

$$q = p \times \frac{n}{l}$$

Si ce poids n'est pas équilibré, il s'ajoutera au poids P du plateau et la formule applicable sera :

$$\text{Puissance} = 0.001.395\ (P + q)\ l\ n$$

Avec les données du problème, cette formule devient :

$$W = 0.001.395\ (18 + 2) \times 100 = 2,79 \text{ chevaux.}$$

CHAPITRE II

LE COURANT ÉLECTRIQUE

11. **Potentiel électrique.** — Nous avons vu que l'électricité était une source d'énergie. Il faut expliquer maintenant comment se manifeste cette faculté de créer du travail sous toutes les formes connues, énergie calorifique, chimique ou mécanique.

Comme il est naturel de supposer que l'énergie électrique se comporte de la même manière que les autres genres d'énergie, il y a lieu d'examiner tout d'abord ce qui se passe dans le domaine du travail mécanique, qui est, de toutes les formes de l'énergie, celle qui nous est la plus familière ; nous en déduirons par comparaison les circonstances qui accompagnent la production du travail électrique.

Nous emprunterons notre exemple plus spécialement à l'hydraulique. Supposons qu'à l'aide d'une pompe on élève une certaine masse d'eau, puisée dans un bassin inférieur, pour l'emmagasiner dans un réservoir situé à une hauteur déterminée.

Il aura fallu dépenser pour cela un certain travail mécanique, dont la valeur exprimée en kilogrammètres sera égale au produit du chemin vertical, par le nombre de kilogrammes correspondant à la masse d'eau élevée.

Si maintenant on laisse s'écouler l'eau du réservoir au bassin, cette masse reproduira en sens inverse le travail même qui avait été précédemment employé à l'élévation

du liquide. On doit en conclure que ce travail était emmagasiné dans la masse d'eau portée à la hauteur du réservoir.

On voit que, pour une même masse, l'énergie accumulée sera d'autant plus grande que le réservoir sera plus élevé, et cette énergie, qui existe à l'état latent dans le liquide emmagasiné, mais qui peut devenir apparente et efficace à un moment donné, lorsqu'on ouvre le robinet de chute, a reçu le nom d'*énergie potentielle*.

Nous nous représenterons de même l'électricité comme constituée par des masses, non pas liquides, mais d'une essence particulière, qui, par suite de la situation qu'elles occupent dans un milieu soumis à l'influence de forces de même nature, c'est-à-dire électriques, se trouvent pourvues d'énergie potentielle ; ce qu'on exprime d'ailleurs en disant que ces masses sont portées à un certain *potentiel*, comme l'eau élevée à une certaine hauteur.

Le potentiel des masses électriques ou leur énergie potentielle pourra se dépenser sous diverses formes, mécanique, chimique ou calorifique, si ces masses peuvent s'écouler en tombant de la position élevée qu'elles occupaient à un niveau électrique inférieur. Pour cela, il suffit d'offrir à l'électricité une canalisation conductrice, c'est-à-dire un chemin qui n'oppose pas d'obstacle insurmontable au déplacement des masses agissantes.

Dans ces conditions il se produit ce que l'on appelle *un courant électrique*.

Celui-ci se révèle par les phénomènes de tous ordres qui apparaissent soit au sein même, soit dans le voisinage du conducteur, et qui ne sont que les manifestations diverses de l'énergie sous toutes ses formes.

On peut encore comparer utilement le potentiel électrique à la *température* dans le domaine du calorique. Quand on fournit de la chaleur à un corps quelconque et notamment à un corps bon conducteur, sa température s'élève, et l'on constate que les masses caloriques ou *calories* se transportent, comme un véritable courant de chaleur, du point où la température est la plus haute, vers

l'extremité du corps la plus froide. Ainsi l'on peut dire que la température, en calorique, est l'équivalent du potentiel gravifique dû à l'attraction terrestre, ou du potentiel électrique déterminé par les actions mutuelles des masses électriques.

En résumé, les agents électriques, comme les corps pesants ou les masses calorifiques, peuvent être amenés dans des situations pour lesquelles ils se trouvent doués de quantités d'énergie plus ou moins grandes. Ce sont ces situations avec l'énergie qui s'y rattache, qui constituent leur potentiel.

Ces masses électriques tendent à restituer l'énergie potentielle qui leur a été fournie et qu'elles ont emmagasinée pour occuper la situation actuelle ; elles perdent donc leur énergie en produisant du travail, et leur potentiel tombe de la valeur primitive à une valeur inférieure, qui peut même descendre au-dessous d'un potentiel déterminé, pris comme terme de comparaison.

12. **Potentiel du sol.** — Si l'on place une petite sphère métallique en contact avec une autre sphère de masse beaucoup plus grande et dont la température est différente, les deux corps se mettront rapidement en équilibre de température et la petite sphère prendra la température de la grande, sans que cette dernière ait sensiblement changé.

Il en est de même des corps conducteurs au point de vue électrique, et en particulier du globe terrestre, qui peut être considéré comme un corps conducteur d'une masse relativement infinie. Ainsi, tout autre conducteur qui sera mal isolé du sol ou relié plutôt d'une façon intime avec la terre, prendra la température électrique, c'est-à-dire le potentiel de la terre dans la région considérée.

On est convenu d'adopter ce potentiel du sol comme origine de l'échelle des potentiels, de même que l'on prend pour le zéro du thermomètre la température de la glace fondante.

On dira donc, quelle que soit d'ailleurs la valeur abso-

lue de ce potentiel du sol, qui peut varier d'une région à l'autre, qu'un conducteur quelconque est au potentiel zéro, quand son potentiel sera égal à celui de la terre ou lorsque, mis en communication conductrice avec le sol, son potentiel n'en sera pas modifié.

13. **Tension. Différence de tension. Différence de potentiel.** — Considérons encore l'énergie emmaganisée dans une masse d'eau élevée à une hauteur déterminée au-dessus du sol, et soit, pour fixer les idées, 100 litres à 10 mètres de hauteur. L'énergie potentielle ainsi emmagasinée sera en totalité de :

$$100 \times 10 = 1000 \text{ kilogrammètres.}$$

à raison de 10 kilogrammètres par unité de masse ou par litre.

Imaginons maintenant que le réservoir contenant le liquide soit pourvu d'un tuyau vertical, fermé à l'extrémité inférieure, de 10 mètres de long et d'une section de 10 centimètres carrés (fig. 5).

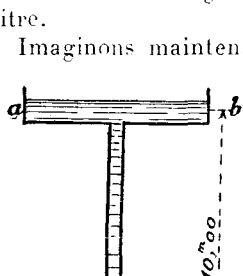


Fig. 5. — Pression hydraulique.

Dans ces conditions, le poids du liquide par mètre courant de tuyau sera exactement d'un kilogramme, de sorte que la colonne de 10 mètres de hauteur exercera une pression totale de 10 kilogrammes sur le fond du tuyau.

Ainsi, la pression produite à la base d'une conduite, en communication avec un réservoir d'eau placé à une altitude supérieure, est exprimée par le même nombre que le potentiel de la masse unité contenue dans le réservoir.

Si, maintenant, on ouvre le tube à son extrémité inférieure, l'eau s'écoulera en vertu de la pression qui s'exerce au point c, et une turbine placée en ce point recueillera un travail de 10 kilogrammètres par litre d'eau débité.

On voit donc que, dans les conditions, d'ailleurs particulières, où nous sommes placés, on peut, sinon confondre, du moins prendre l'un pour l'autre, pour ainsi dire, soit le potentiel, soit la pression, soit la hauteur correspondante, ces quantités étant exprimées par le même nombre, et étant, dans tous les cas, proportionnelles.

Si l'on reporte ces considérations dans le domaine de l'électricité, on admettra également que le potentiel électrique correspond à une certaine hauteur d'élévation des masses électriques et à une certaine pression qui, dans ce cas particulier, prend le nom de *tension*.

Voilà pourquoi, dans la technologie électrique, le mot *tension* est pris comme synonyme de potentiel.

Ainsi les masses électriques, portées à un potentiel quelconque, sont considérées comme exerçant une certaine tension, intimement liée à la valeur de ce potentiel et en vertu de laquelle ces masses tendent à s'écouler à travers les conducteurs, en dépensant l'énergie emmagasinée.

Quand l'eau du réservoir considéré précédemment tombe de la hauteur totale et arrive au niveau du sol, elle a dépensé toute l'énergie potentielle correspondant à cette chute et elle ne possède plus que celle qui équivaut à sa nouvelle situation, c'est-à-dire au potentiel du sol, ou au potentiel zéro par définition.

Si l'on supposait que l'eau puisse tomber encore à 10 mètres au-dessous du sol, la masse prendrait alors un potentiel au-dessous de zéro, c'est-à-dire un potentiel négatif, égal et de signe contraire à celui qu'elle possédait primitivement au-dessus.

Il est évident, d'autre part, que le travail entier dépensé dans ces deux chutes successives est la différence entre le potentiel primitif et le potentiel final. Dans l'exemple choisi, cette différence s'obtiendrait en faisant la somme des deux potentiels, indépendamment du signe et serait égale à 20 kilogrammètres par unité de masse ou par litre, comme la différence entre la température de 10 degrés et celle de — 10 degrés est égale à la somme de ces chiffres, soit à 20 degrés.

On peut encore considérer le cas le plus fréquent, où l'eau tomberait dans un réservoir intermédiaire situé à une certaine hauteur au-dessus du sol, à 4 mètres par exemple. La chute de potentiel serait alors de 6 kilogrammètres sur 10, numériquement égale à la différence des hauteurs occupées successivement par la masse d'eau, ou à la différence des tensions, et cette chute ou différence représenterait encore l'énergie dépensée par la masse unité passant de la position supérieure à la position inférieure.

Comme ce qu'il nous importe de connaître c'est le travail ou l'énergie produite par l'électricité en mouvement, on voit que nous serons amenés dans la pratique à ne considérer que des différences de potentiel ou de tension.

On admet même que c'est en vertu de cette différence de potentiel que les masses électriques se mettent en mouvement en produisant du travail, de même qu'une masse d'eau s'écoule, d'un point haut vers un point bas, en vertu de la différence de niveau de ces deux points.

14. **Générateurs ou sources électriques.** — Ce que nous venons de dire nous permet de présumer quel sera le moyen de produire de l'énergie électrique. Il consistera évidemment, en principe, à créer des différences de potentiel entre deux points, comme l'on crée des différences de niveau tout le long d'un canal destiné à fournir de la force motrice.

C'est précisément le rôle des générateurs d'électricité. Considérons une pile hydroélectrique, par exemple ; elle est le siège de réactions chimiques, c'est-à-dire de phénomènes de décomposition et de recombinaison des corps en présence, qui correspondent à des travaux moléculaires très énergiques. Ceux-ci, dans ce milieu favorable, sont susceptibles de se convertir en énergie électrique.

Or, on constate expérimentalement ce fait, que les deux électrodes de la pile, le cuivre et le zinc de l'élément Daniell, par exemple, se trouvent à des états électriques différents. L'extrémité de la lame de cuivre ou *pôle positif* est à un potentiel plus élevé que le *pôle du zinc* dit *négatif*.

Le premier pôle appartient au conducteur le moins attaqué par le liquide excitateur, qui est ici de l'eau acidulée par l'acide sulfurique ; le pôle négatif correspond au zinc, qui est dissout par l'acide et entre en combinaison avec lui.

Le pôle positif joue le rôle du réservoir supérieur en hydraulique ; le zinc, celui du niveau inférieur. Il suffira donc de relier les deux pôles entre eux par un conducteur, pour déterminer la production du courant électrique.

La pile agit comme une machine hydraulique qui établit une pression plus ou moins élevée à l'orifice du tuyau de refoulement et une dépression au clapet d'aspiration ; si l'on réunit ces deux pôles de la pompe par un tuyau à deux branches, ascendante et descendante, il se produira un courant d'eau continu.

De même que cette circulation est due à une force motrice, de même, nous admettrons que le courant électrique est provoqué par une certaine force qui prend naissance au sein de la pile et à laquelle on donne le nom de *force électro-motrice*. C'est donc la force électro-motrice qui est la cause productrice du courant et de l'énergie électrique ; c'est elle qui porte les masses électriques à un potentiel plus ou moins élevé au pôle positif et crée un potentiel inférieur au pôle négatif.

Ainsi que nous l'avons expliqué, l'énergie dépensée ne dépend que de la différence de potentiel aux deux extrémités du courant, c'est donc cette différence de potentiel qui servira de mesure à la force électro-motrice, et dans la pratique on confondra ces deux termes, bien qu'ils désignent des choses différentes : l'une, la différence de potentiel, étant l'effet ; l'autre, la force électro-motrice, étant la cause.

Expériences. — On peut mettre en évidence la température électrique ou potentiel du pôle d'une pile à l'aide d'un appareil très simple, l'électroscope à feuilles d'or. L'instrument (fig. 6) se compose, comme l'on sait, d'une tige isolée dans le bouchon d'une cloche de verre ; cette tige est surmon-

tée extérieurement d'une boule B et porte intérieurement deux feuilles d'or, qui divergent lorsqu'elles sont chargées d'électricité. Si l'on relie respectivement le pôle positif de la pile au bouton B et le pôle négatif à la terre, ce dernier prendra le potentiel zéro de la terre et les lames de l'électroscope le potentiel du pôle correspondant de la pile.

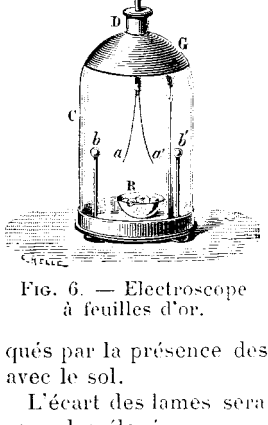


FIG. 6. — Electroscope à feuilles d'or.

On verra alors les feuilles diverger, parce qu'elles se sont chargées de masses électriques positives, au potentiel du pôle et qui se repoussent suivant la loi générale des attractions et répulsions électriques; la divergence est accrue par les phénomènes d'influence provoqués par la présence des colonnes *b* et *b'* en communication avec le sol.

L'écart des lames sera d'autant plus grand que le potentiel sera plus élevé.

Comme, d'ailleurs, dans les conditions de l'expérience, le pôle zinc est au potentiel zéro, le potentiel du pôle cuivre représentera la différence même de tension des deux pôles, et, par suite, la force électro-motrice de la pile. Ainsi les écarts des lames seront proportionnels aux forces électromotrices.

Si au lieu de mettre à la terre la pile ou plutôt une batterie de piles par l'une de ses extrémités, on reliait au sol un point intermédiaire de la batterie, la différence de potentiel entre les deux extrémités ne changerait pas, *car cette différence de potentiel ne dépend que de la nature des réactions chimiques plus ou moins énergiques qui se produisent au sein de la pile et nullement des circonstances extérieures*

Mais si la différence est constante, les potentiels individuels des pôles varient de part et d'autre du point relié à la terre, l'un en dessus étant positif, l'autre en dessous négatif.

Ainsi, en mettant au sol le milieu de la batterie, les extrémités seront à des potentiels égaux et contraires, chacun d'eux ayant comme valeur absolue la moitié de la différence de potentiel des deux pôles.

D'autre part, l'électroscope accusera maintenant le potentiel

propre du pôle, et non plus la différence de potentiel, l'écart sera donc réduit de moitié.

Remarquons que dans ces expériences le circuit de la pile est resté *ouvert et non fermé;* c'est-à-dire qu'en aucun moment nous n'avons relié le pôle positif au pôle négatif par un pont conducteur. On n'a pas fait autre chose que d'allonger l'électrode positive en la terminant par les feuilles d'or; les masses électriques se sont simplement portées jusqu'à ces feuilles pour les charger et, au moment où leur écart a atteint toute son amplitude, il n'y avait plus aucun mouvement d'électricité, aucun courant.

Tout se passe comme lorsqu'on branche un manomètre sur une chaudière, dès que la vapeur a pénétré dans l'appareil, l'aiguille se déplace indiquant la pression, sans qu'il y ait une circulation appréciable de vapeur. L'électroscope est donc bien sensible à la tension électrique et mesure la grandeur du potentiel, non l'intensité d'un courant.

L'électroscope est un appareil de laboratoire, nous décrirons ailleurs les instruments employés dans l'industrie pour mesurer les tensions, forces électro-motrices et différences de potentiel.

15. Mesure du potentiel. — Volt. — Pour évaluer la grandeur des potentiels ou tensions électriques, on les compare à une quantité de même nature, c'est-à-dire à un potentiel déterminé pris pour unité.

Ce potentiel, auquel on donne le nom de *volt*, est celui de l'unité de masse électrique capable de produire le travail unité.

Ce dernier n'est pas, comme en mécanique, le kilogrammètre, mais il diffère très peu du dixième de l'unité mécanique.

On pourrait donc définir le volt comme étant la hauteur à laquelle il faut élever l'unité de masse électrique pour lui communiquer une énergie équivalente à 0,102 de kilogrammètre environ.

Le volt est l'unité pratique, nous verrons plus loin que l'on emploie encore une autre unité dont la grandeur est beaucoup plus petite et qui fait partie d'un système général d'unités électriques et magnétiques.

De même que l'unité de longueur, le mètre, est représentée par une barre métallique ou autre d'une longueur déterminée, de même l'unité de tension, le volt, est représentée par la tension ou la force électro-motrice des piles étalons.

La pile, dont la force électro-motrice est la plus voisine du volt, est la pile de Volta.

L'élément *Daniell* composé d'une électrode de cuivre dans une solution de sulfate de cuivre et d'une lame de zinc dans une solution de sulfate de zinc, a une force électro motrice de 1,1 volt environ.

L'étalon le plus employé est l'élément *Latimer Clark*, formé de zinc, sulfate de zinc, sulfate de mercure pâteux et mercure ; sa force électro-motrice est de 1,433 volts à 17 degrés centigrades. L'élément *Gouy* n'en diffère essentiellement que par la substitution du bioxyde de mercure au sulfate ; sa force électro-motrice est de 1,390 volt à 12 degrés.

Les tensions que l'on utilise en pratique dépendent des usages auxquels on destine le courant électrique. Voici quelques données à cet égard :

Sonneries électriques. .	4 à 8 volts
Téléphonie	8 à 12 —
Télégraphie	15 à 50 —
Éclairage électrique. 32,	110 à 240 —
Transmission électrique de l'énergie	600 à 2000 et au-dessus.

16. Inconvénients et dangers des hautes tensions. — Les hautes tensions, de 600 à 2000 volts, et surtout au delà de cette valeur, présentent de sérieux dangers et de grandes difficultés au point de vue pratique.

L'électricité pourvue d'un haut potentiel est difficilement maintenue dans les enveloppes isolantes et tend à se répandre en dehors du circuit métallique. Une partie de l'énergie est ainsi dissipée, et perdue pour l'utilisation.

D'autre part, toute fuite d'électricité à travers les gaines isolantes ne peut qu'amener la destruction rapide de cette

enveloppe, soit par les phénomènes chimiques connus sous le nom d'*électrolyse*, soit par les phénomènes calorifiques qui se manifestent au passage du courant, surtout aux points où l'isolant est détérioré ou insuffisant.

Il faut donc prendre des précautions toutes spéciales pour l'*isolement* des conducteurs à haute tension, soit en ce qui concerne le choix et l'épaisseur des corps *isolants* ou *diélectriques* qui enveloppent les conducteurs souterrains, soit qu'il s'agisse de conducteurs aériens, qui doivent être isolés de la terre par des supports en verre ou en porcelaine, particulièrement perfectionnés.

Ces précautions sont nécessaires, non seulement en vue de la conservation du matériel, mais aussi pour ce qui concerne la sécurité des personnes. Il faut être très prudent dans le voisinage des conducteurs à haute tension, et éviter de se mettre directement en contact avec eux.

A ce point de vue, il y a lieu de tenir compte de la nature des sources d'électricité qui sont en jeu. On peut imaginer un générateur électrique dont les pôles sont toujours de même nature, ou au contraire un générateur dont les pôles deviennent alternativement positif et négatif. Dans ce dernier cas, le courant qui se dirige toujours du potentiel maximum au potentiel minimum changera constamment de sens et donnera lieu à ce qu'on appelle le *courant alternatif*, par opposition au courant à pôles constants désigné sous le nom de *courant continu*.

Soit d'abord un circuit alimenté par un générateur à courant continu. Si un observateur touche un seul pôle, avec la main, le positif par exemple, et s'il est en contact intime avec le sol, il jouera le rôle d'un conducteur, mettant le pôle en communication avec la terre et la pile se déchargera à travers son corps pour se mettre au potentiel zéro. Dans ces conditions, d'un contact unique, le corps ne reçoit qu'un choc instantané qui est, d'ailleurs, insignifiant, vu la faible quantité d'électricité mise en mouvement dans cette égalisation des potentiels.

Il en est de même si l'observateur est isolé du sol, sur un tapis en caoutchouc, par exemple, mais il prend alors

le potentiel du pôle touché et le déplacement d'électricité nécessaire à cet effet est encore plus limité et le choc presque insensible.

Pour que le corps soit traversé par un courant persistant et par suite dangereux, il faut qu'il soit mis en contact avec les deux pôles de la source ou avec deux points du circuit en communication avec ces pôles; en un mot, il faut deux contacts à potentiels différents.

Dans ces conditions, bien que le corps oppose au passage du courant une résistance très grande, il peut être traversé, suivant le trajet le plus direct entre les deux points du corps en contact avec le circuit, par un courant toujours très faible relativement, mais suffisant pour entraîner des troubles graves dans l'organisme et souvent même une issue fatale.

Les effets produits dépendent beaucoup de la nature du sujet et surtout des circonstances dans lesquelles se fait le contact, soit du bout des doigts, soit à pleines mains, soit avec la peau sèche ou humide, tendre ou calleuse.

Si les conducteurs n'étaient pas isolés ou se trouvaient incomplètement isolés, ce qu'il y a toujours lieu de craindre, il pourrait y avoir autant de danger dans le contact unique que dans le contact double. Les pieds de l'observateur n'étant pas isolés du sol, sont en communication électrique avec la partie du circuit mise à la terre par défaut d'isolement accidentel ou par liaison directe, et tout nouveau contact de la main avec un point pourvu d'un potentiel différent de celui du sol constituera, par le fait, un second contact, déterminant un courant entre ces deux points du corps portés à des potentiels différents.

En supprimant le contact des pieds, par l'emploi d'un tapis en caoutchouc, on pourra toucher impunément un point de circuit, mais jamais deux point différents à la fois.

Quand on a affaire à des courants alternatifs, les phénomènes sont différents; les choses se passent dans le cas du contact unique, comme si l'observateur touchait alternativement les pôles positif et négatif d'une source à cou-

rant continu. Il n'y aurait aucun danger pour lui s'il était isolé de la terre.

Mais il n'en serait pas de même s'il était en contact direct avec le sol. En effet, à chaque inversion de courant, le conducteur se décharge et se recharge en sens opposé par l'intermédiaire de la terre, à travers le corps de l'observateur; le courant ainsi transmis peut être mortel si les conducteurs exigent une grande charge pour élever leur potentiel au degré voulu, c'est-à-dire s'ils présentent, comme on dit, une *grande capacité*.

Dans le cas de double contact ou d'isolement insuffisant, l'observateur, même isolé du sol, serait toujours en danger.

Il y a lieu de tenir compte également de l'état de fermeture ou d'ouverture du circuit. Quand le circuit est ouvert, ses deux extrémités sont au potentiel maximum des pôles: si, au contraire, le circuit est fermé, il est évident que le potentiel va en diminuant du pôle positif au pôle négatif, en passant par zéro, comme le potentiel d'une chute d'eau, du point supérieur au point inférieur, en dessous du sol.

Aussi la différence de potentiel et le danger sont d'autant moins grands que les contacts sont plus rapprochés l'un de l'autre ou plus éloignés des pôles, lorsque le circuit est fermé et qu'il est, par suite, traversé par un courant.

Les effets physiologiques des courants continus et alternatifs sont tout différents. Les premiers agissent mécaniquement pour altérer les tissus, les seconds agissent plutôt sur les centres nerveux et déterminent des contractions musculaires et des phénomènes d'asphyxie.

C'est pourquoi l'on recommande de traiter les victimes exactement comme les asphyxiés, en pratiquant la respiration artificielle. Une circulaire du ministère des travaux publics, en date du 19 août 1895, contient des instructions très détaillées, touchant les secours à donner aux personnes foudroyées par suite de contact accidentel avec les conducteurs à courants continus ou alternatifs.

D'un autre côté, le corps humain paraît plus perméable

aux courants alternatifs qu'aux premiers. Il en résulte qu'à voltage égal, dans les deux cas, le corps du sujet serait traversé par un courant double et même décuple, d'après certaines expériences, suivant que le courant serait continu ou alternatif.

Un danger spécial à ce dernier courant tient à la contraction des doigts qu'il détermine sur les conducteurs touchés et qui met le patient dans l'impossibilité de lâcher le conducteur, de son propre mouvement.

On considère comme courants à haute tension, et par ce fait dangereux, les courants continus supérieurs à 400 volts et les courants alternatifs supérieurs à 120 volts.

Les précautions à prendre sont les suivantes :

Éviter avant tout de toucher les conducteurs des deux mains et surtout deux conducteurs de polarité différente.

Éviter également le contact simple, si l'on est appuyé directement sur le sol, sans l'interposition d'un tapis isolant.

Si l'on est obligé de se servir des deux mains à la fois, les couvrir de gants de caoutchouc ou ne toucher les conducteurs que par l'intermédiaire d'outils pourvus de manches isolants.

Le mieux est, dans tous les cas, de supprimer le courant sur les parties du réseau que l'on est appelé à toucher, soit pour installations nouvelles, soit pour réparations. Mais il serait dangereux de couper un circuit à grand débit, pendant qu'il est en connexion avec les générateurs en marche, et le courant devra être interrompu au préalable, à l'usine, pour éviter tout accident dû aux phénomènes secondaires de survoltage qui se produisent dans ces circonstances, comme nous l'expliquerons plus tard.

17. **Quantité d'électricité.** — Lois de Faraday. — Nous ne pouvons concevoir le travail mécanique qu'en tant qu'il s'applique à une masse matérielle ; c'est ainsi que nous nous représentons le travail d'un kilogrammètre comme produit par la masse de 1 litre d'eau s'élevant à 1 mètre de hauteur.

Nous admettrons de même que l'énergie électrique est

accumulée dans des masses capables de produire un travail d'autant plus grand que ces masses, pour un potentiel donné, sont plus considérables ou plus nombreuses.

De là vient la notion de quantité d'électricité, analogue à celle de quantité d'eau.

On définit l'unité de quantité d'eau par son poids et l'on prend pour unité la masse d'eau sur laquelle la terre exerce une attraction de 1 kilogramme et qui est celle contenue dans le volume de 1 litre à la température de 4 degrés centigrades.

De même on définit l'unité de quantité d'électricité par les effets mécaniques, calorifiques ou chimiques d'une grandeur déterminée, que les masses électriques sont susceptibles de produire.

On met notamment à profit les travaux de décomposition chimique ou d'électrolyse produits par le passage de ces masses à travers une dissolution de sels métalliques.

On sait, d'après les lois de Faraday, qu'une quantité donnée d'électricité, *traversant de pareilles dissolutions, décompose toujours des quantités égales d'un même sel et met en liberté des poids des différents métaux proportionnels à leurs équivalents chimiques.*

18. **Mesure des quantités d'électricité.** — Coulomb. — Les quantités d'électricité peuvent donc être tout spécialement caractérisées par la quantité de métal libéré dans un *électrolyte* traversé par le courant.

Par ces considérations, *on a pris pour unité de quantité d'électricité, la quantité qui, traversant une solution de nitrate d'argent, dépose 1.118 milligrammes d'argent;* en vertu de la loi de Faraday, la même quantité d'électricité traversant un électrolyte au sulfate de cuivre déposera 0,3302 milligramme ou fera dégager $0^{mg}0103$ 8 d'hydrogène dans un voltamètre à eau ; ces divers nombres étant les équivalents *électro-chimiques* de ces corps.

La quantité d'électricité ainsi définie et adoptée pour unité, a reçu le nom de *Coulomb*.

Chaque *coulomb* élevé à un certain potentiel électrique sera pourvu d'une quantité d'énergie correspondante, et le

travail total produit dépendra à la fois de la hauteur de chute électrique et de la quantité de coulombs tombant de cette hauteur. Le travail développé s'obtiendra donc en multipliant le nombre de coulombs par le potentiel, comme le travail d'une chute d'eau est donné par le produit des litres et des hauteurs de chute.

19. **Intensité d'un courant.** — Mesure. — Ampère. — La même question qui se présentait au sujet du travail et de la puissance se renouvelle ici à propos des quantités d'électricité. Ce qu'il importe de connaître, ce n'est pas tant le nombre absolu de masses électriques déplacées, que le temps pendant lequel s'est effectué ce déplacement.

Cela revient à dire qu'il y a lieu de considérer les quantités d'électricité qui circulent pendant l'unité de temps dans un conducteur déterminé, c'est ce qui constitue ce qu'on appelle l'*intensité du courant*.

L'intensité est donc, en électricité, l'analogue du débit en hydraulique, lequel désigne la quantité d'eau qui s'écoule par un tuyau, dans l'unité de temps.

On a choisi nécessairement pour unité d'intensité, l'intensité d'un courant qui débite l'unité de quantité d'électricité ou le coulomb par seconde, et on lui a donné le nom d'*Ampère*.

Ainsi un courant de 10 ampères, par exemple, sera un courant capable de débiter 10 coulombs par seconde, comme un robinet du débit de 10 litres donnerait un courant de 10 litres d'eau à la seconde.

L'ampère est donc l'unité d'intensité ou de débit, le coulomb est l'unité de masse ou de quantité électrique.

A côté du coulomb, on emploie encore une autre unité de quantité qui est l'*ampère-heure*. *C'est la quantité d'électricité qu'un courant de l'intensité de 1 ampère peut débiter par heure, ou en 3600 secondes; l'ampère-heure vaut donc 3600 coulombs*.

On voit qu'il y a la même différence ou la même relation entre l'ampère et l'ampère heure, qu'entre le cheval qui est une puissance et le cheval-heure qui est une quantité définie de travail.

20. **Travail d'un courant.** — Mesure. — Joule. — Nous connaissons maintenant les deux éléments du travail d'un courant : le potentiel et la masse électrique.

Nous dirons que 1 coulomb élevé au potentiel de 1 volt possède une certaine énergie que nous prendrons pour unité de travail et à laquelle on donne le nom de *Joule*. Cette énergie potentielle deviendra disponible et produira ledit travail de 1 joule lorsque, le coulomb se déplacant dans un conducteur, perdra son potentiel de 1 volt ou une partie de son potentiel égale à 1 volt, s'il est à un potentiel plus élevé.

Autrement dit, toute quantité égale à 1 coulomb tombant de la hauteur ou du potentiel de 1 volt, produira une énergie de 1 joule, qui se révélera par un travail calorifique, chimique ou mécanique équivalent.

Ce travail s'accomplira nécessairement dans le circuit traversé par le courant et entre les limites de la chute de potentiel, c'est-à-dire entre les deux extrémités du circuit présentant une différence de tension de 1 volt.

Si cette différence est de 2 volts, la chute sera deux fois plus grande et le travail produit sera de 2 joules pour chaque unité d'électricité ou pour chaque coulomb.

Pour une quantité quelconque d'électricité, on obtiendra donc le travail total mesuré en joules, en multipliant le nombre de coulombs par le nombre de volts de leur potentiel.

Ainsi, par exemple, une quantité d'électricité de 100 coulombs, subissant une chute de potentiel de 10 volts, d'une extrémité d'un conducteur à l'autre, développera dans ce trajet un travail de :

$$100 \times 10 = 1000 \text{ joules.}$$

Nous avons déjà dit que l'énergie emmagasinée dans l'unité de masse électrique portée au potentiel de 1 volt, ou le joule, par conséquent, était égale à 1 10 de kilogrammètre environ.

La relation exacte est la suivante :

$$\text{Joule} = \frac{\text{kilogrammètre}}{9.81} = 0^{\text{kgm}}102.$$

Inversement :

$$1 \text{ kilogrammètre} = 9{,}81 \text{ joules.}$$

Nous démontrerons plus loin ces relations, qui donnent l'équivalence mécanique de l'électricité.

Il convient également de déterminer l'équivalence calorifique. Pour comparer les énergies calorifiques et électriques, on se sert d'une unité de chaleur mille fois plus petite que celle employée d'ordinaire et qu'on désigne sous le nom de *petite calorie*.

Par définition : *la petite calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la masse de 1 gramme d'eau.* L'équivalent mécanique de la petite calorie sera donc 0,426 kilogrammètre :

$$1 \text{ calorie} = 0^{kgm}426.$$

On en déduit immédiatement l'équivalence des joules et des calories.

$$\text{Calorie} = 0.426 \times 9.81 = 4.18 \text{ joules,}$$

et inversement,

$$\text{Joule} = \frac{\text{calorie}}{4{,}18} = 0.24 \text{ calorie.}$$

Ainsi l'énergie de 1 joule convertie entièrement en chaleur dans un conducteur, y développerait 1/4 de calorie environ, soit la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1/4 de gramme, soit exactement de $0^{gr}24$ d'eau.

21. **Puissance d'un courant.** — Mesure. — Watt. — *La puissance d'un courant sera, comme la puissance mécanique, le travail par seconde dans le circuit considéré.*

L'unité de puissance s'appelle *Watt;* par définition : *la puissance unité d'un watt comportera le travail de 1 joule par seconde.*

De même :

$$\text{Watt} = 0^{kgm}102 \text{ par seconde.}$$

On emploie également le *kilowatt* qui vaut 1000 watts.

Le cheval-vapeur peut être comparé à la puissance électrique ; on a évidemment :

Cheval-vapeur $= 75^{kgm} \times 9{,}81 = 735.75$ joules par seconde, soit en nombre rond 736 watts, puisque le watt est un joule par seconde :

Cheval-vapeur = 736 watts = 0,736 kilowatt.

Réciproquement :

Kilowatt = 1,36 cheval-vapeur.

Enfin, il y a lieu de noter le *watt-heure* qui vaut 3600 joules et le *kilowatt-heure;* ces deux unités sont des unités de travail et non de puissance.

Problème. — Quelle est la puissance en chevaux-vapeur d'un courant de 7,36 ampères, dépensée dans un conducteur dont la différence de potentiel aux extrémités est de 100 volts, et quelle quantité de chaleur développée par heure dans le conducteur, en supposant que le circuit ne contient aucun récepteur électrolytique ou mécanique et que toute l'énergie électrique est transformée en énergie calorifique ?

Puissance $= 7{,}36 \times 100 = 736$ watts,

soit un cheval-vapeur.

Nous savons, d'autre part, que les 736 watts ou le cheval-vapeur produisent pendant une heure un travail de

$$736 \times 3600 = 2.649.600 \text{ joules.}$$

soit en énergie calorifique :

$2.649.600 \times 0{,}24 = 635.904$ calories (au gramme)
ou 636 calories (au kilogramme).

On peut donc dire qu'une puissance de 736 watts est capable de fournir pendant une heure une quantité de chaleur égale à 636 calories, ou d'élever de 0 à 100 degrés la température de 6,36 litres d'eau; on trouverait 6,34 en calculant sur le chiffre exact 735,75.

Comme vérification, nous nous proposerons de calculer le nombre de litres d'eau qui peut être élevé de 100 degrés par le travail d'un cheval-heure :

Cheval-heure $= 270.000$ kilogrammètres $\times \frac{1}{426} = 634$ calories ou 6,34 litres élevés à 100 degrés;

Résultat semblable au précédent.

22. **Résistance des circuits conducteurs.** — Pour que l'électricité tombe d'un certain potentiel à un potentiel inférieur, en produisant du travail, il faut offrir aux masses électriques une canalisation conductrice, c'est-à-dire un milieu favorable à leur mouvement et, par suite, à la production du courant.

Pour constituer ces circuits, on pourrait, théoriquement du moins, employer tous les corps de la nature, car il n'en est aucun qui soit absolument réfractaire au passage de l'électricité ou comme on dit parfaitement *isolant*.

Mais, en pratique, comme les corps de diverses natures diffèrent considérablement l'un de l'autre à ce point de vue, on les divise en deux catégories, soit en *bons* et en *mauvais conducteurs*.

Les bons conducteurs les plus usuels, par ordre de *conductibilité* décroissante, sont :

Argent, cuivre, or, zinc, platine, fer, étain, plomb, maillechort (alliage cuivre, zinc, nickel), mercure.

Les mauvais conducteurs, qui sont dits également *isolants* ou *diélectriques* sont, par ordre croissant de propriétés isolantes :

Laine, soie, verre, soufre, résine, gutta-percha, caoutchouc, gomme laque, paraffine, ébonite, air sec.

Entre ces deux catégories extrêmes, il y a des corps doués de propriétés conductrices moyennes, que l'on appelle *semi-conducteurs*, tels que les suivants placés par ordre de conductibilité décroissante :

Charbon de bois et coke, acides, air raréfié, eau, pierre, glace non fondante, bois sec, porcelaine, papier sec.

Il faut considérer, d'ailleurs, que les bons conducteurs eux-mêmes offrent une certaine résistance au passage de l'électricité. Les choses se passent comme si les masses électriques éprouvaient à leur passage dans les conducteurs un véritable frottement, analogue à celui qui se produit pour l'écoulement de l'eau contre les parois intérieures des conduites.

On sait que, dans ce dernier cas, la charge ou le poten-

tiel de l'eau subit des pertes tout le long de la conduite, par suite du travail absorbé par le frottement.

Or, c'est justement ce qui se produit dans un conducteur électrique dont la tension ou le potentiel va en diminuant d'une extrémité à l'autre, dans le sens du courant.

D'autre part, tout travail de frottement dégage de la chaleur et nous constatons également que le passage du courant à travers la résistance d'un conducteur, élève la température de ce dernier.

De même que pour la circulation des liquides, on a reconnu par l'expérience que la résistance d'un conducteur électrique dépendait de trois éléments, savoir : *la nature du conducteur, sa longueur et sa section.*

Connaissant la valeur de la résistance d'un fil de matière, de longueur et de section déterminées, on en déduira facilement la résistance d'un conducteur de même matière ayant une longueur et une section différentes, car ainsi que pour les conduits d'eau, la résistance sera proportionnelle à la longueur et en raison inverse de la section.

Ces conditions sont exprimées par la formule :

$$R = r \times \frac{l}{s}$$

R est la résistance du circuit cherché,

l sa longueur et s sa section,

r un certain nombre appelé coefficient de résistance.

Dans les applications courantes, *on prend pour valeur du coefficient r la résistance d'un conducteur de 1 mètre de long et de 1 millimètre carré de section.* Il en résulte que, pour calculer la résistance d'un conducteur de dimensions quelconques, il faudra exprimer les longueurs en mètres et les sections en millimètres carrés.

La résistance d'un conducteur varie pour un même corps avec la température, nous verrons tout à l'heure dans quelle proportion.

23. **Mesure de la résistance.** — Ohm. — *La résistance choisie pour unité a été appelée ohm.* La grandeur de cette unité est représentée par la résistance d'une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 106

centimètres de longueur, à la température de la glace fondante.

C'est également la résistance, dans des conditions de température et de qualité de matière déterminées, d'un fil de cuivre recuit de 50 mètres de long et de 1 millimètre de diamètre ou celle d'un fil de fer télégraphique de 100 mètres de longueur et de 4 millimètres de diamètre.

Voici les coefficients de résistance, exprimés en ohms, de divers métaux les plus usuels, aux températures de 0 et de 50 degrés :

Conducteurs	Coefficients de résistance	
	à 0 degré	à 50 degrés
Cuivre	0,016	0,019
Fer	0,096	0,119
Etain	0,131	0,158
Plomb	0,195	0,236
Maillechort	0,208	0,212

Ce tableau montre que les différents corps n'ont pas la même sensibilité, au point de vue de l'influence de la température sur leur résistance. Pour le cuivre, qui est le plus employé dans la pratique industrielle, comme pour la plupart des métaux, on peut dire que chaque degré en plus augmente sa résistance de $0\omega,4$ pour 100 ou de $0\omega,004$ pour 1.

Ainsi un conducteur en cuivre dont la résistance serait de 16 ohms à 0 degré, prendrait une résistance de :

$$16 + 16 \times 0{,}004 = 16{,}064 \text{ ohms}$$

pour un degré d'augmentation de température, et de :

$$16 + 16 \times 0{,}004 \times 50 = 19{,}20 \text{ ohms.}$$

pour 50 degrés.

Problème. — Calculer la résistance d'un conducteur de cuivre de 10 kilomètres de long et de 1,5 centimètre carré de section en adoptant 0.02 pour coefficient de résistance ou *résistivité*.

Il faut exprimer la longueur en mètres, soit 10.000 mètres, et la section en millimètres carrés, soit 150 millimètres carrés, d'où :

$$R = \frac{0{,}02 \times 10.000}{150} = 1{,}33 \text{ ohms.}$$

24. **Loi d'Ohm.** — Nous avons dit que tout courant électrique était déterminé par une différence de tension entre deux points d'un circuit conducteur. D'autre part, le débit de ce courant, ou son intensité, tend à être limité par la résistance du conducteur. Il importe donc de connaître quelle influence peut avoir la différence de tension et la résistance du circuit, sur l'intensité d'un courant, autrement dit, de savoir quelle est la relation qui lie entre elles ces trois quantités : la différence de potentiel, la résistance du conducteur et l'intensité du courant. Tel est le but de la loi d'Ohm.

Elle s'énonce ainsi : *La différence de tension entre les extrémités d'un conducteur est égale au produit de la résistance de celui-ci par l'intensité du courant qui le traverse.*

Cette loi repose sur l'expérience : si nous considérons, en effet (fig. 7), la résistance comprise entre les points A, B d'une fraction de circuit, nous constaterons que pour un courant double passant, par exemple, de A en B, la différence ou chute de potentiel entre ces deux points es double. On peut donc, en généralisant, écrire la formulet

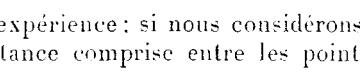


Fig. 7. Loi — d'Ohm.

$$E = R \times I$$

qui signifie que la différence de tension E entre les points A et B est proportionnelle à l'intensité I et à la résistance R du circuit.

Inversement, on peut écrire :

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

Supposons, comme application, que l'on veuille faire circuler un courant de 10 ampères dans une résistance de 5 ohms, il faudra, d'après la loi d'Ohm appliquer aux points A et B une différence de tension qui, d'après la formule, sera :

$$E = 5 \times 10 = 50 \text{ volts.}$$

On peut encore envisager le problème à un autre point de vue et considérer que, dans le cas actuel, les masses électriques correspondant au débit de 10 ampères ont fait une chute électrique de 50 volts ou ont perdu l'énergie et la tension correspondant à cette chute, en passant du point A au point B à travers la résistance du conducteur.

S'il n'y a entre ces points aucun récepteur capable de transformer l'énergie électrique absorbée en travail mécanique ou chimique, cette énergie se transformera intégralement en chaleur, à raison de 0,24 calorie par joule absorbé dans la résistance du conducteur.

Il y aura, d'ailleurs, autant de joules absorbés que de coulombs passant par seconde, pour chaque chute de potentiel de 1 volt, entre les extrémités A et B.

De telle sorte que l'expression générale du travail par seconde sera :

$$W = E \times I$$

E étant la différence de potentiel entre les extrémités du conducteur, I le nombre de coulombs par seconde ou le nombre d'ampères, W le travail par seconde ou le nombre de watts.

25. **Loi de Joule.** — Les expériences de Joule ont démontré cette loi que : *la puissance calorifique développée par le passage d'un courant dans un conducteur est égale au produit de la résistance par le carré de l'intensité :* Elle s'exprime par la formule :

$$W = R \times I^2$$

Il est évident qu'on peut l'écrire ainsi :

$$W = R \times I \times I$$

Sous cette forme on retrouve l'expression ci-dessus de la puissance, puisque $R \times I$ n'est autre chose que E. La loi de Joule est donc la conséquence même du travail électrique absorbé par la résistance du conducteur. Elle signifie que le nombre de watts correspondant est proportionnel au carré de l'intensité du courant. Comme d'ailleurs à chaque watt disparu correspond un dégage-

ment de chaleur de 0,24 calorie, la quantité totale Q de chaleur développée par seconde sera donnée par l'expression :

$$Q = R \times i^2 \times 0{,}24$$

Problème. — Calculer : 1° la chute de tension ou différence de potentiel entre les extrémités d'une résistance de 10 ohms; 2° la puissance absorbée dans cette résistance; 3° la chaleur totale dégagée par seconde, l'intensité du courant étant de 50 ampères :

1° La chute de tension sera :

$$E = R \times I = 10 \times 50 = 500 \text{ volts};$$

2° La puissance absorbée :

$$W = E \times I = 500 \times 50 = 25.000 \text{ watts}.$$

Ou encore :

$$W = R \times I^2 = 10 \times \overline{50}^2 = 25.000 \text{ watts};$$

3° La chaleur dégagée :

$$Q = R \times I^2 \times 0{,}24 = 25.000 \times 0{,}24 = 6000 \text{ calories}.$$

26. **Densité de courant.** — On voit que le passage du courant a pour effet d'échauffer le conducteur, et la température de celui-ci tendrait à s'élever indéfiniment, si les causes de refroidissement ordinaires, chaleur dissipée par rayonnement et conduction aux couches d'air voisines, n'intervenaient pas pour limiter cet échauffement.

Or, le refroidissement dépend directement de la surface extérieure du conducteur, qui est elle-même proportionnelle au diamètre; quant à la chaleur dégagée, on démontre facilement que, pour un courant donné, elle ne dépend que de la densité du courant.

Par définition, *on appelle densité du courant le nombre d'ampères passant par unité de surface de la section transversale d'un conducteur*; on écrira donc :

$$I = D \times S$$

formule qui indique bien que D est la densité du courant pour la section S égale à l'unité choisie, qui, en pratique, est le millimètre carré.

Reprenons maintenant la formule de la puissance :

$$W = R \times I \times I$$

En remplaçant une fois I par sa valeur $D \times S$, on a :

$$W = R \times I \times D \times S$$

Formule qui se réduit a :

$$W = r \times l \times I \times D$$

En tenant compte de ce que $R = \frac{r\,l}{S}$

Ainsi, pour un même courant donné I, la puissance absorbée par la résistance du conducteur sera proportionnelle à la densité du courant D ; il en sera de même de la chaleur dégagée, qui est équivalente à l'énergie électrique dissipée ; c'est ce qu'il fallait démontrer.

Il y a lieu de remarquer, d'autre part que la densité varie en raison inverse de la section S ou du carré du diamètre.

Il en résulte qu'à un diamètre deux fois plus petit, par exemple, correspond une densité quatre fois plus grande, d'où un dégagement de chaleur quatre fois plus considérable pour une surface refroidissante qui sera devenue elle-même deux fois plus petite. Ce qui revient à dire que l'échauffement des conducteurs augmente très rapidement avec la densité du courant.

Si, au contraire, la densité restant constante, on augmentait la section et, par suite, le nombre total d'ampères traversant le conducteur, ce nombre croîtrait comme le carré du diamètre ainsi que la chaleur dégagée, tandis que la surface extérieure de refroidissement ne suivrait que la progression simple du diamètre.

D'où la nécessité de réduire la densité du courant dans les conducteurs de gros calibre, la surface de refroidissement des fils de petit diamètre étant proportionnellement plus grande par rapport à leur section.

De ces considérations ressort l'importance capitale de la densité dans le régime des circuits électriques.

De grandes densités pourront occasionner une élévation de température capable non seulement de détériorer les enveloppes isolantes, mais encore de porter les conduc-

teurs à l'incandescence, en créant des dangers d'incendie et même de fondre et de volatiliser ces conducteurs.

On conçoit par là que la détermination de la densité sera l'élément principal qui servira à calculer la section des fils et des câbles électriques.

Les lois physiques du refroidissement permettent d'évaluer les quantités de chaleur qui se dissipent à chaque instant, et qui dépendent d'ailleurs de l'excès de température du conducteur sur le milieu ambiant. Il est donc facile d'établir une relation d'équilibre entre la chaleur produite par le travail absorbé et celle dissipée par rayonnement et conduction.

D'autre part, les phénomènes sont très complexes, car ils dépendent d'un grand nombre de circonstances accessoires, suivant que les conducteurs sont nus, brillants ou noircis, suspendus dans un air tranquille ou agité, recouverts d'enveloppes isolantes ou logés dans des moulures en bois. Il y a lieu de tenir compte également de l'influence des attaches conductrices, dans le cas de fils courts tendus entre deux plots métalliques.

On conçoit donc qu'une formule établie pour un cas déterminé ne soit pas généralement applicable dans toutes les circonstances.

Voici, à titre d'exemple, une formule relativement simple qui donne le courant que peut supporter un fil de diamètre quelconque pour que son échauffement ne dépasse pas une température de 10 degrés centigrades.

$$I = 4{,}375 \times \sqrt{d^3}$$

Cette formule établie par M. Kennelly s'applique à des fils de cuivre d'une conductibilité déterminée, placés sous moulures en bois, entre les limites de température de 0 degré à 34 degrés.

Soit, par exemple, à calculer l'intensité du courant pour un fil de 2 millimètres de diamètre, alors $d = 2$, et l'on a :

$$I = 4{,}375 \times \sqrt{8} = 4{,}375 \times 2{,}83 = 12{,}38 \text{ ampères.}$$

On trouve dans les aide-mémoire des tableaux présentant

les valeurs de I correspondant aux diamètres les plus usuels : il est facile d'ailleurs de calculer ces tableaux soi-même à l'aide des formules analogues à celles ci-dessus.

La limite d'échauffement de 10 degrés paraît faible au premier abord, mais il convient de remarquer que les installations sont faites en vue de pouvoir supporter accidentellement un courant double au moins du courant normal. Dans ces conditions exceptionnelles mais possibles, l'élévation de température, qui dépend du carré de l'intensité, deviendrait environ quatre fois plus grande ou égale à 40 degrés, comme il résulte de l'expérience, dans le cas considéré.

En admettant même que ces accroissements accidentels d'intensité ne se produisent pas, il est bon de ne pas exposer les conducteurs isolés à des températures supérieures à 60 et 80 degrés au maximum, de crainte de détériorer les enveloppes isolantes, surtout quand il s'agit de couches de caoutchouc.

Pour l'élévation limite de température de 45 degrés, qui correspondrait à la température totale de 70 degrés, en admettant une température de 25 degrés pour le milieu ambiant, la formule applicable, dans les conditions ci-dessus spécifiées, deviendrait :

$$I = 7{,}904 \times \sqrt{d^3}$$

Avec le diamètre de 2 millimètres choisi dans l'exemple précédent, on aurait :

$$I = 7{,}904 \times 2{,}83 = 22{,}38 \text{ ampères.}$$

On trouve également dans les aide-mémoire des tableaux relatifs aux fils nus, aériens, soit dans un air tranquille, soit dans un air en mouvement.

A titre d'exemple, un fil aérien de 4 millimètres, brillant, suspendu dans un air tranquille, exigerait pour s'échauffer de 10 degrés, un courant de 47 ampères ; dans l'air en mouvement, le courant devrait s'élever à 71 ampères pour le même accroissement de température. Ces chiffres empruntés aux expériences de M. Kennelly ne seraient rigoureusement applicables que dans les circonstances identiques à celles des essais, mais ils donnent des indications suffisantes pour les cas ordinaires de la pratique.

Les métaux moins conducteurs que le cuivre s'échauffent davantage pour un même courant, ou comportent un courant moins intense pour le même accroissement de température.

Ainsi, par exemple, le fil de 4 millimètres de diamètre, pour un échauffement de 100 degrés, exigera 40 ampères s'il est en fer et 130 s'il est en cuivre.

27. **Densités admises dans la pratique.** — Ainsi que nous l'avons vu, l'échauffement des conducteurs dépend directement de la densité du courant.

En général, on ne dépassera pas l'élévation de température normale en adoptant les chiffres suivants :

5 à 6 ampères par millimètre carré pour les fils nus;

2 à 4 ampères pour les fils isolés de petite section;

1,5 à 1 ampère pour les câbles à grand isolement ou sous plomb.

1 à 0,5 ampère pour les câbles dont la section est supérieure à 200 millimètres carrés.

Pour les installations intérieures, on admet 3 ampères par millimètre carré dans les fils secondaires au-dessous de 10 millimètres carrés de section et 2 ampères dans les conducteurs de section supérieure.

28. **Fusion des conducteurs.** — Outre l'échauffement anormal des conducteurs, il faut considérer le cas extrême où la température peut s'élever jusqu'à atteindre le point de fusion du métal.

Le courant nécessaire pour fondre un conducteur dépend de sa nature et de son diamètre. Les points de fusion des divers métaux sont en effet très différents, en voici quelques-uns :

Platine. .	1775 degrés.	Cuivre. .	1050 degrés.
Fer. . .	1500 —	Zinc . .	415 —
Fonte . .	1170 —	Plomb. .	330 —

On peut, au moyen des formules analogues aux précédentes, calculer l'intensité de courant capable de faire fondre des fils de diverses natures et de diamètres quelconques.

La formule applicable pour le cuivre, dans le cas d'un fil de longueur de 30 millimètres au minimum, placé dans un air calme, est la suivante :

$$I = 80 \times \sqrt{d^3}$$

Pour un fil de 2 millimètres de diamètre, on aurait :

$$I = 80 \times 2{,}83 = 226{,}40 \text{ ampères.}$$

Le facteur numérique de la formule devrait être remplacé par les coefficients suivants correspondant aux autres métaux, s'il ne s'agit pas du cuivre :

Platine	40,4	Etain	12
Maillechort	40,8	Alliage (2 pl., 1 étain) .	10,3
Fer	24,6	Plomb	10

Pour un fil de même diamètre en alliage, plomb, étain, on aurait donc :

$$I = 10.3 \times 2{,}83 = 29.15 \text{ ampères.}$$

29. **Coupe-circuits.** — On utilise cette propriété des courants sous une grande densité, de fondre les métaux, pour produire la soudure autogène du fer, en portant à la température voisine de la fusion les extrémités des pièces à souder, soumises à l'action calorifique de courants intenses.

Cette propriété est principalement mise à profit, pour obvier aux accroissements accidentels des courants dans les circuits et mettre les conducteurs à l'abri des élévations anormales de température.

On emploie à cet effet des fils fusibles dits *coupe-circuits de sûreté*. Ils consistent en un fil de plomb, d'étain ou d'alliage de ces métaux, intercalé dans le circuit d'utilisation des courants, au moyen de deux bornes métalliques.

Il convient de n'employer que des appareils *bi-polaires*, c'est-à-dire comportant un fil fusible sur chaque pôle. Les supports doivent être en matière incombustible, en porcelaine de préférence.

Il ne faut pas oublier que le point de fusion du fil employé varie suivant la longueur du fil, la nature et la surface des attaches. Dès que la distance entre les bornes descend au-dessous de 2 centimètres, le courant de fusion augmente considérablement par suite du refroidissement par les supports.

On doit vérifier avec soin l'état des attaches, car un contact insuffisant offre une grande résistance, qui déve-

loppe dans cette région une haute température pouvant amener la fusion intempestive du coupe-circuit.

En général, on calcule les diamètres des fils fusibles, de manière à ce qu'ils fondent pour un courant triple de l'intensité normale; il est préférable de les calculer pour l'intensité double seulement.

Les formules établies plus haut permettront ces calculs; mais néanmoins, on détermine souvent la section du fil par la considération du nombre d'ampères par millimètre carré, ou de la densité correspondant à la fusion.

On admet alors que la fusion se produit à la densité de 12 ampères pour le plomb et de 15 pour l'étain, avec des fils de diamètre supérieur à 1 millimètre; mais cette méthode ne permet qu'une approximation grossière, et il est préférable de recourir aux formules ou aux tableaux d'expérience.

30. **Courts-circuits.** — Les accroissements accidentels de courant pouvant occasionner la détérioration du matériel et des incendies au contact des matières combustibles, sont dus le plus généralement à la formation de *courts-circuits*.

On dit qu'il existe un court-circuit entre deux points, *lorsque ces points, étant à une différence de potentiel notable, sont réunis par un conducteur de résistance négligeable.* C'est ce qui arrive quand on relie par une barre métallique grosse et courte, soit les pôles d'un générateur électrique, soit deux points d'un circuit en communication directe avec ces pôles.

Dans ces circonstances, théoriquement du moins, le courant prendra une intensité qui tendrait vers une valeur infinie; mais en général, cette intensité est limitée, soit par l'accroissement de résistance des circuits avec l'élévation de température, soit par les propriétés spéciales du générateur.

Quoi qu'il en soit, le courant peut atteindre une très grande intensité qui volatilise les conducteurs, avec déflagration, accompagnée de projection de métaux en fusion, surtout s'il s'agit de cuivre ou de fer.

Outre les courts-circuits directs que l'on produit volontairement ou par inadvertance, plusieurs causes peuvent déterminer le même effet.

Soit (fig. 8) une source d'électricité B et deux conducteurs P*d* et N*c*, de résistance négligeable, partant de chacun des pôles. Si l'on réunit ces deux conducteurs, par une lampe telle que L qui présente toujours une résistance notable, le courant s'établira dans des conditions normales et suivant une intensité limitée par cette résistance même, conformément à la loi d'Ohm :

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

Si nous remplaçons la lampe entre les mêmes points par un conducteur *m*, de résistance pratiquement nulle, il n'y aura plus d'obstacle appréciable au passage du courant et celui-ci prendra une intensité énorme ; nous aurons créé un court-circuit.

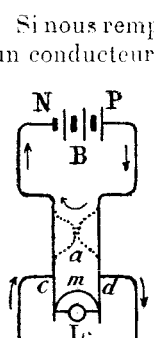


Fig. 8. — Courts-circuits et terres.

Le même résultat s'obtiendra si, par suite d'une mauvaise disposition des conducteurs et de détérioration des enveloppes isolantes, les âmes métalliques venaient au contact, en un point *a* par exemple. Le circuit se trouvant fermé au point *a*, sans interposition de résistance notable, l'intensité croîtrait hors de toute proportion dans la boucle comprenant le générateur, tandis qu'il ne passerait aucun courant dans la seconde partie supposée fermée par la lampe.

Supposons encore que, par suite d'un défaut d'isolement, de dégradation de l'enveloppe ou d'humidité des parois en contact, le câble P*d* soit en communication avec le sol par le point *d* ou toute autre partie de son parcours. Si le second câble est parfaitement isolé, la communication *d* ou *la terre d*, comme on dit, n'aura d'autre effet que de mettre le pôle P au potentiel de la terre, c'est-à-dire à

zéro, mais la différence de tension des deux câbles sera toujours la même. Dans ces conditions, si un point quelconque du second conducteur est insuffisamment isolé ou présente une terre directe, en *c*, par exemple, le courant peut passer de *d* en *c*, par l'intermédiaire du sol, qui joue alors le rôle d'un conducteur à section quasi infinie, celle de la terre, sans résistance notable : il se produit donc encore un court-circuit dans toute la partie du conducteur située au delà des points *c*, *d*, du côté du générateur.

On voit, par ces explications, que *les coupe-circuits de sûreté, destinés principalement à parer aux inconvénients des courts-circuits, doivent être placés à l'origine des conducteurs, sur les points les plus rapprochés du générateur* et, dans tous les cas, dans une position intermédiaire entre le générateur et les points où peuvent se produire les courts-circuits.

Comme il faut que les fils fusibles aient des sections proportionnées aux courants dans chaque conducteur, les coupe-circuits qui conviennent aux câbles principaux ne sauraient protéger efficacement les fils de dérivation secondaires; on est donc amené à placer des coupe-circuits bipolaires à l'origine de chaque dérivation où les conducteurs changent de diamètre.

Soit (fig. 9) un circuit principal de 20 ampères, sur lequel sont branchés divers circuits dérivés de 2 ampères, dont 3 sont représentés sur le dessin, l'un partant des points *a* et *b*, les autres des deux points communs *c* et *d*. On placera à l'origine des tronçons principaux deux fils fusibles qui devront fondre au courant double de l'intensité normale, soit à 40 ampères ; mais un pareil courant passant dans les dérivations à fils fins pourrait détériorer ces fils, aussi doit-on protéger ces derniers par des coupe-circuits fondant dès que le courant atteint 4 ampères. Les appareils de sûreté devront être disposés suivant le dessin ci-contre.

Le même dessin met en évidence la nécessité de placer deux fils fusibles par circuit, soit un sur chaque pôle. Supposons, en effet, une terre en H sur le câble négatif du

circuit principal et une seconde terre sur l'un des fils positifs de dérivation *c*. Il se produira un court-circuit, suivant P *b c*, la terre et H N. Si donc, on n'avait placé de coupe-circuits que sur les fils de dérivation négatif, le fil positif *c* pourrait être brûlé par un courant d'ailleurs insuffisant pour faire fondre le coupe-circuit négatif du câble principal.

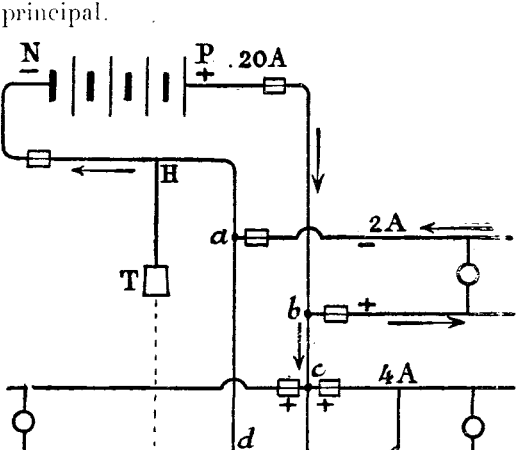


Fig. 9. — Disposition des coupe-circuits fusibles.

On met un générateur en court-circuit ainsi que nous venons de le voir, mais il est absurde de dire, comme on l'énonce généralement, que tel appareil récepteur dépourvu de force électro-motrice est mis en court-circuit. Ainsi la lampe L de la figure 8 étant *shuntée*, suivant l'expression consacrée, par un conducteur *m* serait dite en court-circuit. Mais cette expression est absolument vicieuse, puisque le court-circuit est caractérisé par un accroissement considérable de courant, tandis qu'alors la lampe L n'est traversée par aucun courant appréciable ; c'est au contraire *m*

qui est en court-circuit, tandis que la lampe est mise *hors-circuit*.

31. **Généralisation de la loi d'Ohm.** — Cette loi, qui établit une relation entre la résistance, l'intensité et la différence de tension existant entre les extrémités d'une fraction de circuit simple, s'applique également à un circuit fermé contenant un ou plusieurs générateurs d'électricité.

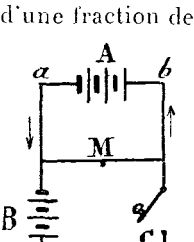


FIG. 10. — Généralisation de la loi d'Ohm.

Considérons d'abord (fig. 10) le circuit fermé *a* A *b* M *a* ; la formule d'Ohm pourra s'appliquer directement au circuit intérieur de la pile *a b*, et aux deux fractions du circuit extérieur *b* M et M *a*.

Le circuit inférieur étant ouvert en C, tout se passe dans le circuit supérieur comme si le premier n'existait pas.

Il est dès lors évident que l'intensité du courant sera la même en tous les points du circuit considéré, car tout ce qui passe au point *b* passera nécessairement au point M, puisqu'il n'y a qu'un tronçon unique.

Nous pourrons donc écrire :

Différence de tension entre *b* et M = Intens. × résist. *b* M
— — — M et *a* = Intens. × résist. M *a*
— — — *a* et *b* = Intens. × résist. *b a*

Nous avons ainsi parcouru un circuit fermé, étant revenu au point de départ *b*.

Si l'on ajoute membre à membre les trois relations ci-dessus, le premier membre de la relation résultante sera la somme de toutes les chutes ou différences de tension qui sont échelonnées tout le long du circuit, de *b* en M, de M en *a* et de *a* en *b*. Or, la somme de ces chutes partielles doit être nécessairement égale à la force électromotrice de la pile, qui est la cause primordiale de ces différences de potentiel et qui représente ainsi la chute totale.

Dans le second membre, nous aurons la même intensité multipliée par la somme des résistances partielles, c'est-à-dire par la résistance totale du circuit, puisque la résistance de tout conducteur est proportionnelle à sa longueur, soit à la somme des résistances de ses parties consécutives.

La somme des relations concernant les diverses sections nous donnera donc :

Somme des chutes de tension = Intensité × somme des résistances ou :

Force électro-motrice = Intensité × résistance totale.

Comme la résistance totale se compose de la résistance intérieure d'une part, de la résistance extérieure d'autre part, on pourra encore écrire :

$$\text{Force électro-motrice} = \text{Intensité} \times (\text{résistance intérieure} + \text{résistance extérieure}).$$

Ou :

$$E = I \times (R_i + R_e).$$

On retrouve donc la loi d'Ohm, dans laquelle la différence de potentiel est remplacée par la chute totale ou force électro-motrice, et la résistance partielle par la résistance totale du circuit fermé.

Supposons maintenant que l'on supprime le conducteur transversal M et que l'on ferme le circuit en C, on démontrerait de même que la loi d'Ohm s'applique encore au grand circuit *b* N *a b* qui contient deux générateurs d'électricité.

Dans ce cas, comme dans le cas général d'un nombre quelconque de générateurs, la somme des forces électro-motrices sera égale à l'intensité multipliée par la résistance totale du circuit. Il est bien entendu, d'ailleurs, que la somme dont il s'agit, s'obtient en retranchant les forces électro-motrices qui sont opposées au courant, de la somme des autres.

La loi d'Ohm, dans toute sa généralité, pourra donc s'exprimer par la formule :

$$\text{Somme des forces électro-motrices} = R \times I$$

Qu'on peut mettre encore sous la forme :

$$I = \frac{\text{Somme de E}}{R}$$

Problème. — Quel sera le courant développé dans un circuit fermé, contenant deux générateurs en opposition, ayant respectivement des forces électro-motrices de 10 et de 15 volts, et des résistances intérieures de 3 et 6 ohms, les conducteurs extérieurs ayant une résistance totale de 9 ohms

Les piles étant en opposition, on a :

$$\text{Somme de E} = 15 - 10 = 5 \text{ volts.}$$

La somme des résistances sera :

$$R = 3 + 6 + 9 = 18 \text{ ohms.}$$

d'où :

$$I = \frac{5}{18} = 0.278 \text{ ampères.}$$

32. **Différence de tension aux bornes d'un générateur.** — Quand le circuit d'un générateur, d'une pile par exemple, est ouvert, la différence de tension aux pôles n'est pas autre chose que la force électro-motrice même du générateur.

Le fait est analogue à ce qui se passe dans le tuyau vertical en communication avec le réservoir (§ 14) ; la pression à la base du tuyau, quand l'eau ne s'écoule pas, a la même valeur que le potentiel du réservoir. Mais si l'eau vient à s'écouler, la pression est réduite de toute la perte de charge correspondant à l'absorption d'énergie due au frottement de l'eau en mouvement, contre les parois du tuyau.

De même, pour l'électricité, la tension aux pôles extérieurs de la pile est réduite de toute la perte d'énergie absorbée par la résistance intérieure de la pile, car le courant circule aussi à l'intérieur du générateur, du pôle négatif au pôle positif.

On désigne généralement (fig. 11) la différence de potentiel aux pôles A et B par la lettre e, et la force électro-motrice par E : soit r la résistance intérieure de la pile, R la

résistance du circuit extérieur. La loi d'Ohm appliquée au circuit total donne :

$$E = R \times I + r \times I$$

La même loi, appliquée seulement au circuit extérieur A M B, qui ne contient aucune source de force électro-motrice, permet d'écrire : Différence de tension entre A et B ou $e = R\,I$, d'où l'on a :

$$E = e + r \times I$$

C'est-à-dire que la force électro-motrice E se dépense d'abord en $r\,I$ correspondant à la perte de tension absorbée par la résistance intérieure r, de sorte qu'il ne reste plus que la différence.

$$E - r \times I = e$$

comme tension entre les bornes extérieures A et B.

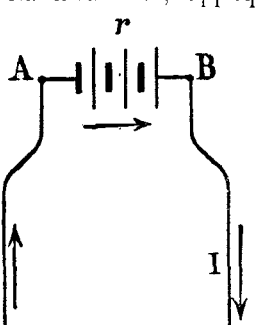


Fig. 11. — Différence de potentiel aux bornes.

On voit en même temps que plus le courant I sera faible et plus e sera voisin de E; à la limite, pour un courant nul, c'est-à-dire à circuit ouvert, e sera égal à E.

33. **Courants dérivés ou bifurqués.** — Lois de Kirchhoff. — La loi d'Ohm concerne les circuits à conducteur unique les lois de Kirchhoff permettent de déterminer les éléments du courant dans les diverses branches d'un réseau complexe de conducteurs.

La première de ces lois concerne le point de croisement de plusieurs courants en nombre quelconque : elle s'énonce ainsi :

En un point de croisement de plusieurs conducteurs, la somme des courants qui convergent vers ce point, est égale à la somme des courants qui s'en éloignent.

Ainsi dans le réseau ci-contre (fig. 12), la somme des courants 1, 3, qui s'approchent du point commun B, est

égale à la somme des courants 2, 4, 5, qui s'en éloignent et l'on peut écrire :

$$i_1 + i_3 = i_2 + i_4 + i_5$$

Leur différence est donc égale à 0 :

$$(i_1 + i_3) - (i_2 + i_4 + i_5) = 0$$

La seconde loi concerne un circuit complètement fermé, qui, en outre, peut comprendre, sur une ou plusieurs branches, des générateurs de force électro-motrice. Cette loi se formule comme suit :

Dans un circuit fermé, la somme des produits de la résistance de chaque branche par l'intensité du courant correspondant, est égale à la somme des forces électro-motrices des sources insérées dans ce circuit.

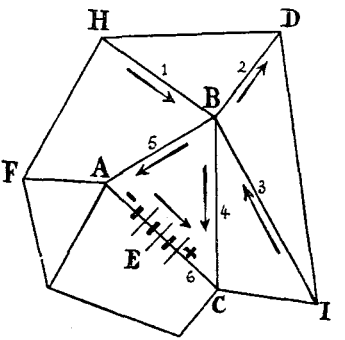


FIG. 12. — Lois de Kirchhoff.

Pour appliquer cette règle, au circuit BACB par exemple, on parcourra ce circuit dans un sens quelconque, soit dans l'ordre des lettres ci-dessus, on affectera du signe (+) les courants se dirigeant dans le sens adopté et du signe (—) ceux allant en sens inverse ; on fera de même pour les forces électro-motrices en considérant leur sens, qui pourra, d'ailleurs, être inverse de celui du courant qui traverse la source.

Dans le circuit considéré, on aura donc, en désignant par r_4, r_6 et r_5 les résistances respectives de chaque branche et par E la force électro-motrice de la source.

$$r_5 i_5 + r_6 i_6 - r_4 i_4 = E$$

Si la force électro-motrice était dirigée en sens inverse, on aurait :

$$r_5 i_5 + r_6 i_6 - r_4 i_4 = (-E)$$

La même règle s'appliquerait pour un nombre quelconque de sources. S'il n'y avait aucune source, la loi serait toujours vraie et la formule deviendrait :

$$r_5 i_5 + r_6 i_6 - r_4 i_4 = 0$$

Dans ce cas, on pourrait dire que la somme des produits positifs, tels que $r_5 i_5$, est égale à la somme des produits négatifs, tels que $r_4 i_4$ et l'on écrira :

$$r_5 i_5 + r_6 i_6 = r_4 i_4$$

Courants dérivés. — Plusieurs conséquences importantes découlent de ces lois :

En premier lieu, considérons un tronçon principal (fig. 13), qui se bifurque en deux conducteurs dérivés AMB, ANB. Le courant principal I se divise en deux courants i_1 et i_2, tels que l'on a, d'après la première loi de Kirchhoff :

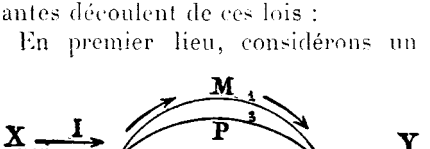


Fig. 13. — Courants dérivés.

$$I = i_1 + i_2$$

D'autre part, dans le circuit fermé AMBNA, la seconde loi de Kirchhoff nous donne :

$$r_1 \times i_1 = r_2 \times i_2$$

Ce qui signifie que si r_1 est deux fois plus grand que r_2, par exemple, i_1 devra être deux fois plus petit que i_2, autrement dit que *le courant se partage entre les deux branches, en raison inverse de leurs résistances.*

La première relation nous montre aussi que *la somme des intensités dans les branches dérivées est égale à l'intensité dans la branche principale.*

Il y a lieu de remarquer que la seconde relation est une conséquence directe de la loi d'Ohm, car, d'après cette loi,

la différence de tension e entre les extrémités du circuit A M B est :

$$e = r_1 i_1$$

De même, la différence de tension aux extrémités du circuit A N B est :

$$e = r_2 i_2$$

Comme d'ailleurs les extrémités de ces circuits se confondent aux points A et B et qu'il ne peut y avoir qu'une seule et même différence de tension entre deux points, on a nécessairement :

$$r_1 i_1 = r_2 i_2$$

Il en serait de même pour toutes les autres dérivations, telles que A P B, A N B, que l'on pourrait intercaler entre les points A et B.

34. **Résistance réduite.** — Il est évident que les diverses dérivations considérées pourraient être remplacées par un conducteur unique, dont la résistance serait égale à la résistance offerte au passage du courant total I par l'ensemble des conducteurs dérivés.

Cette résistance d'un conducteur unique équivalente à l'ensemble des résistances dérivées prend le nom de résistance réduite. Les relations de Kirchhoff permettent d'évaluer cette résistance, mais il est plus simple de la déterminer par la considération des *conductibilités*.

La conductibilité est l'inverse de la résistance; dire qu'un conducteur de 4 ohms a une résistance quatre fois plus grande que le conducteur d'un ohm, c'est dire que sa conductibilité est quatre fois plus petite ou égale à $\frac{1}{4}$.

On peut remarquer que lorsqu'on ajoute un conducteur en dérivation, sa résistance, loin de s'ajouter à l'ensemble du système, vient modifier celle-ci de manière à la réduire, puisque l'on offre ainsi un nouveau canal d'écoulement à l'électricité. C'est donc plutôt la conductibilité qui est en cause et il est à peu près évident que les conductibilités des diverses dérivations s'ajoutent pour augmenter la conductibilité de l'ensemble. Ce fait est d'ailleurs démontré rigoureusement par l'expérience et par les lois de Kirchhoff.

Supposons d'après cela, que les quatre branches dérivées considérées plus haut, aient respectivement des résistances de 1, 2, 3 et 4 ohms, c'est-à-dire des conductibilités de $\frac{1}{1}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{4}$, la conductibilité réduite, c'est-à-dire la conductibilité du conducteur unique équivalant à cet ensemble sera :

$$\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} = \frac{25}{12}$$

D'où la résistance réduite, qui est l'inverse, sera :

$$R_r = \frac{12}{25} = 0{,}48 \text{ ohm}$$

Supposons le cas particulier où toutes les dérivations seraient égales à 2 ohms, par exemple; la conductibilité réduite serait :

$$\frac{1}{2} \times 4 = 2$$

et la résistance réduite :

$$R_r = \frac{1}{2} = 0{,}5 \text{ ohm}$$

D'une manière générale, *la résistance réduite d'un nombre quelconque de dérivations égales, aura pour valeur la résistance individuelle de l'une d'elles, divisée par leur nombre.*

Dans tous les cas, *pour trouver la résistance réduite, on fera la somme des conductibilités et l'on en prendra l'inverse.*

35. **Intensité des courants dérivés.** — Il est également utile d'évaluer l'intensité du courant dans chacune des dérivations; on y parvient aisément par les lois de Kirchhoff ou simplement en se servant de la résistance réduite.

Soit R_r la résistance réduite du système considéré plus haut (fig. 13). Tout se passe comme si les diverses dérivations étaient remplacées par un conducteur unique de résistance R_r traversé par la totalité du courant I. La loi d'Ohm appliquée à ce système entre les points A et B donnera :

$$\text{Différence de potentiel entre A et B} = R_r \times I$$

Mais, d'après ce que nous avons dit plus haut, cette différence de tension est aussi égale à chacun des produits, tels que $r_1 i_1$, $r_2 i_2$, etc. On aura donc en particulier pour la branche A N B :

$$r_2 i = R_r I$$

Si r_2 est égal à 2 ohms par exemple et $R_r \times I$ égal à 10, l'expression deviendra :

$$2\, i_2 = 10$$

d'où :

$$i_2 = \frac{10}{2} = 5$$

C'est-à-dire que d'une manière générale, *pour avoir le courant dérivé dans une branche, on divisera par la résistance propre à cette branche, le produit de la résistance réduite, par l'intensité totale du courant principal*, soit :

$$i_2 = \frac{R_r I}{r_2}$$

et de même pour toutes les autres branches.

36. **Schuntage des appareils.** — Dans la pratique, il est souvent utile de détourner une fraction déterminée du courant qui traverserait un circuit dans lequel se trouve un récepteur; pour cela, il suffit d'établir une dérivation entre les deux bornes de l'appareil.

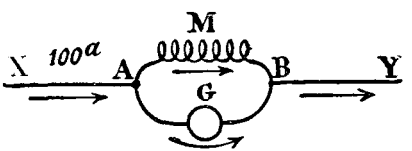


Fig. 14. — Schuntage des appareils.

Soit un courant de 100 ampères (fig. 14), circulant de X à Y; on veut qu'il ne passe qu'un ampère dans l'appareil G, c'est-à-dire le $\frac{1}{100}$ seulement du courant principal.

Il faudra donc détourner les $\frac{99}{100}$ du courant et pour cela intercaler entre A et B une branche M dont la résistance sera le $\frac{1}{99}$ de celle de l'appareil G. En effet, le courant se partageant dans les deux branches en raison inverse de leurs résistances respectives, comme la résistance de M est 99 fois plus petite que celle de G, il passera dans M 99 fois plus de courant que dans G, ce qui se tra-

duira par un courant de 99 ampères dans M et de 1 ampère, soit du $\frac{1}{100}$ du courant total dans G.

Réciproquement, connaissant le courant qui passe dans G, il faudra multiplier ce courant par 100, c'est-à-dire généralement par le dénominateur de la fraction du courant total admise dans le récepteur.

37. **Calcul des conducteurs.** — Le passage du courant dans un circuit est accompagné de deux phénomènes distincts, l'échauffement du conducteur, d'une part, la perte ou chute de tension, d'autre part. A celle-ci correspond d'ailleurs une absorption d'énergie équivalente à l'énergie calorifique qui se développe dans le conducteur.

Ainsi que nous l'avons vu, cette énergie absorbée sous forme de chaleur dépend de la densité du courant; il en est de même de la chute de tension.

En effet, cette chute ou différence de potentiel est donnée par la loi d'Ohm (§ 22).

$$E = R \times I = r \times \frac{l}{S} \times I$$

Et, comme par définition :

$$I = D \times S$$

En faisant la substitution dans la première formule, on a :

$$E = r \times \frac{l}{S} \times D \times S$$

Et, comme S disparaît étant en multiplicateur et en diviseur :

$$E = r \times l \times D$$

Supposons que cette perte de tension soit de 10 volts par exemple, cela voudra dire que chaque unité de masse électrique aura perdu un potentiel de 10 volts, ou l'énergie correspondante à 10 joules. L'énergie totale absorbée par seconde dans le conducteur sera donc égale à autant de fois 10 joules qu'il y a d'unités de masse électrique, c'est-à-dire à l'intensité du courant multipliée par 10.

D'une manière générale, l'énergie perdue par seconde,

pour une chute de potentiel égale à E, sera donnée par la formule

$$W = E \times I$$

ou, comme nous l'avons vu précédemment, par :

$$W = r \times l \times I \times D$$

L'énergie électrique ou l'énergie calorifique correspondante, et la chute ou perte de tension d'un point à l'autre d'un conducteur, dépendent directement de la densité.

Le calcul d'un conducteur revient donc à déterminer la densité du courant, de telle sorte que l'énergie absorbée et la perte de tension ne dépassent pas les limites imposées par les conditions de sécurité et de rendement économique nécessaires, ainsi que par les exigences de la distribution.

Pour bien saisir l'intérêt de cette question, considérons une source d'électricité (fig. 15) présentant une différence de potentiel de 40 volts entre ses pôles P, N. Le courant pour venir de P en *a* perdra 2 volts par exemple et il en perdra autant dans le parcours *b* N.

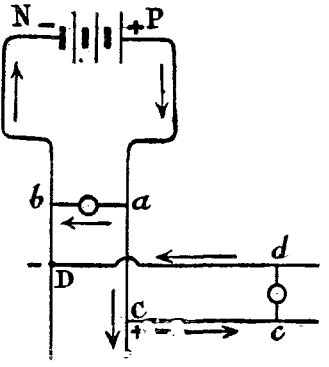


Fig. 15. — Perte de tension sur les conducteurs.

Par conséquent, les potentiels des points *a* et *b* où je suppose placées les bornes d'une lampe seront inférieurs de 4 volts aux potentiels de N et P; donc, la différence de tension en *a* et *b* sera de 36 volts.

Une nouvelle perte se produira entre *a* et *c*, comme entre *d* et *b*, soit une perte de 6 volts, qui réduira à 30 volts la différence de potentiel entre les bornes de la lampe *c d*.

Ainsi les deux lampes seront soumises à des tensions

différentes, la première à 36 volts, la seconde à 30 volts seulement.

Si ces lampes sont semblables et ont chacune une même résistance de 20 ohms, la première sera traversée par un courant.

$$I = \frac{E}{R} = \frac{36}{20} = 1{,}8 \text{ ampère.}$$

la seconde par un courant plus petit :

$$I = \frac{30}{20} = 1{,}5 \text{ ampère.}$$

Si le dernier courant est celui qui convient à la marche régulière de la lampe, et à son intensité lumineuse normale, le premier pourra brûler ou détériorer la lampe qu'il traverse ; si, au contraire, c'est le courant de 1,8 ampère qui correspond au régime normal de ces lampes, la seconde lampe ne pourra développer l'intensité lumineuse voulue.

Cette intensité lumineuse dépend de la température intérieure de la lampe et, par conséquent, de l'énergie qu'elle peut absorber. Or, la première absorbe :

$$W = E \times I = 36 \times 1{,}8 = 64{,}8 \text{ watts}$$

et la seconde, seulement :

$$W = 30 \times 1{,}5 = 45 \text{ wats.}$$

Les quantités correspondantes de chaleur dégagées dans chaque lampe seraient :

$64.8 \times 0.24 = 15{,}55$ calories et $45 \times 0{,}24 = 10.80$ calories.

On voit donc par là, la nécessité de réduire la perte de voltage sur la ligne, entre les divers récepteurs, et l'on s'impose la condition que l'écart de voltage entre le récepteur au potentiel maximum et le récepteur au potentiel minimum ne dépasse pas un taux déterminé, que l'on fixe généralement à 1 volt en plus ou en moins de la moyenne des voltages de toutes les lampes d'une même installation intérieure. C'est ce qu'on appelle la *tolérance de voltage*.

On commencera donc, pour calculer les sections des circuits, par adopter provisoirement les densités pratiques

qui conviennent à la nature des conducteurs mis en œuvre, et à l'importance des courants.

On vérifie ensuite, d'une part, si les conducteurs ainsi calculés ne donnent pas lieu à un écart de tension entre les divers récepteurs, tel qu'il dépasse la tolérance de voltage compatible avec le bon fonctionnement desdits, et si, d'autre part, les courants qui les traversent n'élèvent pas leur température au delà des limites de sécurité convenables.

Ces règles s'appliquent spécialement aux fils de distribution d'une installation intérieure; s'il s'agissait de câbles de transport et de conducteurs d'alimentation extérieure, il y aurait encore à faire intervenir les considérations économiques concernant les frais d'amortissement et le coût de l'énergie absorbée par les conducteurs. Cette question sera traitée ultérieurement.

38. Générateurs d'énergie électrique. — Les générateurs d'énergie électrique sont des appareils destinés à transformer les énergies chimique, calorifique ou mécanique en électricité.

A ces trois modes de transformation correspondent respectivement *les piles hydro-électriques*, *les piles thermo-électriques* et les *machines dynamos*.

Ces dernières constituent les véritables sources d'électricité industrielles: les deux autres, surtout les piles thermo-électriques, n'ont que des applications très restreintes et présentent beaucoup moins d'intérêt au point de vue qui nous occupe.

Nous consacrerons cependant ce chapitre aux piles hydro-électriques, parce que cet appareil constitue la source d'électricité la plus simple, par sa construction et son fonctionnement; qu'elle se prête, par conséquent, mieux et plus facilement que tout autre générateur à l'étude des lois qui président à la mise en œuvre des sources d'énergie électrique.

Une pile en activité est le siège de certains phénomènes qu'il faut connaître.

Si nous considérons, par exemple, une pile de Volta

modifiée (fig. 16), dont chaque élément est composé d'une lame de cuivre C et d'une lame de zinc Z plongées dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, le zinc est attaqué et se combine avec l'acide pour former du sulfate de zinc qui se dissout dans le liquide; en même temps, l'eau est décomposée en deux gaz : l'oxygène et l'hydrogène, et ce dernier se dépose sur la lame de cuivre ou pôle positif sur lequel il s'attache.

Il résulte de ces divers phénomènes, que le courant ou le débit en électricité de la source n'est pas constant; le courant présente, à l'origine de la mise en activité, une grande intensité, puis cette intensité diminue peu à peu et tombe à une valeur très réduite, jusqu'à la fin des réactions chimiques.

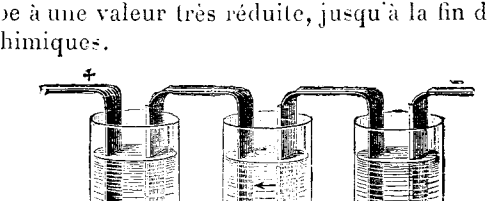


Fig. 16. — Pile de Volta modifiée.

Cet affaiblissement progressif du courant de la pile constitue ce qu'on appelle le phénomène *de la polarisation*. Il est dû à plusieurs causes qui dérivent des circonstances relatées ci-dessus.

Reportons-nous à la formule du débit d'une source d'électricité, de résistance intérieure r, et de force électromotrice E, s'exerçant dans un circuit de résistance extérieure R :

$$I = \frac{E}{R + r}$$

Le débit dépend, par conséquent, de la résistance intérieure; or, cette résistance change à chaque instant, par

suite de la composition variable du liquide, composé d'abord d'eau acidulée qui se sature de plus en plus de sulfate de zinc, par l'effet même du fonctionnement de la pile.

La résistance intérieure est encore augmentée par le fait du dépôt des bulles de gaz hydrogène sur la plaque de cuivre, qui s'oppose, dans une certaine mesure, au passage du courant.

Enfin, cette couche d'hydrogène constitue une masse douée d'affinités chimiques très énergiques, qui tend à se recombiner avec l'oxygène pour former de l'eau, par une réaction inverse de celle qui lui a donné naissance lors de la décomposition de l'eau et qui est susceptible de créer une force *contre-électro-motrice* de sens contraire à celle qui produit le courant.

C'est à cette force électro-motrice antagoniste qu'est dû, à proprement parler, le phénomène de polarisation, ce terme indiquant d'une manière très nette qu'il s'est formé de nouveaux pôles en opposition avec les premiers.

Tout se passe donc, en réalité, comme s'il existait dans le même élément deux forces antagonistes, et la formule précédente devient, en désignant par e la force motrice de polarisation :

$$I = \frac{E - e}{R + r}.$$

Pour faire disparaître cette force électro-motrice parasite, il suffit d'en supprimer la cause, et pour cela d'absorber l'hydrogène dans une combinaison chimique convenable, en le mettant en présence d'un corps, généralement en dissolution, capable de céder de l'oxygène à l'hydrogène, pour former de l'eau.

Les corps employés peuvent être de diverses natures, liquides ou solides, pourvu qu'ils constituent des réservoirs d'oxygène : on leur donne le nom de *dépolarisants*.

Les dépolarisants liquides comme le sulfate de cuivre des piles de Daniell et l'acide nitrique des piles de Bunsen, sont contenus dans un vase poreux avec l'électrode posi-

tive, pour être séparés du liquide excitateur qui attaque le zinc; on a ainsi les *piles à deux liquides*.

Dans d'autres cas, les deux liquides, dépolarisant et excitateur, sont mélangés, comme dans la pile de *Poggendorf*, où le dépolarisant est constitué par une solution de bichromate de potasse.

Enfin, le dépolarisant peut être à l'état solide. C'est le cas de la pile *Leclanché* qui utilise une pâte de bioxyde de manganèse, et de la pile *Lalande et Chaperon* qui emploie le bioxyde de cuivre.

Voici la spécification des piles les plus usitées, classées par catégories au point de vue de la dépolarisation :

Pile sans dépolarisant, *Volta* :	
Eau acidulée sulfurique Néant Cuivre	0v80.
Piles à deux liquides séparés, *Daniell* :	
Eau acidulée sulfurique Sulfate de cuivre Cuivre	1v08.
Piles à deux liquides séparés, *Bunsen* :	
Eau acidulée sulfurique Acide nitrique Charbon	1v90.
Pile à deux liquides séparés, *Latimer Clark* :	
Sulfate de zinc Sulfate mercureux Mercure	1v435.
Pile à liquides mélangés, *Poggendorf* :	
Eau acidulée sulfurique Bichromate de potasse Charbon	2v00.
Piles à dépolarisant solide, *Leclanché* :	
Chlorure d'ammonium Peroxyde de manganèse Charbon	1v48.
Piles à dépolarisant *de Lalande et Chaperon* :	
Potasse caustique Bioxyde de cuivre Cuivre ou fer	0v85.

L'électrode négative ou attaquable par le liquide excitateur est le zinc pour toutes les piles indiquées; les dépolarisants sont de natures très variées, et l'électrode positive est généralement formée de cuivre ou de charbon. Quant aux forces électro-motrices elles varient, suivant la nature des piles, de 0.80 à 2 volts.

Il convient de noter que la force électro-motrice d'une pile ne dépend nullement de ses dimensions, mais uniquement de la nature et de l'énergie des réactions chimiques dont elle est le siège.

Les combinaisons et décompositions des corps à l'intérieur de la pile, sont accompagnées de dégagement et d'absorption de chaleur dont la résultante peut, dans certaines limites, servir de mesure à la partie de l'énergie qui est susceptible de se transformer en énergie électrique.

Si l'on considère que chaque quantité de travail égale à 1 joule correspond à 1 coulomb porté au potentiel de 1 volt, et si l'on admet que toute la chaleur disponible des réactions se transforme en énergie électrique, on pourra déduire de la valeur des calories correspondantes la force électro-motrice de l'élément.

Connaissant, en effet, d'après les *Tables thermochimiques*, les quantités de chaleur qui se dégagent dans les réactions de la chimie, on en déduira les calories afférentes aux combinaisons de chaque équivalent électrochimique mis en œuvre, c'est-à-dire celles correspondant au passage de 1 coulomb à l'intérieur de la pile.

Or, nous avons vu que 1 coulomb dégageait $1^{mg},118$ d'argent, 0,328 de cuivre, 0,00036 d'hydrogène, et que ces chiffres étaient proportionnels aux équivalents chimiques de ces différents corps, c'est-à-dire aux poids en grammes de ces corps, qui peuvent se combiner entre eux ou se séparer de leurs combinaisons.

En réalité, ils représentent à peu près $\frac{1}{96.300}$ du poids en grammes des équivalents chimiques, ce qui revient encore à dire qu'il faudrait 96.000 coulombs, en nombre rond, pour libérer un équivalent chimique des différents corps en présence.

On trouve, par exemple, que les réactions produites dans

la pile Daniell développent 25.300 calories par équivalent d'action chimique, on aura donc pour 1 coulomb 96.000 fois moins ou :

$$\frac{25.300}{96\,000} \text{ calories.}$$

et comme chaque calorie vaut 4,17 joules, cette énergie calorifique correspondra à :

$$25.300 \times \frac{4,17}{96.000} \text{ joules.}$$

soit :

$$25.300 \times 0,000043 = 1,09 \text{ joules.}$$

c'est-à-dire qu'il faudra multiplier dans tous les cas la résultante des quantités de chaleur dégagées et absorbées, correspondant aux poids équivalents, par le facteur 0,000043.

Finalement, puisque cette quantité de travail correspond au passage de 1 coulomb, on en déduit que chaque coulomb est porté au potentiel de 1,09 volt, et que la force électromotrice de la pile a précisément cette valeur.

Toutefois, l'énergie des actions chimiques ne se transforme pas intégralement en énergie électrique, comme nous l'avons admis dans cette théorie, et les résultats du calcul peuvent différer en plus ou en moins de la force électro-motrice réelle. Mais il n'en est pas moins vrai que l'énergie chimique est l'élément prépondérant et que le potentiel est d'autant plus élevé que cette énergie est plus considérable.

39. **Coefficient économique ou rendement des générateurs.** — On ne peut utiliser toute la puissance produite par une source d'énergie quelle qu'elle soit. Une machine à vapeur, par exemple, produit une puissance de 100 chevaux développée à l'intérieur du cylindre par la force expansive de la vapeur, mais une partie seulement de cette puissance sera transmise à l'arbre de couche, où l'on ne pourra recueillir que 80 chevaux pour le travail des outils ou tout autre travail utile.

On n'utilisera donc que 80 pour 100 de l'énergie totale développée par la vapeur, et l'on dira que le rendement est de 80 pour 100, ou le coefficient économique de 0.80; ce qui veut dire aussi que 20 pour 100 du travail total ont été absorbés par les résistances intérieures de la machine

et tous les travaux de frottement des surfaces en contact et des articulations intermédiaires.

Le rendement est donc le rapport entre le travail utilisable et l'énergie totale produite ou dépensée.

Il en est de même pour les générateurs d'électricité, piles ou dynamos. Nous avons déjà vu que dans les piles la force électro-motrice, qui correspond à la hauteur totale du potentiel, se répartit entre deux chutes successives, l'une à l'intérieur de la pile et l'autre, qui reste disponible, à l'extérieur, sur le circuit d'utilisation.

A chacune de ces chutes partielles correspond l'énergie des coulombs qui se déplacent dans la pile et sur le circuit extérieur. Les watts absorbés à l'intérieur ne servent qu'à élever la température de la masse de la pile ; les watts recueillis à l'extérieur peuvent seuls être utilisés, soit dans des lampes, soit dans des moteurs ou pour des opérations d'électrolyse.

La puissance électrique utilisable au dehors s'évalue en faisant le produit de la différence de tension entre les extrémités du circuit extérieur ou les deux pôles de la pile, par l'intensité du courant :

$$W = e \times I$$

Mais la chute de potentiel entre ces deux points est elle-même égale au produit de l'intensité par la résistance du circuit extérieur, soit :

$$e = R \times I$$

d'où :

$$W = R \times I \times I = R \times I^2$$

La puissance absorbée à l'intérieur de la pile aurait la même expression, dans laquelle R serait remplacé par la résistance du circuit intérieur.

Enfin la puissance totale W_t est la somme de ces puissances partielles, et sa valeur s'obtient en multipliant la résistance totale R_t des circuits, extérieur et intérieur, par I^2.

$$W_t = R_t \times I^2$$

Il résulte de cette discussion que *les chutes de potentiel*,

comme les diverses fractions de l'énergie, sont réparties sur le circuit, proportionnellement aux résistances de chacune des parties de ce circuit.

Par suite, si la résistance intérieure est le $\frac{1}{4}$ de la résistance totale, la chute de potentiel intérieure sera le $\frac{1}{4}$ de la chute totale ou de la force électro-motrice, et la chute entre les extrémités du circuit extérieur sera les $\frac{3}{4}$ de cette même force. L'énergie absorbée à l'intérieur de la pile ou celle recueillie sur le circuit extérieur, présenteront les mêmes proportions respectives.

Le rendement ou le rapport des watts utilisables aux watts produits, sera donc égal au rapport des résistances et à celui des chutes de potentiel, du circuit extérieur et du circuit total. On écrira par conséquent :

$$\text{Rendement} = \frac{R}{R_t} = \frac{e}{E}$$

ou encore :

$$\text{Rendement} = \frac{R}{R + r}$$

en désignant par r la résistance intérieure de la pile.

On voit que le rendement sera maximum et, par suite, égal à 1, lorsque r sera nul, puisqu'alors le dividende et le diviseur du rapport seront égaux. Comme d'ailleurs on ne peut pratiquement réaliser un générateur à résistance intérieure nulle, le rendement sera toujours inférieur à l'unité.

Si les résistances R et r sont égales entre elles, chacune sera égale à la $\frac{1}{2}$ de R_t, les chutes de tension et les puissances développées dans chacune de ces résistances seront la moitié de la force électro-motrice et de la puissance totale développées; le rendement sera donc égal à $\frac{1}{2}$ ou 50 pour 100.

Le rendement nous indique l'utilisation de l'énergie produite, mais non la grandeur de l'énergie utilisée. Ces deux éléments peuvent marcher à l'inverse l'un de l'autre, et il arrive justement que le rendement diminue au fur et à mesure que la puissance utilisable devient plus considérable, du moins jusqu'au rendement de 50 pour 100 qui correspond à la puissance extérieure maximum.

Ce fait est facile à démontrer par les formules de la puissance, mais il est à peu près évident, car si nous supposons d'abord le rendement maximum ou égal à 1, c'est que la chute de tension intérieure $r \times I$ est nulle, ce qui ne peut être qu'à condition de supposer I égal à 0; le courant étant nul, il n'y aura aucun travail produit dans le cas du rendement maximum.

Si le rendement diminue, e qui était égal à E diminue également et le travail qui était d'abord nul augmente nécessairement sur le circuit total et en particulier sur le circuit extérieur. Si, d'autre part, e diminuant constamment à partir de la valeur E, devenait égal à 0, le travail extérieur qui a pour expression $e \times I$ deviendrait nul à nouveau et le rendement serait nul.

Ainsi quand e varie de E à 0, le rendement varie d'un maximum à 0 et le travail, parti de 0, augmente en passant nécessairement par un maximum, pour revenir à 0. Il est donc permis d'estimer que le travail extérieur est maximum pour la valeur moyenne de e et du rendement, c'est-à-dire pour $e = \frac{E}{2}$ et pour le rendement de 50 pour 100.

40. **Association ou couplage des générateurs.** — Supposons un élément de pile dont la force motrice soit de 2 volts et la résistance intérieure de $\frac{1}{10}$ d'ohm. Le courant que pourra débiter ce générateur en court circuit, c'est-à-dire sur une résistance extérieure pratiquement nulle, sera, d'après la formule d'Ohm :

$$I = \frac{E}{r} = \frac{2}{0,1} = 20 \text{ ampères.}$$

Dans ce cas le rendement serait nul, toute l'énergie étant absorbée à l'intérieur de la pile.

Si nous voulons utiliser une partie de l'énergie sur une résistance extérieure de 0,9 d'ohm, par exemple, le courant ne sera plus que :

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{2}{0,1 + 0.9} = 2 \text{ ampères.}$$

Le rendement sera alors de 0.9 ou 90 pour 100, et l'énergie utilisée sur le circuit extérieur sera seulement de :

$$W = 0.9\,E \times I = 0,9 \times 2^v \times 2^a = 3.6 \text{ watts.}$$

On voit donc qu'un seul élément de pile ne peut donner qu'une très petite quantité d'énergie ; de là l'utilité de grouper un nombre d'éléments plus ou moins considérable, de manière à recueillir simultanément la somme des énergies produites par tous ces éléments.

A cet effet, on peut adopter trois modes de groupements différents, ayant chacun leurs propriétés spéciales au point de vue électrique.

1° Le couplage en *série* ou *tension ;*

2° Le couplage en *dérivation, quantité* ou *parallèle ;*

3° Le couplage *mixte en tension et quantité.*

Quel que soit le mode d'accouplement, chaque élément se comporte, dans l'ensemble de la batterie, comme s'il était seul.

1° Couplage en tension. — On réunit le pôle positif du premier élément au pôle négatif du second, le pôle positif de celui-ci au négatif du troisième et ainsi de suite, jusqu'au dernier élément (fig. 17).

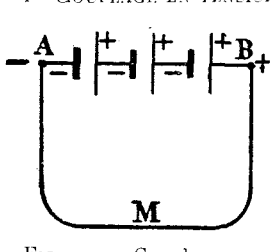


Fig. 17. — Couplage en tension ou série.

Cette liaison étant faite, les éléments extrêmes présentent l'un un pôle négatif libre, l'autre un pôle positif libre. Ces pôles constituent ce qu'on appelle les *pôles de l'ensemble de la pile* ou *de la batterie*, et c'est à ces pôles, tels que A, B, que viennent s'attacher les extrémités du circuit extérieur d'utilisation.

Dans une pareille disposition, l'expérience montre que les forces électro-motrices des divers éléments s'ajoutent et que, par conséquent, la force électro-motrice de la pile est égale à la somme des forces électro-motrices des éléments. Ainsi, en réunissant en série trois éléments Daniell, dont les forces électro-motrices sont d'un volt, on obtient une pile dont la force électro-motrice est de 3 volts.

De même, les résistances s'ajoutent, et, dans le cas considéré, la résistance de la pile serait égale à trois fois celle de chaque élément.

En résumé, *dans le groupement en tension, la force électro-motrice et la résistance intérieure de la pile sont égales à autant de fois la force électro-motrice ou la résistance d'un élément, qu'il y a d'éléments dans la batterie.*

On peut assimiler les piles en tension, à une série de relais de pompes qui élèvent l'eau successivement à des hauteurs croissantes, dans des tuyaux superposés. Dans ces conditions, les potentiels dus à chacune des pompes s'ajoutent ; il en est de même des résistances des fractions successives de la conduite ; enfin, il n'y a qu'une seule circulation d'eau à travers toutes les pompes, de sorte que *le débit reste le même, quel que soit le nombre des pompes en chapelet*.

Si donc on désigne par e la force électro-motrice d'un élément, par n le nombre des éléments, par r la résistance intérieure de l'un d'eux et par R la résistance du circuit extérieur, nous aurons les relations suivantes :

$$\text{Force électro-motrice de la pile } E = e \times n.$$

$$\text{Résistance intérieure } R_i = r \times n.$$

$$\text{Intensité du courant } I = \frac{e \times n}{r \times n + R}.$$

Pour $e = 2$ volts, $n = 20$ éléments, $r = 0.1$ ohm et $R = 10$ ohms, on aurait :

$$I = \frac{2 \times 20}{0,1 \times 20 + 10} = 3,33 \text{ ampères.}$$

2° Couplage en dérivation. — Si, au lieu de réunir

comme précédemment les pôles de noms contraires, on relie ensemble tous les pôles positifs d'une part, tous les pôles négatifs d'autre part, on obtient le groupement en dérivation ou en quantité.

Les points de jonction communs, tels que A et B constituent les pôles de la pile (fig. 18).

Dans ce système, la force électro-motrice de la pile est simplement la force électro-motrice de l'un des éléments: les forces électro-motrices ne s'ajoutent pas; par contre, la résistance intérieure de la pile diminue proportionnellement au nombre des éléments. Pour trois éléments, par exemple, la résistance totale de la pile n'est que le tiers de celle d'un élément.

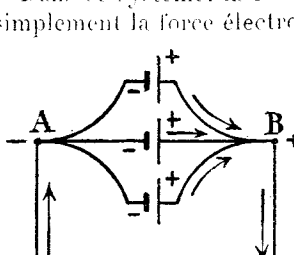


FIG. 18.— Couplage en dérivation ou quantité.

On voit, d'autre part, que les courants de chaque élément se déversent et s'ajoutent au point B, dans le circuit extérieur. Le courant total d'utilisation sera donc égal à la somme des courants partiels des divers éléments.

Par leur disposition, les trois piles du dessin forment trois dérivations, dont l'ensemble, d'après les règles des circuits dérivés, constitue une résistance trois fois plus faible que celle d'un élément. Quant à la différence de potentiel entre les points A et B, qui diffère aussi peu que l'on veut (§ 32) de la force électro-motrice, elle est toujours la même, quel que soit le nombre des éléments, puisqu'elle ne dépend, d'après la loi de Kirchhoff, que de la force électro-motrice de l'une des piles qui ferme le circuit AMBA.

Ainsi, dans le couplage en dérivation, la force électro-motrice totale est égale à celle d'un seul élément; la résistance de l'ensemble est celle d'un élément divisé par leur nombre et le courant extérieur égal à la somme des courants débités par chaque élément.

Adoptant les mêmes notations que précédemment, on aura :

$$\text{Force électro-motrice } E = e.$$

$$\text{Résistance intérieure } R_i = \frac{r}{n}$$

$$\text{Intensité du courant extérieur } I = \frac{E}{R_i} = \frac{e}{\frac{r}{n} + R}$$

Si l'on groupait en dérivation les éléments indiqués ci-dessus, on aurait :

$$I = \frac{2}{\frac{0,1}{20} + 10} = \frac{2}{0,005 + 10} = 0,20 \text{ ampère.}$$

Chacune des trois piles donnera seulement un courant i :

$$i = \frac{0,20}{3} = 0,067 \text{ ampère.}$$

Ainsi le courant total, bien qu'il soit la somme de trois courants partiels, est beaucoup moins intense dans ce cas que dans le premier. Cela provient de ce que la résistance extérieure R, qui atteint 10 ohms dans les exemples choisis, est relativement considérable et qu'il faut, pour la vaincre, une force électro-motrice notable.

D'où il résulte que le couplage en tension convient sur les circuits extérieurs à grande résistance, et le couplage en dérivation, dans le cas d'un circuit extérieur peu résistant.

3° Couplage mixte. — Il consiste à former un certain nombre de groupes contenant tous le même nombre d'éléments en série, puis à relier en dérivation chacune de ces batteries, considérée comme un seul élément.

La figure 19 montre le couplage mixte de quatre groupes de trois éléments en série, reliés en dérivation.

Cette disposition pourra s'énoncer ainsi : quatre groupes en dérivation de trois éléments en série ; mais il convient d'éviter de dire comme on le fait souvent : batterie de trois éléments en série et de quatre en dérivation, ce qui n'a aucune signification.

La force électro-motrice d'un pareil système est égale nécessairement à la force électro-motrice de l'un des groupes considéré comme pile unique. La résistance intérieure sera de même celle de l'un de ces groupes divisée par le nombre desdits groupes en dérivation.

Soit n le nombre des éléments en tension dans chaque

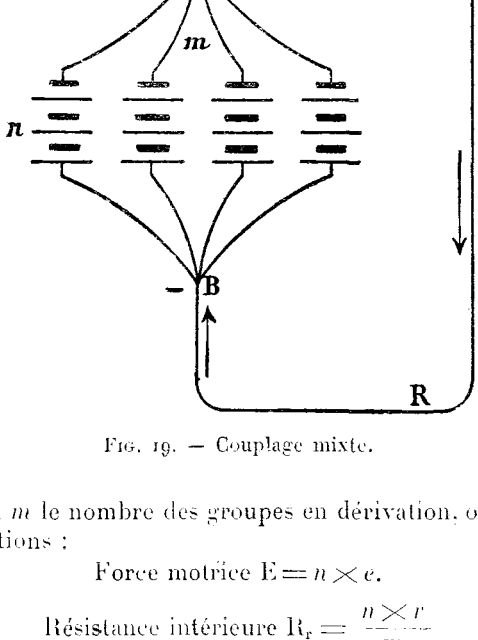


Fig. 19. — Couplage mixte.

série, et m le nombre des groupes en dérivation, on écrira les relations :

$$\text{Force motrice } E = n \times e.$$

$$\text{Résistance intérieure } R_r = \frac{n \times r}{m}$$

$$\text{Intensité du courant extérieur } I = \frac{E}{R_t} = \frac{n \times e}{\frac{n \times r}{m} + R}$$

Appliquons les données numériques précédentes au couplage dans lequel on aurait $n = 5$ et $m = 4$:

$$I = \frac{5 \times 2}{\frac{5 \times 0.1}{4} + 10} = \frac{10}{0,125 + 10} = 0.99 \text{ ampère.}$$

Le nombre total des éléments sera de $5 \times 4 = 20$.

41. **Couplage en vue d'un rendement donné.** — Les résultats des trois groupements effectués ci-dessus sont très différents, et cependant nous avons employé le même nombre d'éléments dans les trois cas, soit vingt éléments.

A première vue, la solution la plus avantageuse, pour le cas particulier considéré, est le système en série, qui donne, sur le même circuit, le courant le plus intense; mais il peut en être tout différemment au point de vue du rendement.

On obtiendra sans difficulté le rendement dans chaque cas, en divisant la résistance extérieure par la résistance totale, somme de la résistance extérieure et de la résistance intérieure de la batterie; on formera ainsi le tableau suivant :

Couplage.	Intensité en ampères.	Rendement.
Tension . . .	3a83	$\frac{10}{12} = 0,83$
Quantité . . .	0a20	$\frac{10}{10,005} = 0.999$
Mixte	0a99	$\frac{10}{10,125} = 0.987$

On voit que les deux derniers cas présentent un rendement notablement supérieur au premier : le couplage mixte a un rendement presque égal au couplage en quantité, et son courant est beaucoup plus élevé.

On choisira donc la première solution, qui correspond à la plus grande puissance développée, quand on visera plutôt ce résultat que l'économie; on rejettera la seconde solution comme ne convenant pas à la résistance donnée du circuit; enfin, on adoptera la troisième, si l'on recherche avant tout un bon rendement.

On pourrait se proposer encore de combiner les piles de manière à obtenir un rendement moyen entre le premier et le troisième cas, de 0,90, par exemple, ce qui aurait vraisemblablement pour résultat d'augmenter le courant et la puissance.

Il convient alors de faire le raisonnement très simple que voici : Le rendement étant de 190 pour 100, cela veut dire que l'énergie recueillie dans le circuit extérieur d'utilisation est les 90 pour 100 de l'énergie totale ; que, par conséquent, la résistance extérieure doit être les 90 pour 100 de la résistance totale y compris celle de l'intérieur de la pile.

Si 10 ohms, par exemple, doivent être égaux aux $\frac{90}{100}$ de la résistance totale, celle-ci sera inversement les $\frac{100}{90}$ de 10 ohms soit :

$$\text{Résistance totale} = \frac{1000}{90} = 11{,}111 \text{ ohms.}$$

D'où la résistance intérieure de la pile :

$$\text{Résistance intérieure} = 11{,}111 - 10 = 1{,}111 \text{ ohms.}$$

Il faudra donc grouper les piles de manière à obtenir une batterie dont la résistance intérieure ait la valeur calculée, et on y arrivera justement par le couplage mixte.

Pour obtenir ce résultat, il est inutile de recourir à des formules compliquées, qui, dans le cas actuel, par exemple, vous indiqueraient : 14.9 éléments en tension dans chaque série et 1,34 séries. Comme on ne saurait disposer de séries ni d'éléments fractionnaires, le mieux que l'on pourra faire sera de réaliser la combinaison de deux groupes en dérivation de 10 éléments en tension.

Il était donc inutile de recourir au calcul, puisque avec 20 éléments donnés on ne peut réaliser que les six combinaisons suivantes :

1° 20 éléments en série ;
2° 2 groupes en dérivation de 10 éléments en série ;
3° 4 groupes en dérivation de 5 éléments en série.

4° 5 groupes en dérivation de 4 éléments en série;
5° 10 groupes en dérivation de 2 éléments en série;
6° 20 éléments en dérivation

Il n'était pas même nécessaire d'épuiser toutes les combinaisons, car il est évident que c'est la seconde, comprise entre les deux combinaisons ayant fait l'objet des calculs précédents, qui remplissait le mieux les conditions proposées.

Pour cette combinaison, le courant serait :

$$I = \frac{10 \times 2}{\frac{10 \times 0,1}{2} + 10} = \frac{20}{10,50} = 1,90 \text{ ampère.}$$

et le rendement : $\frac{10}{10,5} = 0,95$, soit 95 pour 100.

Il est évident que l'on ne peut pas obtenir tous les rendements avec un nombre d'éléments fixé d'avance; dans la pratique on dispose, en général, de tous les éléments nécessaires et l'on peut se rapprocher davantage de n'importe quel rendement donné.

Problème. — Combiner une pile d'éléments Bunsen, de manière à débiter un courant de 12,5 ampères dans un circuit extérieur d'une résistance de 2,56 ohms; avec un rendement de 75 pour 100.

Les constantes d'un élément Bunsen, force électro-motrice et résistance intérieure, sont respectivement de 2 volts et de 0,08 ohms.

Pour débiter 12,5 ampères dans une résistance de 2,56 ohms, on doit avoir aux extrémités de ce circuit, c'est-à-dire aux pôles de la pile, une différence de potentiel

$$e = 12^a5 \times 2^{oh}56 = 32 \text{ volts.}$$

Le rendement étant de $\frac{75}{100}$, la résistance totale est les $\frac{100}{75}$ de la résistance extérieure, soit :

$$R_t = \frac{2,56 \times 100}{75} = 3,41 \text{ ohms.}$$

D'où la résistance intérieure :

$$R = 3{,}41 - 2{,}56 = 0{,}85 \text{ ohms.}$$

De même la chute de potentiel extérieure est les $\frac{100}{75}$ de la chute totale ou force électro-motrice E; inversement l'on a :

$$E = \frac{32 \times 100}{75} = 42{,}66$$

La force électro-motrice étant due aux seuls éléments en tension, et chaque élément donnant 2 volts, on a :

$$\text{Nombre d'éléments en tension} = \frac{42{,}66}{2} = 21{,}33, \text{ soit } 22.$$

De même, on obtient immédiatement :

Résistance intérieure d'une série $= 0{,}08 \times 22 = 1{,}76$ ohms.

Or, la résistance intérieure totale de la pile doit être de 0,85 ohm; il faudra donc avoir un nombre de groupes en dérivation tel que divisant 1,76, le quotient soit égal à 0,85. Réciproquement, en divisant 1,76 par 0,85 on obtiendra le nombre des groupes en dérivation :

$$\text{Nombre de groupes en dérivation} = \frac{1{,}76}{0{,}85} = 2{,}07, \text{ soit } 2.$$

La pile se composera donc de 2 groupes en dérivation de 22 éléments en série.

Comme vérification, calculons directement le courant débité par une pareille pile sur le circuit d'utilisation donné :

$$I = \frac{22 \times 2}{\frac{1{,}76}{2} + 2{,}56} = \frac{44}{0{,}88 + 2{,}56} = 12{,}80 \text{ ampères.}$$

Le courant sera légèrement plus fort, puisque nous employons 22 éléments en série au lieu de 21,33, chiffre donné par le calcul exact.

Enfin le rendement sera donné par le rapport de la différence de tension extérieure à la force électro-motrice totale :

$$\text{Rendement} = \frac{32}{42{,}66} = 0{,}75$$

42. Récepteurs. — Etant donnée l'énergie électrique produite par le générateur d'électricité, il s'agit de profiter des qualités de transformisme de cette énergie pour l'utiliser suivant les besoins.

C'est le rôle des récepteurs, qui ne seront eux-mêmes, suivant les cas, que des transformateurs de l'énergie électrique en chaleur et lumière s'il s'agit de résistances et de lampes, en énergie mécanique ou chimique s'il s'agit de moteurs ou d'électrolyseurs (galvanoplastie, métallurgie et autres).

Tout ce que nous avons dit précédemment s'applique aux récepteurs de la première catégorie; ceux-ci ne pouvant produire ni mouvement mécanique ni décomposition chimique, transforment entièrement en calories l'énergie électrique absorbée dans leur résistance, conformément à la loi de Joule. Ils se comportent, en effet, comme une résistance inerte tandis que les deux autres classes de récepteurs opposent, ainsi que nous le verrons plus tard, une force électro-motrice antagoniste à la force électromotrice agissante des générateurs.

Par conséquent, à résistance du circuit égale, le courant sera moins intense avec des récepteurs mécaniques ou chimiques que dans le cas des récepteurs de la première catégorie.

ÉCOLE CENTRALE
ÉCOLE
INDUSTRIELLE

CHAPITRE III

MAGNÉTISME

43. **Aimants naturels et artificiels.** — On désigne sous le nom général d'*aimants* les corps doués de la faculté d'attirer le fer.

La pierre d'aimant ou *magnétite*, qui est un minerai d'oxyde de fer, possède cette propriété et constitue un *aimant naturel*.

Le *fer* et ses dérivés, l'*acier* et la *fonte*, peuvent acquérir les mêmes qualités et manifester des propriétés magnétiques beaucoup plus intenses que la pierre d'aimant, lorsqu'ils ont été frottés à l'aide de cette pierre. Ces corps forment alors des *aimants artificiels* qui sont également susceptibles de communiquer leurs nouvelles propriétés à d'autres corps de même nature.

Le globe terrestre est doué lui-même de propriétés magnétiques qui se manifestent, notamment, par l'orientation qu'il donne à la boussole, c'est-à-dire à l'aiguille aimantée suspendue librement, en son centre de gravité, sur un pivot vertical.

Un barreau aimanté comme l'aiguille de la boussole, agira à la façon de la terre sur cette aiguille, et l'on constatera que le pôle nord de la boussole, celui qui s'oriente vers le pôle boréal de la terre, est constamment attiré par l'une des extrémités du barreau, tandis qu'il est repoussé par l'autre, et inversement pour ce qui concerne le pôle sud de l'aiguille.

On en conclut que les deux extrémités du barreau aimanté, de même que les pôles de la boussole, sont douées de propriétés magnétiques différentes.

Si l'on suspend le barreau par le même procédé que l'aiguille de la boussole, on constate qu'il s'oriente également sous l'action du magnétisme terrestre et que l'extrémité qui se tourne vers le pôle boréal, est justement celle qui repoussait le pôle nord de l'aiguille.

Ainsi les deux extrémités de chaque aimant mobile, qui se dirigent vers le nord et qui sont, par conséquent, semblables, se repoussent; au contraire, les extrémités orientées en sens inverses dans les deux boussoles s'attirent.

Il y a donc toujours dans chaque aiguille ou barreau aimanté, deux pôles, nord et sud, correspondant à deux actions différentes de chaque extrémité de l'appareil.

On doit nécessairement admettre que ces attractions et répulsions réciproques sont dues à des forces émanant des extrémités des aimants et plus spécialement *de masses actives* concentrées vers ces extrémités; les forces issues d'un centre d'action s'exerçant sur les masses de l'autre et réciproquement.

Ces masses s'attirent donc ou se repoussent réciproquement l'une l'autre, en vertu du principe mécanique de l'égalité de l'action et de la réaction. *On ne peut, d'ailleurs, concevoir une force agissante qu'en tant qu'elle émane d'une masse active et qu'elle s'exerce sur une masse de même nature susceptible de recueillir et de subir son action.*

44. Pôles et lignes de force. — Expériences. — Il est facile de mettre en évidence ces centres d'action, de même que les forces qui en émanent, par les deux expériences suivantes :

Si l'on plonge un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on constate que cette limaille s'attache aux extrémités du barreau, en formant des houppes dont les fibres semblent converger vers un point central situé non loin des bouts du barreau (fig. 20). Chacune des particules de limaille se transforme elle-même en petit aimant au con-

tact du barreau aimanté et s'oriente dans la direction des forces émanant des masses magnétiques concentrées aux extrémités.

Toute l'action de l'aimant, en effet, semble concentrée en ces points, auxquels on donne le nom de *pôles*, car la limaille ne s'attache pas dans la partie intermédiaire qui prend le nom de région neutre.

La ligne qui joint ces deux pôles s'appelle l'*axe magnétique de l'aimant*.

La deuxième expérience consiste à saupoudrer de limaille de fer une feuille de papier fort ou de verre placée au-dessus d'un aimant. Si l'on a soin de frapper légèrement la feuille de papier, à petits coups répétés, de ma-

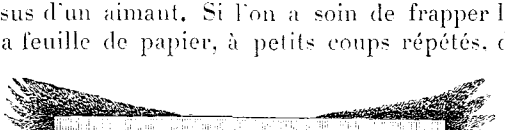


Fig. 20. — Barreau aimanté.

nière à faciliter le déplacement des particules de limaille, on les voit se disposer suivant des lignes régulières et continues qui forment des dessins très nets auxquels on donne le nom de *fantôme* ou *spectre magnétique*.

Les lignes ainsi dessinées par la limaille paraissent jaillir en gerbes divergentes des deux pôles, pour se réunir en formant comme un circuit fermé. On leur donne le nom de *lignes de force* (fig. 21).

Ce sont, en réalité, les lignes suivant lesquelles s'exercent les actions des masses magnétiques concentrées aux deux pôles. Si nous supposons une masse magnétique placée en un point M de l'une de ces lignes de force, cette masse subira de la part des deux pôles une action dirigée précisément suivant la trajectoire de la ligne de force en ce point. C'est également dans la direction de l'élément de courbe ou suivant la tangente à la trajectoire en M que s'orienterait une petite boussole placée en *a b*.

Il est bien entendu que les lignes de force n'existent

pas seulement dans le plan du papier, mais dans tous les plans que l'on pourrait mener par l'axe de l'aimant, comme les feuillets d'un livre ouvert largement et divergeant dans toutes les directions.

45. Champ magnétique. — *On appelle champ magnétique tout l'espace dans lequel s'étendent les lignes de force qui émanent des pôles d'un aimant.*

Les lignes allant en divergeant à partir des pôles comme les rayons issus de foyers lumineux, il est évident que l'intensité des forces magnétiques va en diminuant au fur

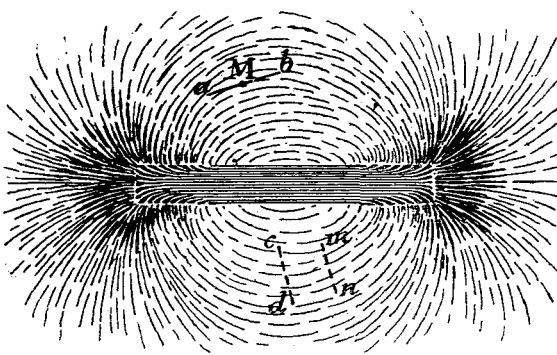


Fig. 21. — Spectre magnétique.

et à mesure que l'on s'éloigne des pôles; ou si l'on admet que chaque ligne de force représente la même valeur d'action mécanique, on en déduira que c'est le nombre de lignes de forces agissant en chaque point qui diminue. Il n'en serait pas de même si les lignes de force étaient parallèles, et régulièrement espacées : dans ce cas, on aurait ce que l'on appelle un *champ uniforme*.

Si, au lieu de considérer l'ensemble du champ magnétique et particulièrement du spectre représenté ici, on envisage une partie limitée du champ, à une certaine distance des pôles, telle que la région comprise entre les traits *c d* et *m n*, on remarquera que les lignes de force qui tra-

versent cet espace sont sensiblement rectilignes et parallèles, et constituent un champ pratiquement uniforme.

Le champ magnétique terrestre peut également être considéré comme rigoureusement uniforme, dans un espace restreint ; en tous les points d'une salle, par exemple, une aiguille aimantée subira la même action et s'orientera dans la même direction, sous l'influence du magnétisme terrestre.

46. **Egalité des masses des deux pôles.** — Si l'on brise un barreau aimanté (fig. 22) en plusieurs fragments, on constate que chacun des tronçons constitue un aimant complet pourvu d'un pôle nord et d'un pôle sud, comme l'aimant primitif. On peut donc admettre que les masses

FIG. 22. — Constitution élémentaire d'un aimant.

polaires intermédiaires préexistaient dans cet aimant, mais qu'elles s'annulaient deux à deux, chaque pôle nord d étant accompagné d'un pôle sud juxtaposé c.

On peut d'ailleurs reconstituer l'aimant total en plaçant bout à bout les aimants partiels et le barreau ainsi rétabli ne manifeste plus de phénomènes magnétiques qu'à ses deux extrémités, par suite de la neutralisation mutuelle des pôles intermédiaires.

Pour qu'il en soit ainsi, il faut nécessairement que les masses polaires de nom contraire soient absolument égales.

Il résulte de ces constatations que l'on peut considérer un barreau aimanté comme un chapelet de petits aimants placés bout à bout, les pôles de nom contraire en regard et, en second lieu, que les quantités de magnétisme ou masses magnétiques de chacun des pôles sont toujours égales et de nom différent.

C'est pourquoi, d'autre part, on désigne les pôles nord

et sud respectivement sous le nom de pôles positif et négatif.

47. **Mesure des quantités de magnétisme.** — LA DYNE UNITÉ DE FORCE. — Nous avons rapporté les effets mécaniques, attractions ou répulsions des pôles d'un aimant, à des quantités d'agents actifs ou masses magnétiques, concentrés, ou du moins agissant comme s'ils étaient concentrés aux pôles du barreau.

Nous concevons l'existence de ces masses, mais nos sens n'en saisissent que les effets; aussi, suivant nos facultés habituelles, nous assimilons l'effet à la cause, et c'est la mesure des actions ou forces dues aux masses magnétiques que nous prendrons pour la mesure même de ces masses.

Dans le domaine du magnétisme, on emploie une unité de force différente de celle que l'on utilise en mécanique, laquelle est soit le kilogramme, soit le gramme.

On sait que l'unité de force mécanique de la valeur de 1 gramme est l'effort exercé par l'attraction terrestre sur la masse contenue dans 1 centimètre cube d'eau distillée à la température de 4 degrés.

La force de 1 gramme appliquée à cette masse est capable de lui imprimer à chaque seconde une vitesse nouvelle ou accélération de $9^{m}81$ en moyenne, si l'on tient compte des variations de latitude.

D'autre part, c'est un principe de mécanique évident que les forces sont proportionnelles aux accélérations qu'elles communiquent à un même corps.

Cela posé, *l'unité de force employée en magnétisme est la force qui appliquée à la masse de 1 centimètre cube d'eau lui imprimerait une accélération de 1 centimètre. On lui donne le nom de dyne.*

Comme le gramme est une force qui imprimerait à la même masse une accélération de $9^{m}81$ ou de 981 centimètres, on voit que la dyne est une force 981 fois plus petite que le gramme et, inversement, que le gramme vaut 981 dynes.

D'autre part, la *loi de Coulomb* nous enseigne que les attractions et répulsions qui s'exercent entre les masses magnétiques obéissent à la loi de Newton qui régit les attractions des corps célestes. *C'est-à-dire que les actions développées en présence de deux masses magnétiques sont proportionnelles aux*

grandeurs de ces masses et inversement proportionnelles au carré de la distance qui les sépare.

Cette loi se résume dans la formule :

$$f = \frac{M \times m}{d^2}$$

qui permet de calculer la force f s'exerçant entre les deux masses de grandeur M et m placées à la distance d l'une de l'autre.

Au lieu de considérer l'action de la masse M sur une masse m de grandeur quelconque, je puis imaginer que m aurait justement la valeur de la masse choisie pour unité ou que $m = 1$.

La formule deviendrait alors :

$$f = \frac{M \times 1}{d^2} = \frac{M}{d^2}$$

Je puis considérer encore le cas particulier où la masse unité serait placée à l'unité de distance, soit à 1 centimètre de la masse M et j'aurai par suite :

$$f = \frac{M}{d^2} = \frac{M}{1^2} = M$$

Enfin, je suppose que la masse M est elle-même égale à la masse unité, de telle sorte que :

$$f = M = m = 1$$

Ainsi, il résulte de la loi de Coulomb que l'unité de force choisie ou la dyne s'exerce entre deux masses égales chacune à l'unité de masse et placées à 1 centimètre de distance.

Réciproquement : *l'unité de masse magnétique sera la masse qui, placée à 1 centimètre d'une masse égale exercera sur elle une action de la valeur de 1 dyne.*

Nous voyons, d'autre part, que si la masse considérée était M, c'est-à-dire M fois plus grande que l'unité, cette masse M exercerait sur la masse unité une force M fois plus grande ou M. Nous retrouvons ainsi la relation :

$$f = M$$

Ce qui veut dire que *la masse M a pour mesure l'action qu'elle exerce sur une masse unité située à 1 centimètre de distance.*

Cette action ainsi définie est encore ce qu'on appelle l'*intensité magnétique* de la masse M, ou du pôle M, si l'on suppose

que cette masse est concentrée à l'un des pôles d'un aimant. Soit, par exemple, un pôle exerçant sur la masse unité placée à 1 centimètre une action de 30 dynes, on dira qu'elle contient 30 unités de masse magnétique ou que son intensité est égale à 30.

48. **Flux de force total rayonné par un pôle.** — Nous n'avons fait encore aucune hypothèse touchant la manière dont l'unité de masse sur laquelle s'exerce l'action d'un pôle M, est distribuée dans l'espace. On peut en effet imaginer, ou bien qu'elle est concentrée en un point géométrique, ou bien qu'elle est répartie uniformément sur une surface de dimensions relativement faibles.

Choisissons maintenant la deuxième hypothèse et admettons que la masse unité est distribuée sur un plan *ab* de 1 centimètre carré sans épaisseur appréciable et perpendiculaire à la droite qui joint son milieu au foyer magnétique M (fig. 23).

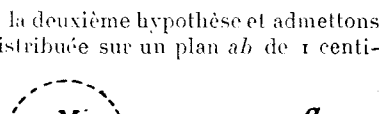


FIG. 23. — Flux de force total d'un pôle

Les lignes de force extrême telles que M *a* *M b* et ne diffèrent pas sensiblement de M $m = R$ si la distance R est suffisamment grande.

Décrivons autour du pôle M une circonférence de rayon égal à 1 centimètre. La pyramide *a*M*b* détache sur cette sphère un élément *cd*, que je supposerai 100 fois plus petit que *ab*, par exemple, pour la facilité de la démonstration. La surface sera donc de 1 millimètre carré.

Admettant toujours la même quantité de magnétisme par unité de surface ou la même densité en *cd* qu'en *ab*, nous aurons en *cd*, $\frac{1}{100}$ d'unité de masse, de sorte que l'effort de M sur l'élément de surface *cd* sera :

$$f = M \times \frac{1}{100}$$

D'autre part, la surface totale S de la petite sphère, en millimètres carrés est égale, d'après la géométrie, à

$$4\pi \times r^2$$

π étant un coefficient égal à 3,1415 et r le rayon de la sphère qui devant être exprimé en millimètres sera égal à 10, on aura donc :

$$S = 4\pi \times r^2 = 4\pi \times \overline{10}^2 = 4\pi \times 100.$$

Ainsi la surface S de la sphère contient $4\pi \times 100$ millimètres carrés, et comme chaque millimètre carré reçoit une action égale à $\frac{M}{100}$, l'action totale sur toute l'étendue de la sphère sera :

$$F = 4\pi \times 100 \times \frac{M}{100} = 4\pi \times M$$

Le flux de force total rayonné par le pôle M est donc égal à $4\pi M$.

On pourrait assimiler la sphère considérée à un réservoir sphérique, rempli de vapeur exerçant sur les parois intérieures une pression de $\frac{M}{100}$ dynes par millimètre carré. La pression totale serait également la valeur $F = 4\pi m$.

La force ou pression sur l'élément cd, *normal à la direction de la force, est ce qu'on appelle le flux de force agissant sur ledit élément.*

Il est évident que le flux de force $4\pi M$ qui exerce sa pression sur toute la surface de la petite sphère sera également reçu par la surface d'une sphère de rayon plus grand et concentrique à la première.

En particulier, la sphère du rayon R comprenant la petite surface ab recevra le flux $4\pi M$ qui sera également réparti sur toute son étendue. Or, la surface de cette sphère étant égale à $4\pi \times R^2$ centimètres contient $4\pi R^2$ éléments égaux à ab ou à 1 centimètre carré.

Le flux de force reçu par cet élément sera donc :

$$f = \frac{4\pi \times M}{4\pi \times R^2} = \frac{M}{R^2}$$

La force f peut être considérée comme la résultante sur la masse unité des actions de toutes les lignes de force constituant le faisceau conique aMb issu du foyer magnétique M. Une pareille résultante, appliquée au centre de l'élément ab et normalement à cet élément, donne la valeur de la force agissant au point m du champ magnétique dû au pôle M, ou *l'intensité du champ* au point m.

49. **Intensité de champ magnétique.** — *On appelle intensité d'un champ magnétique, en un point d'un champ de lignes de force, l'effort qui s'exercerait sur la masse unité placée en ce point.*

On conçoit en effet que pour pouvoir comparer les valeurs des efforts aux divers points d'un champ ou de champs différents, il faut rapporter les actions des forces à une même masse, qui sera nécessairement la masse unité.

50. **Flux de force magnétique.** — Considérons une surface plane placée en un point d'un champ magnétique, perpendiculairement aux lignes de force qui passent en ce point. Ce plan sera traversé par un certain nombre de lignes de force normalement à sa surface.

Imaginons, en outre, que ce plan soit constitué par une couche mince uniforme de magnétisme, de telle sorte que chaque centimètre carré comprenne une quantité de magnétisme égale à l'unité.

Dans ces conditions, on appellera *flux de force la somme des lignes de force qui traversent la surface considérée.*

Le flux de force aura donc pour valeur : la somme des actions ou lignes de force qui s'exercent de la part d'un champ magnétique extérieur sur une surface normale aux lignes de forces du champ, et qui est supposée recouverte d'une couche homogène de magnétisme répartie à raison d'une unité de masse par centimètre carré.

51. **Unités d'intensité de champ et de flux de force.** — Pour évaluer les forces magnétiques, on emploie l'unité de force appelée *dyne*, qui est équivalente à $\frac{1}{981}$ de gramme.

L'unité d'intensité de champ est celle d'un champ qui exerce une force de 1 dyne sur la masse unité placée dans ce champ.

Si la masse magnétique choisie pour unité est placée en un point d'un champ où elle subit un effort de 20 dynes, par exemple, on dira que l'intensité du champ en ce point est égale à 20 et, d'une manière générale, égale à H.

L'unité de flux de force est le flux traversant une sur-

face de 1 centimètre carré dans un champ d'intensité égale à l'unité.

Cela revient à considérer l'unité de force du champ ou l'intensité unité comme s'exerçant sur la masse unité répartie sur une surface de 1 centimètre carré normale à la direction des lignes du champ.

C'est donc, à proprement parler, l'*intensité unité par centimètre carré*, et l'on voit que l'unité de flux aura la même mesure que l'intensité de champ.

Par exemple, un champ dont l'intensité sera égale à 20 développera un flux de 20 unités dans une surface de 1 centimètre carré, normale à la direction du champ.

Nous supposons dans ce qui précède que l'on a affaire à un champ uniforme, dans lequel la même force s'exerce en tous les points; s'il n'en était pas ainsi, tout ce que nous avons dit subsisterait, à condition de ne plus parler d'intensité ou de flux magnétique d'un champ, mais d'intensité et de flux magnétique en un point donné du champ, ces quantités variant alors d'un point à l'autre.

52. **Mesure du flux de force magnétique.** — De ce qui précède, il résulte que pour évaluer le flux de force qui traverse une surface S normale au champ supposé uniforme, dont on connaît l'intensité H, il suffit de multiplier H par la surface S.

En effet, H étant le flux ou l'effort par centimètre carré, le flux pour les S centimètres carrés de la surface sera :

$$\text{Flux} = H \times S$$

Exemple. — Une surface de $0^{m^2}0075$ est placée normalement aux lignes de force dans un champ d'intensité 20, quel flux de force traverse cette surface?

Comme nos définitions reposent sur l'emploi du centimètre carré, il faut exprimer la surface en unités de cette espèce, ce qui fait 75 centimètres carrés. On aura donc :

$$\text{Flux} = 75 \times 20 = 1500 \text{ unités}$$

Et si l'on admet que chaque unité de flux correspond à une ligne de force, on pourra écrire :

$$\text{Flux} = 1500 \text{ lignes de force}$$

53. **Flux des aimants.** — *Nous pouvons maintenant considérer les aimants comme pourvus à chaque extrémité de masses ou foyers magnétiques qui rayonnent dans toutes les directions des lignes de force dont la valeur dépend de l'intensité de ces foyers* (§ 48).

Les flux de force relatifs à chacun des pôles de l'aimant sont égaux et de signe contraire, comme les pôles d'où ils émanent.

Représentons quelques-unes des lignes de force issues des pôles d'un aimant et soit une masse magnétique quelconque, ou mieux, égale à l'unité placée en *m* (fig. 24) dans le voisinage du pôle positif et de même nature que ce pôle, c'est-à-dire, positive elle-même.

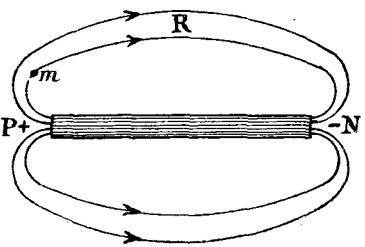


FIG. 24. — Différence de potentiel magnétique.

Cette masse *m* tendra à se déplacer du pôle positif P qui la repousse au pôle négatif N qui l'attire en suivant la ligne de force qui passe par le point *m*.

Si nous comparons ce système à celui qui serait constitué par une pile ayant ses deux pôles en P et N et par un fil conducteur tel que P R N relié à ces pôles, nous sommes frappés d'une analogie évidente.

Nous voyons en effet, dans les deux cas, soit des masses électriques circulant du pôle positif où le potentiel électrique est le plus élevé, vers le pôle négatif à potentiel inférieur, soit une ou plusieurs masses magnétiques telles que *m* se déplaçant du pôle nord au pôle sud.

On peut donc, en assimilant les lignes de force aux actions qu'elles produisent sur une masse sensible *m*, imaginer que ces lignes se développent et se propagent, à travers le milieu qu'elles traversent, en vertu d'une différence de potentiel magnétique entre les deux pôles P et N.

Nous voyons alors que ces lignes ont un *sens* donné, par le déplacement de la masse positive m, c'est-à-dire de P en N.

On est donc conduit à admettre, par analogie avec les piles et les courants électriques, que les lignes de force sortent du pôle nord, se propagent dans l'air environnant en formant des circuits continus qui se ferment sur le pôle sud.

De même, on doit admettre que ces lignes se ferment à l'intérieur de l'aimant, en se dirigeant du pôle sud au pôle nord, de même que le courant remonte du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur de la pile.

Nous dirons donc que :

1° *Les lignes de force forment des circuits fermés tant à l'extérieur qu'à l'intérieur de l'aimant;*

2° *Une ligne de force tend toujours à se raccourcir;*

3° *Deux lignes de force de même sens se repoussent; deux lignes de sens contraire s'attirent.*

Ces dernières lois constituent les *lois de Faraday*. Elles expliquent pourquoi les lignes émanées d'un même pôle de l'aimant et, par suite, dirigées dans le même sens, vont en s'écartant dans la direction perpendiculaire à l'axe magnétique.

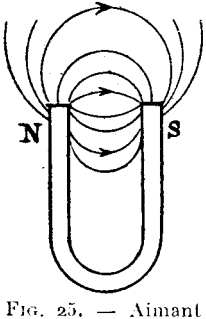


Fig. 25. — Aimant en fer à cheval.

Si cette répulsion n'existait pas, toutes les lignes se rapprocheraient de l'axe, pour se raccourcir conformément à la première loi.

Nous verrons plus loin que l'air offre au passage des lignes de force une résistance beaucoup plus considérable que le barreau de fer ou d'acier. C'est pourquoi on fait souvent des aimants en fer à cheval, pour faciliter le développement des lignes de force en diminuant le parcours du circuit dans l'air (fig. 25).

54. **Moment magnétique d'un aimant.** — On sait qu'une aiguille aimantée assujettie à se mouvoir sur un pivot vertical, dans un plan horizontal, s'oriente dans une direction voisine de la direction nord-sud du méridien terrestre, c'est ce que l'on appelle la *boussole de déclinaison*.

Cette boussole nous indique que le champ magnétique terrestre émet des lignes de forces parallèles au plan vertical qui passe par l'axe magnétique de l'aiguille et que l'on désigne pour ce fait sous le nom de *méridien magnétique*.

Reste à déterminer la direction même du champ; on l'obtient par la *boussole d'inclinaison*, formée d'une aiguille mobile autour d'un axe horizontal et dont l'axe magnétique coïncide avec le plan du méridien déterminé par l'aiguille de déclinaison.

C'est nécessairement suivant cette direction, qui est la direction même de la force magnétique terrestre, que s'exerce l'intensité magnétique maxima.

Sa valeur, qui varie avec les différents points du globe, a été trouvée égale à 0,46 à Paris.

Mais l'aiguille de déclinaison qui est assujettie à se mouvoir dans un plan horizontal n'est pas influencée par cette force totale inclinée sur l'horizon, ce n'est que la composante horizontale de cette force qui agit sur les pôles de l'aiguille dans cette circonstance. Supposons en effet (fig. 26) une masse m assujettie à se mouvoir sur un plan XY horizontal et soumise à l'action d'une force oblique md, de direction et d'intensité semblables à la force du champ terrestre. La masse m ne pourra être entraînée dans la direction de cette force.

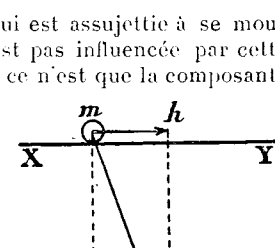


FIG. 26. — Décomposition des forces magnétiques.

Mais, d'après la règle mécanique du parallélogramme des forces, la force totale md peut être remplacée par deux autres obtenues en abaissant deux perpendiculaires mh et mt sur les deux lignes horizontale et verticale passant au point m.

La force mh est la composante horizontale de md ou du champ terrestre, et c'est elle seule qui, agissant sur les pôles

de l'aimant, constitue l'intensité horizontale du champ terrestre; sa valeur à Paris est environ de 0,20.

Cela veut dire, d'après nos définitions, que le pôle d'un aimant, de masse m égale à l'unité, soumis à l'action de ce champ, subirait une action de 0,2 de dyne ou de $\frac{0,2}{981}$ ou $\frac{1}{4905}$ de gramme, soit environ $\frac{1}{5}$ de milligramme.

Supposons actuellement que nous placions un petit aimant, disposé comme l'aiguille de déclinaison, dans un champ analogue au champ terrestre, c'est-à-dire uniforme, mais dont l'intensité horizontale serait justement égale à l'unité.

Soit N S la direction du champ (fig. 27); toutes les lignes de force sont parallèles à N S et notamment celles qui passent en A et B. En ces points, la force agissant sur l'unité de masse est égale à 1 par hypothèse; la force sur la masse m du pôle de l'aimant sera m fois plus grande, c'est-à-dire égale à m dynes; elle sera la même, mais de sens contraire sur la masse $(-m)$ du pôle négatif.

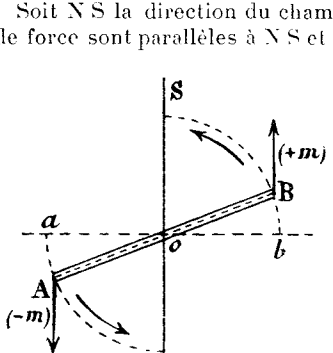


Fig. 27. — Moment magnétique.

Ces deux forces de sens contraires font néanmoins concourir leurs actions pour faire tourner le barreau, de manière à le ramener dans la direction N S. A ce moment, les deux forces m et $(-m)$ agissant en A et en B, seront directement opposées et l'aimant sera en équilibre stable.

Si nous supposons que le barreau soit parti de la position $a\,b$ normale à la direction du champ, il est facile d'évaluer le travail produit par le déplacement des deux masses m et $(-m)$ sous l'action des forces de même valeur.

Il est évident que dans l'évaluation du travail dû aux forces considérées, il y a lieu de tenir compte uniquement du chemin parcouru dans la direction de ces forces c'est-à-dire du champ (§ 9). Or, quand le pôle B est venu de b en S, il a parcouru dans la direction du champ un chemin O S = O B; de même A a parcouru le chemin O N = O A = O B,

Chacun de ces travaux est donc égal en valeur absolue à $m \times O B$ et la somme à $2\, m \times O B$ ou $m \times 2\, O B$, c'est-à-dire finalement $m \times A B$.

Cette quantité porte le nom de *moment magnétique* de l'aimant; elle correspond à ce que l'on appelle en mécanique le moment du couple des deux forces égales et parallèles appliquées aux pôles de l'aimant.

Si le champ avait une intensité H différente de l'unité, la force agissant sur chacun des pôles serait $H \times m$ et le travail ou le couple mécanique aurait pour valeur :

$$M = m \times l \times H.$$

Si l'on désigne la longueur de l'aimant par l et la masse polaire par m, on désignera le moment magnétique par M et l'on aura :

$$M = m \times l.$$

On voit que l'on peut obtenir le même moment, soit avec un pôle de faible intensité et une grande longueur de barreau, soit inversement avec un pôle intense et un barreau court.

L'effet magnétique d'un aimant dépend donc à la fois des masses magnétiques dont il est chargé et de ses dimensions. Réciproquement, le moment d'un aimant caractérisera sa puissance au point de vue des effets magnétiques.

On prend pour mesure du *moment magnétique* le travail que nous avons évalué à tout l'heure.

55. **L'erg unité de travail magnétique.** — L'unité de travail usitée dans le domaine magnétique est l'*erg*.

Par définition, l'erg est le travail de 1 dyne, pour un déplacement de 1 centimètre, dans la direction de la force.

Puisque la dyne vaut $\frac{1}{981}$ de gramme ou $\frac{1}{981.000}$ de kilogramme et le centimètre $\frac{1}{100}$ de mètre, l'erg vaudra :

$$\frac{1}{981.000} \times \frac{1}{100} = \frac{1}{98.100.000} \text{ de kilogrammètre.}$$

Comme, d'autre part, le kilogrammètre vaut 9,81 joules, l'erg vaudra :

$$\frac{9{,}81}{98.100.000} = \frac{1}{10.000.000} \text{ de joule.}$$

Soit un aimant dont la quantité de magnétisme de chaque

pôle est égale à 30 unités et la longueur de 50 centimètres, son moment magnétique sera :

$$M = 30 \times 50 = 1500 \text{ unités de moment.}$$

C'est-à-dire qu'il équivaudra à 1500 fois le moment d'un aimant dont l'intensité de pôle m est égale à l'unité et la distance des pôles égale à 1 centimètre.

56. **Intensité d'aimantation.** — Puisque l'on peut considérer les aimants comme constitués par une suite de petits barreaux formant autant d'aimants élémentaires (§ 46), rien ne s'oppose à ce que chacun de ces aimants partiels ait un volume égal à l'unité, soit à 1 centimètre cube.

Il est à peu près évident d'ailleurs, et l'expérience le confirme, que le moment total de l'aimant est égal à la somme des moments de tous les petits aimants composants. Réciproquement, le moment élémentaire s'obtiendra en divisant le moment total par le nombre des aimants composants, mais celui-ci est égal au nombre des centimètres cubes ou au volume total.

Donc, pour avoir le moment d'un aimant élémentaire de 1 centimètre cube, il faut diviser le moment total par le volume total en centimètres cubes.

Soit le barreau considéré ci-dessus, dont le moment total est égal à 1500, avec un volume de 5 centimètres cubes; le moment u de l'aimant unité serait :

$$u = \frac{1500}{5} = 300 \text{ unités,}$$

et d'une manière générale,

$$u = \frac{M}{V}$$

Le rapport ainsi calculé, du moment total au volume de l'aimant, est ce qu'on appelle l'*intensité d'aimantation;* c'est, comme on le voit, l'action magnétique rapportée à l'unité du volume, et cette quantité peut, en conséquence, servir de mesure à la puissance d'aimantation de l'aimant.

L'intensité d'aimantation des aimants en acier varie

dans de grandes proportions suivant la nature de l'acier et les dimensions des barreaux. Les barreaux longs et minces présentent une intensité d'aimantation plus forte, dans les mêmes conditions, que les barreaux gros et courts. Le pôle nord, en effet, exerce une action démagnétisante, par le flux intérieur qu'il rayonne en sens inverse du flux général qui traverse l'aimant du sud au nord et cette action est d'autant plus efficace que l'aimant est plus court relativement à sa section.

Les intensités d'aimantation trouvées pour des aiguilles d'acier longues et minces ne dépassent guère 800 unités; la valeur moyenne est de 200 environ, et elle descend parfois au-dessous de 10 unités.

57. **Force portante des aimants.** — Lorsqu'une pièce de fer doux ou tout autre corps magnétique est mis en contact avec les pôles d'un aimant et notamment d'un aimant à deux branches recourbées en fer à cheval, cette pièce s'aimante elle-même et reçoit le nom d'armature. Les pôles de cette armature contiennent des quantités de magnétisme égales et contraires à celles des pôles respectivement en contact de l'aimant. Il s'exerce alors une attraction très puissante entre les pôles antagonistes, et il faut développer une traction relativement considérable pour arracher l'armature et la séparer des branches de l'aimant.

L'effort qu'il faut ainsi réaliser est ce qu'on appelle la *force portante de l'aimant.*

Valeur de la force portante. — Pour évaluer cette force, considérons une masse m isolée et placée au centre d'une sphère de rayon quelconque.

Nous avons vu (§ 48) que le flux de force total rayonné par le pôle m et reçu par la surface totale de la sphère était égal à $4\pi m$.

Soit maintenant un plan indéfini ab (fig. 28) qui se déplace parallèlement à C D en se rapprochant du point o.

Il est évident que la partie limitée du plan incluse dans la sphère, recevra un nombre de lignes de force d'autant plus grand que le plan sera plus voisin du point o. Au moment

même où ce plan sera près de contenir le point o, il sera traversé par toutes les lignes de force rayonnées de la masse m sur la demi-sphère, c'est-à-dire par la moitié du flux total ou $2\pi m$.

Mais il ne faut pas confondre le flux de force rayonné par un pôle avec le flux de force reçu par une surface qui, par définition (§ 50), est la résultante des forces qui frappent normalement la surface considérée.

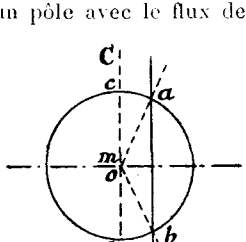


Fig. 28. — Flux de force reçu par un plan très voisin du pôle.

Toutefois, le flux de force $2\pi m$ conservera la même valeur si, au lieu d'avoir une masse m punctiforme, nous supposons que la même masse soit répartie uniformément sur une surface S égale à dc.

On pourra admettre alors que chaque centimètre carré de cd, chargé d'une quantité de magnétisme $\frac{m}{S} = d$, agit directement sur l'élément correspondant de la surface ab en contact avec lui et chargé de la même quantité d, surtout si l'on a affaire comme ici à deux surfaces polaires en contact, celles de l'aimant et celle de l'armature.

L'action de chaque élément de cd serait donc :

$$2\pi \frac{m}{S} = 2\pi d$$

sur un élément chargé de l'unité de magnétisme, et elle sera :

$$2\pi d \times d = 2\pi d^2$$

sur la quantité d contenue par élément de surface de ab.

Enfin, l'action totale P sur la surface S de ab sera :

$$P = 2\pi d^2 \times S$$

Cette démonstration ne repose pas sur une hypothèse gratuite, mais sur les faits observés dans l'attraction des aimants sur leurs armatures, puisque l'on constate que les lignes de force émergent normalement en chaque point de la section extrême du barreau et que tout se passe, en conséquence, comme si la masse m du pôle était répartie uniformément sur la section.

La quantité de magnétisme $\frac{m}{S}$ *par unité de surface aux extrémités polaires, est ce que l'on appelle la densité superficielle du magnétisme des aimants.*

Il est facile de voir que *cette densité a la même valeur que l'intensité d'aimantation.*

Soit l'aimant déjà considéré dont l'intensité de pôle $m = 30$, la longueur $l = 50$ et le volume $V = 5$ centimètres cubes. L'intensité d'aimantation, que l'on désigne généralement par A, sera :

$$A = \frac{m \times l}{V} = \frac{30 \times 50}{5} = 300$$

Le volume étant de 5 centimètres cubes et la longueur de 50 centimètres, la section sera de :

$$S = \frac{V}{l} = \frac{5}{50} = 0,1 \text{ centimètres carrés.}$$

La densité superficielle sera donc :

$$d = \frac{m}{S} = \frac{30}{0,10} = 300$$

ainsi que nous voulions le démontrer.

La formule de la force portante pourra donc s'écrire également :

$$P = 2\pi A^2 \times S$$

Si nous considérons un aimant d'intensité d'aimantation maxima, de 800 unités, nous aurons, pour $S = 1$, c'est-à-dire par unité de surface :

$$P = 2 \times 3,1415 \times 640.000 \times 1$$

La force d'arrachement ou force portante serait alors exprimée en dynes; pour l'avoir en kilogrammes, comme le kilogramme vaut 981.000 dynes, il faudra diviser par ce chiffre :

$$P = \frac{2 \times 3,1415 \times 640.000}{981.000} = 4 \text{ kilogrammes}$$

Un aimant en fer à cheval de 3 centimètres carrés de section porterait donc 12 kilogrammes par pôle, soit 24 kilogrammes en totalité.

58. **Circuits magnétiques fermés.** — Quand l'armature A B d'un aimant est en contact parfait avec les pôles de celui-

ci. les lignes de force de l'aimant se fermentcomplètement. à travers cette armature, et le flux est pour ainsi dire canalisé à travers le circuit magnétique.

Dans un pareil système, qu'on désigne sous le nom de *circuit magnétique fermé*, il n'y a plus de pôles libres rayonnant à l'extérieur, et l'aimant n'accuse aucune propriété magnétique sensible dans le milieu ambiant.

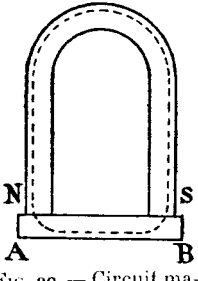


Fig. 29. — Circuit magnétique fermé.

Cependant les lignes de force ont persisté à l'intérieur de l'aimant et il suffit d'arracher l'armature pour constater de nouveau la présence des pôles nord et sud.

Il en serait de même si l'on enroulait en anneau un barreau aimanté droit ou en fer à cheval, de manière à ramener les deux pôles au contact. On obtiendrait encore un circuit magnétique fermé, sans action magnétique extérieure.

CHAPITRE IV

AIMANTATION ET INDUCTION

59. **Sources d'aimantation.** — Nous avons, jusqu'à présent, considéré des aimants ou barreaux aimantés sans nous préoccuper des circonstances qui ont pu présider à l'aimantation de ces barreaux.

Les sources d'aimantation auxquelles ces barreaux ont pu emprunter leur magnétisme sont de différentes sortes, savoir : les barreaux déjà doués d'une grande puissance magnétique; le magnétisme terrestre et l'électricité, comme nous le verrons ci-après.

Aimantation par les aimants et par la terre. — Quand on se sert d'aimants pour communiquer les propriétés magnétiques à un barreau de fer ou d'acier, le procédé consiste à opérer des frictions longitudinales, en promenant le pôle d'un fort aimant d'un bout à l'autre du barreau. C'est ce que l'on appelle la méthode de la *simple touche;* il y a aussi celles de la *double touche*, en se servant de deux pôles de nom contraire, glissant simultanément sur le barreau, et de la *touche séparée* effectuée à l'aide des deux pôles glissant simultanément, à partir du centre, vers chacune des extrémités du barreau.

L'aimantation par la terre consiste à placer le barreau dans la direction du champ terrestre, c'est-à-dire parallèlement aux lignes de force de ce champ magnétique ou à l'aiguille d'inclinaison.

Dans cette expérience, on constate que, si le barreau est

en acier, l'aimantation se produira très lentement, mais persistera après que l'on aura soustrait le barreau à l'action efficace du champ terrestre, en l'orientant dans une position quelconque et notamment dans une direction perpendiculaire aux lignes de force du champ.

Si, au contraire, on met en œuvre un barreau de fer doux, celui-ci s'aimante instantanément, mais il perd immédiatement la plus grande partie de ses propriétés magnétiques dès qu'il n'est plus placé dans la direction du champ.

Les corps tels que l'acier qui conservent leur aimantation, sont dits *aimants permanents;* ceux, au contraire, qui ne manifestent leurs propriétés magnétiques que pendant qu'ils sont soumis à l'influence du champ, constituent les *aimants temporaires*. Tels sont les aimants employés dans les appareils télégraphiques qui ne sont actifs et n'attirent leur armature de fer doux, pour transmettre les signaux, qu'au moment même du passage du courant auquel est dû le champ magnétique.

Quoi qu'il en soit, ces expériences montrent qu'il n'est pas nécessaire de mettre un barreau en contact intime avec un aimant pour lui communiquer des propriétés magnétiques.

Il suffit de placer ce barreau dans la direction du champ terrestre ou dans le voisinage d'un aimant, de façon à ce qu'il soit soumis à l'influence des pôles de cet aimant et, à cet effet, qu'il soit traversé dans le sens de sa longueur par les lignes de force du *champ magnétisant*, qu'on appelle aussi *champ inducteur*.

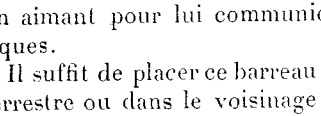


Fig. 30. — Aimentation d'un barreau.

Dans ces conditions, il se développe aux extrémités du barreau un pôle nord et un pôle sud (fig. 30), et ces pôles sont disposés de telle sorte que le flux magnétique qui en émane soit dirigé dans le même sens que les lignes de force du champ inducteur. Pour qu'il en soit ainsi, il faut qu'il se produise un pôle nord en avant des lignes

inductrices et un pôle sud en arrière, conformément à la convention faite sur le sens des lignes de force émanées des pôles d'un aimant.

60. **Aimantation par l'électricité. Champs galvaniques des courants.** — Les courants électriques, en outre des propriétés qu'ils manifestent par des phénomènes ayant leur siége dans les circuits mêmes qu'ils traversent, présentent également, en dehors de ces circuits et dans leur voisinage, des phénomènes absolument analogues à ceux que produisent les aimants.

On constate, en effet, qu'il se développe des lignes de force dans le voisinage d'un circuit électrique, et l'espace ambiant forme un champ dit *galvanique* jouissant de toutes les propriétés des champs magnétiques dus aux aimants.

Ces lignes de force sont situées tout le long du circuit électrique dans des plans perpendiculaires au conducteur et affectent la forme de cercles concentriques ayant leurs centres sur l'axe du fil (fig. 31).

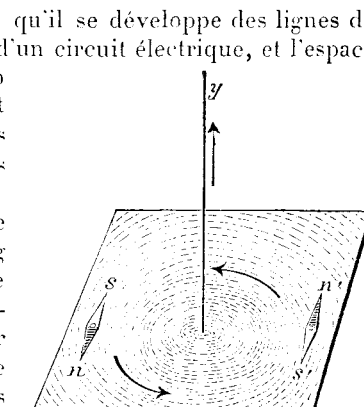


FIG. 31. — Champ galvanique.

On peut rendre ce champ galvanique apparent en saupoudrant de limaille de fer une feuille de papier traversée par un courant perpendiculaire au plan de la feuille.

Quant à la direction des lignes de force, on l'obtient par la règle du tire-bouchon de Maxwell. Elle consiste à placer cet instrument dans l'axe du conducteur en le faisant tourner de manière à ce qu'il progresse dans le sens du courant, alors le sens de rotation dudit est celui des lignes de force du champ galvanique.

61. **Solénoïde.** — Si l'on enroule un fil de cuivre recouvert d'une enveloppe isolante, de coton par exemple, sur un cylindre, de manière à constituer une sorte de ressort spiral, on obtient, après avoir retiré le mandrin intérieur, un cylindre creux auquel on donne le nom de *cylindre électro-magnétique* ou *solénoïde* (fig. 32).

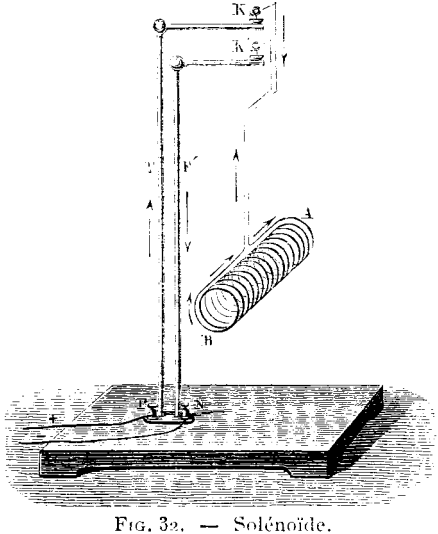


FIG. 32. — Solénoïde.

Les extrémités de ce circuit hélicoïdal étant rattachées aux deux pôles d'une pile, de façon à ce que ses spires soient traversées par un courant, on constate qu'il se développe à l'intérieur du solénoïde et extérieurement, des lignes de force analogues à celles qui émanent des aimants. Un pareil cylindre paraît doué de toutes les propriétés d'un barreau aimanté; suspendu convenablement, il s'oriente comme une boussole, l'une de ses extrémités se tournant constamment vers le nord. Ce système présente donc deux pôles, et il est facile de déterminer la nature de chacun d'eux par la règle de Maxwell, que nous avons déjà appliquée au champ galvanique d'un circuit rectiligne.

Supposons que le courant circule dans les spires du solénoïde (fig. 33) comme l'indiquent les flèches, c'est-à-dire en montant sur la partie antérieure des spires et en descendant sur la partie postérieure.

Le tire-bouchon étant dirigé suivant l'axe du solénoïde, on le fait tourner dans le même sens que le courant; le

sens d'avancement sera celui du flux de force. Dans l'exemple choisi, le tire-bouchon avancerait de droite à gauche ; le flux pénètre donc par l'extrémité S qui est un pôle sud, et sort par l'extrémité qui N est un pôle nord, d'après nos conventions.

Les lignes de force qui se développent ainsi, sous l'action du courant, constituent le *flux d'induction* ou l'*induction galvanique.*

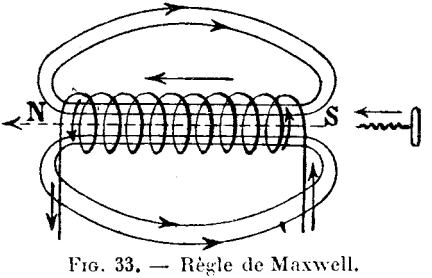


Fig. 33. — Règle de Maxwell.

Ces lignes forment des circuits fermés à l'intérieur et à l'extérieur du solénoïde ; le champ intérieur, du moins dans les parties qui n'avoisinent pas les extrémités, présente toutes les propriétés d'un champ uniforme, le flux étant constitué par un faisceau de lignes de force parallèles à l'axe, également espacées et de même intensité, en chaque point des diverses sections transversales.

62. **Électro-aimant.** — Le champ magnétique développé par le passage du courant dans le solénoïde peut être utilisé, comme celui d'un aimant, pour faire naître dans un barreau d'acier ou de fer doux les propriétés magnétiques. A cet effet, on place le barreau dans l'axe du solénoïde ; il est alors traversé par les lignes de force du champ, s'aimante et acquiert deux pôles.

Le barreau d'acier, en vertu d'une propriété à laquelle on donne le nom de *force coercitive*, conserve la plus grande partie du magnétisme dont il a été imprégné et, comme on dit, un *magnétisme rémanent* relativement intense ; il constitue un *aimant permanent.*

Le fer doux, doué d'une faible force coercitive, ne présente qu'un *magnétisme temporaire* qui se manifeste seulement à l'intérieur du champ magnétique et qui cesse presque entièrement dès que le courant est interrom[pu]

Le système composé du solénoïde et de son noyau de fer doux, constitue ce que l'on appelle un *électro-aimant*.

Dans le cas d'un barreau *droit* engagé dans une bobine cylindrique, on réalise un électro-aimant droit (fig. 34).

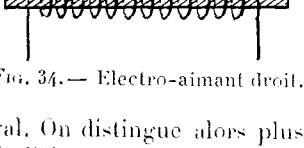


FIG. 34.— Electro-aimant droit.

Mais, en général, on donne aux électro-aimants la forme d'un U ou d'un fer à cheval. On distingue alors plusieurs parties dans la *carcasse* de l'électro-aimant : les deux branches de l'U ou *noyaux*, sur lesquelles on enroule deux solénoïdes ; la pièce transversale en fer et souvent en fonte qui réunit les noyaux, on l'appelle la *culasse ;* enfin, une pièce indépendante en fer doux, qui subit l'attraction de l'électro et qui prend le nom d'*armature* (fig. 35).

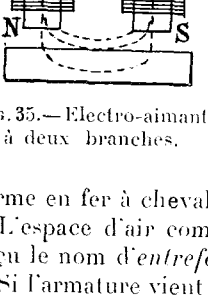


FIG. 35.— Electro-aimant à deux branches.

On voit que les lignes de force engendrées par les spires du solénoïde, peuvent se propager à l'intérieur du fer qui forme une sorte de circuit magnétique. Ce flux sort par le pôle nord et rentre d'autant plus aisément par le pôle sud que les deux pôles sont plus rapprochés, par suite de la forme en fer à cheval de la carcasse magnétique.

L'espace d'air compris entre les pôles et l'armature a reçu le nom d'*entrefer*.

Si l'armature vient au contact de l'électro-aimant, il n'y a plus d'entrefer et les lignes de force se développent presque exclusivement à l'intérieur du circuit magnétique qui constitue alors un circuit fermé.

Le système ne manifeste plus aucune propriété magnétique à l'extérieur du circuit, car, ainsi que nous le verrons plus loin, le fer et toutes les substances analogues, dites magnétiques, présentent un milieu plus favorable à la propagation des lignes de force que l'air lui-même.

En réalité, quelques lignes de force s'échappent latéralement des parties non recouvertes par le solénoïde et constituent des *dérivations magnétiques* à travers l'air, dont l'importance varie suivant la nature et les proportions relatives des différentes parties de l'électro-aimant.

63. **Bobines annulaires.** — Le circuit fermé d'un électro-aimant en fer à cheval fait concevoir la possibilité de créer un champ magnétique annulaire, dans lequel les lignes d'induction fermées sur elles-mêmes forment un faisceau ou flux de force curviligne, sans communication avec le dehors.

Il suffit d'enrouler un conducteur en hélice sur un anneau de fer doux (fig. 36); les lignes de force, étant en chaque point normales aux spires, se développeront suivant des cercles intérieurs à l'anneau.

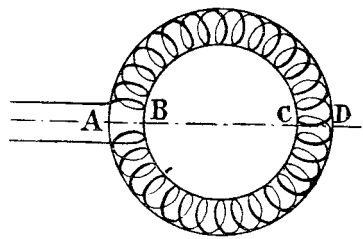


FIG. 36. — Bobine annulaire.

Un pareil système n'aura aucune action extérieure, mais si l'on vient à rompre l'anneau suivant un plan diamétral passant par l'intervalle des deux spires extrêmes, on constatera la présence des pôles magnétiques agissant, aux extrémités des deux demi-anneaux; ce qui démontre bien l'existence des lignes de force à l'intérieur de l'anneau, avant sa rupture.

64. **Intensité des champs galvaniques.** — 1° CHAMP D'UN COURANT RECTILIGNE. — Le champ magnétique créé par les courants est mis en évidence par l'expérience d'Œrstedt : *une aiguille aimantée placée dans le voisinage d'un fil parcouru par un courant tend à se placer dans une direction normale à ce courant.*

Si nous supposons un pôle magnétique (fig. 37) de valeur m placé en un point A voisin d'un circuit rectiligne indéfini XY, il est évident, d'après ce que nous avons dit sur le

champ magnétique développé par tous les points du circuit, que l'effort exercé par l'élément *ab* sur la masse *m*, sera dirigé suivant la tangente A F qui n'est autre chose que la direction au point A de la ligne de force A R M correspondant à l'élément *a b*. La force A F est nécessairement contenue dans le plan de la ligne de force perpendiculaire au plan X A Y qui passe par le conducteur et par la masse *m*. Quant à son sens, il est donné par la règle du tire-bouchon.

Tous les autres éléments tels que *c d*, du courant X Y, exercent aussi une certaine action suivant A F, ainsi qu'il résulte d'une loi de Laplace. Toutefois l'action due à l'élément *a b* situé à la plus courte distance, sur la perpendiculaire abaissée du point A sur le courant, est maximum : et les actions de divers éléments sont d'autant plus faibles que l'élément considéré est plus éloigné de *a b*.

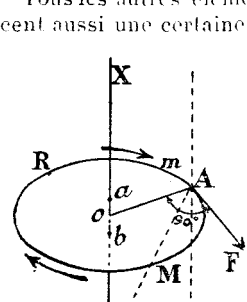


FIG. 37. — Action d'un courant rectiligne sur un pôle magnétique.

Quoi qu'il en soit, toutes ces actions élémentaires s'ajoutent pour former une résultante dirigée suivant A F.

La loi de Laplace et les expériences de Biot et Savart, conduisent à cette conséquence que la *force magnétique totale exercée sur le pôle unité par un courant rectiligne assez long pour que le reste du circuit n'ait qu'une influence négligeable sur un pôle voisin du milieu du fil, est proportionnelle à l'intensité du courant et inversement proportionnelle à la distance au conducteur.*

D'autre part, l'expérience permet d'établir que la force *f* exercée sur l'unité de pôle, placée à la distance de 1 centimètre du circuit rectiligne traversé par un courant de 1 ampère est égale à $\frac{1}{10}$ de dyne :

$$f = \frac{1}{10}.$$

la force pour un courant de *i* ampères, sur le pôle unité placé à une distance de *r* centimètres sera donc :

$$F_1 = \frac{1}{10} \times \frac{i}{r}$$

La force qui s'exercerait sur une masse de m unité serait

$$F_2 = \frac{1}{10} \times \frac{i}{r} \times m = \frac{m \times i}{10\,r}$$

D'ailleurs, la force F_1 est, par définition même, l'intensité du champ dû au courant rectiligne.

Ainsi l'intensité de champ d'un courant de 37,5 ampères, en un point du champ distant de 25 centimètres du fil, serait de :

$$F_1 = \frac{i}{10\,r} = \frac{37,5}{250} = 1,5$$

Et l'action F_2 sur un pôle m serait :

$$F_2 = 1,5\ m$$

Réciproquement, comme la réaction est égale et contraire à l'action, le pôle m exercerait sur le courant la même force F_2.

2° Champ d'un courant circulaire. — Considérons un courant passant dans un conducteur circulaire (fig. 38) et un pôle m, égal à l'unité situé sur la perpendiculaire élevée au centre du cercle.

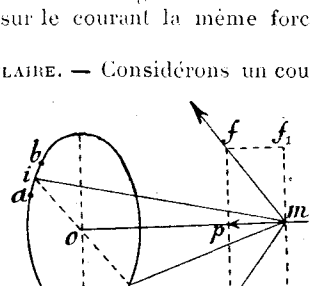


Fig. 38. — Action d'un courant circulaire sur un pôle magnétique.

D'après la loi élémentaire de Laplace, *chaque centimètre de longueur du circuit exerce sur* m *une action proportionnelle à l'intensité du courant et inversement proportionnelle au carré de la distance de* m *à cet élément*. Cette distance est d'ailleurs la même pour tous les éléments de la circonférence, et elle peut être représentée par les longueurs $m\,i$ ou $c\,m$ indistinctement.

Pour l'élément $a\,b$, cette force $m\,f$ est contenue dans le plan méridien $m\,i\,c$, perpendiculaire à l'élément, et elle est elle-même normale à la droite $m\,i$.

De même, l'élément symétrique en c exerce un effort $m\,g$. Si nous décomposons chacune de ces forces d'après la règle

du parallélogramme, en deux autres, l'une parallèle au plan du circuit, l'autre normale et dirigée suivant $m\,o$, nous remarquerons que les premières composantes telles que mf, mg, sont deux à deux égales et de sens contraires et se détruisent toutes ; quant aux composantes normales telles que $m\,p$, qui sont égales pour tous les éléments, elles s'ajoutent et constituent précisément l'intensité du champ magnétique au point m.

La *force totale* $m\,f$ due à l'élément $a\,b$ peut être représentée conformément à la loi de Laplace par :

$$m\,f \text{ ou } f = \frac{i}{10\,r^2}$$

le facteur $\frac{1}{10}$ ayant la même signification que précédemment.

Mais les deux triangles semblables $m\,f\,p$, $i\,m\,o$, montrent que le rapport de la force normale $m\,p$ à $m\,f$ est le même que celui du rayon $o\,i$ à la distance $m\,i = r$. Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{m\,p}{m\,f} = \frac{o\,i}{m\,i} \text{ ou } \frac{m\,p}{f} = \frac{a}{r}$$

en désignant par a le rayon du circuit.

Si, par exemple $\frac{a}{r}$ était égal à $\frac{2}{3}$, cela voudrait dire que $m\,p$ vaut les $\frac{2}{3}$ de f, ou que pour avoir $m\,p$ il faut multiplier par $\frac{2}{3}$ soit par $\frac{a}{r}$ d'une manière générale ; donc le champ p dû à l'élément $a\,b$ au point m sera :

$$p = f \times \frac{a}{r} \text{ ou } \frac{i \times a}{10\,r^2 \times r} = \frac{a \times i}{10\,r^3}$$

Comme, d'autre part, la circonférence contient $2\,\pi \times a$ centimètres de longueur, le champ total produit par le circuit entier au point m sera :

$$\mathrm{P} = 2\,\pi \times a \times \frac{a \times i}{10\,r^3} = \frac{2\,\pi \times a^2 \times i}{10\,r^3}$$

On peut remarquer que $\pi\,a^2$ n'est autre chose que la surface du cercle limité au circuit, et en désignant par S cette surface, on écrira :

$$P = \frac{2\,S \times i}{10\,r^3}$$

Pour $S = 10$ centimètres carrés,

— $i = 30$ ampères.

— $r = 8$ et $r^3 = 512$,

on aura :

$$P = \frac{2 \times 10 \times 30}{10 \times 512} = 0{,}117 \text{ dyne.}$$

Si la masse magnétique sur laquelle agit le courant était différente de 1 et égale m à unités, l'effort serait :

$$P = \frac{2\,\pi \times a^2 \times i}{10\,r^3} \times m$$

Réciproquement, l'effort subi par le circuit de la part du pôle m aura la même valeur que ci-dessus.

Si l'on considère le champ au centre même du circuit pour la distance $r = a$, la formule se simplifie et devient :

$$P = \frac{2\,\pi\,i}{10\,r}$$

Cette formule nous servira plus loin.

65. **Equivalence magnétique des aimants et des courants.** — Nous avons vu (§ 54) qu'un aimant placé dans un champ magnétique d'intensité égale à l'unité était soumis à un effort ou, plus exactement, à un couple mécanique mesuré par le moment magnétique de l'aimant :

$$M_1 = m \times l$$

Si le même aimant était plongé dans un champ de H unités; son moment serait H fois plus grand, soit :

$$M_2 = m \times l \times H$$

Si donc nous supposons cet aimant disposé en m, perpendiculairement à la ligne $o\,m$, il sera soumis de la part du courant C D à un moment égal à :

$$M_3 = \frac{2\,S \times i}{10\,r^3} \times m \times l = \frac{2\,S \times i}{10} \times \frac{m \times l}{r^3}$$

Remplaçons maintenant le circuit électrique par un petit aimant S N, de longueur égale à 1 centimètre (fig. 39), et cherchons quel couple mécanique il développerait sur l'aimant placé en m, en admettant que son axe soit dirigé suivant $o\,m$,

c'est-à-dire normalement à la position occupée primitivement par le circuit.

A cet effet, il suffira de déterminer la valeur du champ de l'aimant au point m. Pour cela, nous replacerons d'abord la masse égale à l'unité au point m, et nous admettrons que la distance $o\,m = r$ est assez grande pour que la longueur de l'aimant ne soit qu'une fraction relativement faible de cette distance.

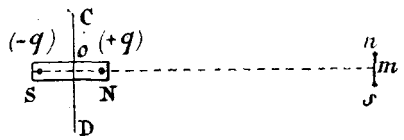


FIG. 39.— Action d'un petit aimant sur un pôle magnétique.

L'effort total développé entre l'aimant N S et la masse m se compose de la somme des actions des pôles de masse $(+q)$ et $(-q)$ de l'aimant N S sur cette masse m.

Or, d'après la loi de Coulomb, les actions de deux pôles magnétiques sont proportionnelles à leurs masses et inversement proportionnelles aux carrés de leurs distances.

D'où les actions respectives :

$$\text{de N sur } m = \frac{q \times m}{\overline{Nm}^2} = \frac{q \times m}{N^2}$$

$$\text{de S sur } m = \frac{-q \times m}{\overline{Sm}^2} = -\frac{q \times m}{S^2}$$

en désignant respectivement les distances Nm et Sm par N et S pour simplifier l'écriture.

La force totale F aura donc pour valeur :

$$F = \frac{q \times m}{N^2} - \frac{q \times m}{S^2}$$

Ce qui peut s'écrire :

$$F = q \times m \times \left(\frac{1}{N^2} - \frac{1}{S^2}\right)$$

d'après les règles de l'arithmétique.

Nous appliquerons les mêmes règles pour réduire au même dénominateur les deux fractions de la parenthèse et nous aurons :

$$F = q \times m \times \frac{S^2 - N^2}{N^2 \times S^2}$$

D'autre part, si nous désignons par r la distance $o\,m$ du milieu o de l'aimant à la masse m, nous voyons que les distances N et S en diffèrent de la demi-longueur de l'aimant; que par suite :

$$N = r - a \text{ et } S = r + a$$

en désignant par a cette demi-longueur.

La formule devient donc :

$$F = q \times m \times \frac{(r+a)^2 - (r-a)^2}{(r+a)^2 \times (r-a)^2}$$

Mais on peut simplifier cette formule en écrivant :

$$F = q \times m \times \frac{4\,a \times r}{(r^2 - a^2)^2}$$

Car en donnant à r et a des valeurs numériques quelconques, soit $a = 1$ et $r = 2$ par exemple, on voit que les deux fractions prennent exactement la même valeur, $\frac{8}{9}$ dans le cas actuel.

On peut encore écrire le dénominateur ainsi :

$$r^4 \times \left(\frac{r^2}{r^2} - \frac{a^2}{r^2}\right)^2 = r^4 \times \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)^2$$

car on ne change pas la valeur d'une fraction en multipliant et divisant les deux termes par une même valeur r^4 ou r^2 élevé au carré.

Or, la quantité $\frac{a^2}{r^2}$ ou $\frac{a}{r}$ élevée au carré est très petite, car pour la valeur $\frac{a}{r} = \frac{0.5}{10}$ par exemple, $\frac{a^2}{r^2}$ sera égal à $\frac{25}{10.000} = \frac{1}{400}$.

On peut donc négliger cette quantité comme tout carré de valeur fractionnaire, et le terme considéré se réduit à :

$$r^4 \times (1)^2 = r^4$$

D'où l'on a :

$$F = q \times m \times \frac{4\,a\,r}{r^4} = \frac{q \times m \times 4\,a}{r^3}$$

en supprimant une fois le facteur r en haut et en bas, comme le permet l'arithmétique.

Enfin, l'on peut encore écrire la formule :

$$F = 2 \times \frac{2a \times q}{r^3} \times m$$

Mais $2a$, c'est la longueur de l'aimant et $2a \times q$ est le moment magnétique; si nous le désignons par M, il vient :

$$F = \frac{2M}{r^3} \times m$$

Et si, comme nous l'avons supposé, la masse $m = 1$:

$$F = \frac{2M}{r^3}$$

sera la valeur du champ dû à l'aimant N S au point m.

Si maintenant nous replaçons en m le petit aimant sur lequel agissait précédemment le circuit électrique, il sera soumis à un couple mécanique de moment :

$$M_4 = \frac{2M}{r^3} \times m \times l = 2M \times \frac{m \times l}{r^3}$$

Comparons maintenant cette action à celle provenant du circuit électrique; nous voyons que les deux moments seraient égaux si l'on avait :

$$2M = \frac{2S \times i}{10} \quad \text{ou} \quad M = \frac{S \times i}{10}$$

Cela suppose que les termes $\frac{m \times l}{r^3}$ et en particulier que les valeurs de r^3 dans les deux formules sont égales. Or, dans le premier cas, r désigne l'oblique $m\,i$ (fig. 38), et dans le second la distance $o\,m$, mais on peut considérer ces deux longueurs comme sensiblement égales, si l'on suppose que le circuit électrique a un très petit diamètre.

66. Identification des courants et des feuillets magnétiques. — Comme on l'a démontré ci-dessus (§ 65), un circuit électrique très petit, de surface s, est équivalent à un aimant lui-même très petit, normal à son plan et dont le moment magnétique serait :

$$M = \frac{s \times I}{10}$$

Cette loi s'étend, d'ailleurs, à un courant circulaire de grand diamètre, car on pourrait remplacer son contour

par un nombre quelconque de circuits (fig. 40), tels que *a o c a*, si l'on divisait le cercle en quatre parties, et l'on verrait que les courants de tous les fils intermédiaires se détruisent deux à deux, qu'il ne reste plus que le courant du circuit extérieur; il en serait de même pour les circuits plus nombreux en pointillé.

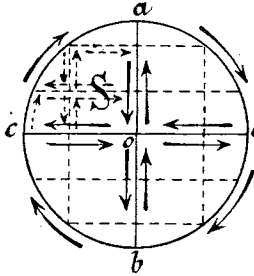


FIG. 40 — Équivalence des courants et des feuillets magnétiques.

Par conséquent, tous les courants élémentaires dont l'ensemble forme la surface S du circuit considéré, peuvent être remplacés par de petits aimants ainsi définis.

Nous pouvons même admettre que les courants élémentaires aient une surface *s* précisément égale à la section des petits aimants équivalents, de sorte qu'en définitive le circuit de surface S pourra être remplacé par un aimant de section égale et de moment :

$$M = \frac{S \times I}{10}$$

Si, comme nous l'avons admis dans notre démonstration, l'aimant élémentaire est très court et sa longueur $l = 1^c$ par exemple :

$$M = m \times l = m \times 1 = m$$

et l'on peut écrire :

$$m = \frac{S \times I}{10}$$

L'ensemble des petits aimants équivaut donc à un aimant plat de même contour que celui du circuit et d'épaisseur $l = 1$, dans le cas considéré.

On donne à des aimants de cette nature le nom de *Feuillet magnétique*.

Si l'on divise les deux membres par la section S, on aura :

$$\frac{m}{S} = \frac{I}{10}$$

Or, $\frac{m}{S}$ est ce qu'on appelle *la densité superficielle de l'aimant*, c'est la quantité de magnétisme répartie par unité de surface de la section extrême de l'aimant ; c'est aussi l'intensité d'aimantation A définie précédemment.

Ainsi, l'action d'un courant fermé est identique à celle d'un feuillet magnétique ou aimant plat de même contour dont l'épaisseur serait de 1 centimètre et dont l'intensité d'aimantation serait égale à $\frac{I}{10}$

Si l'épaisseur avait une valeur l différente de l'unité, l'intensité d'aimantation du feuillet équivalent devrait être égale à $\frac{I}{10\,l}$

Unité C G S d'intensité de courant. — Si, au lieu de prendre l'ampère pour unité d'intensité de courant, on choisissait une unité dix fois plus grande, le courant de I ampères contiendrait un nombre J des nouvelles unités dix fois plus petit et l'on aurait :

$$J = \frac{I}{10}$$

Ou, en remplaçant :

$$\frac{m}{S} = \text{densité} = A = J$$

ou encore dans le cas d'un feuillet d'épaisseur l :

$$A = \frac{J}{l}$$

L'unité d'intensité ainsi définie, qui permettrait d'exprimer l'aimantation d'un feuillet, en supprimant le coefficient $\frac{1}{10}$ est l'unité d'intensité dans le système C G S, *car c'est l'intensité d'un courant qui, agissant dans un arc de cercle de 1 centimètre de long et de 1 centimètre de rayon sur la masse magnétique unité située au centre du cercle, exerce sur cette masse une force de 1 dyne.*

Cette unité de courant est égale à 10 ampères, et réciproquement un ampère vaut $\frac{1}{10}$ d'unité C G S d'intensité.

67. **Champ intérieur d'un solénoïde.** — Le champ magnétique produit au centre d'un courant circulaire, a pour valeur, comme on l'a démontré plus haut (§ 64) :

$$P = \frac{2\pi \times I}{10\, r} = \frac{2\pi \quad J}{r}$$

formule dans laquelle r est le rayon du circuit.

Considérons maintenant un solénoïde de 1 centimètre de longueur, contenant n spires.

D'après ce que nous avons expliqué plus haut, on peut admettre que chacune des spires, vu le faible intervalle qui les sépare l'une de l'autre, agit de la même manière sur une masse m située à une certaine distance, autrement dit que l'action totale est égale à celle de l'une des spires multipliée par leur nombre.

Cet ensemble est évidemment équivalent à un aimant plat dont la densité superficielle serait égale à $n \times J$; un pareil aimant ayant une surface S égale à celle qui est limitée au contour de chaque courant, aurait deux pôles de masse :

$$m = n \times J \times S$$

Disposons maintenant un certain nombre de solénoïdes semblables au précédent, à la suite les uns des autres ; nous formerons ainsi un cylindre magnétique de longueur l, contenant n circuits ou spires par centimètre, soit en tout $n \times l$ spires.

L'ensemble pourra être assimilé à un chapelet d'aimants plats pourvus chacun de masses polaires égales et deux à deux opposées. Les pôles intermédiaires s'annulent, comme dans le corps d'un aimant ordinaire et il ne reste plus que les pôles extrêmes chargés de la masse :

$$m = n \times J \times S$$

Or, un pareil système magnétique rayonne un flux égal à $4\pi \times n \times J \times S$, et ce flux se développe suivant

un faisceau de forces parallèles à l'axe du cylindre et uniformément espacées à l'intérieur du solénoïde.

Le flux par unité de section, c'est-à-dire l'intensité du champ sera donc égal à :

$$H = 4\pi \times n \times I = 0.4\pi \times n \times I$$

Si l'on appelle N le nombre total de spires du solénoïde et l sa longueur en centimètres, on aura :

$$n = \frac{N}{l}$$

et la formule pourra s'écrire :

$$H = 0.4\pi \times \frac{N}{l} \times I = 1.25 \times \frac{N}{l} \times I$$

Quand le champ H est utilisé pour aimanter un barreau magnétique, on lui donne le nom de *champ magnétisant*.

68. **Ampère-tours.** — Le produit $N \times I$ s'appelle le nombre d'ampère-tours de la bobine; par suite, le produit $n \times I$ sera le nombre d'ampère-tours par centimètre ou le nombre d'*ampère-tours spécifique*.

On voit qu'on peut obtenir une quantité d'ampère-tours donnée d'un nombre infini de manières, soit avec un courant intense et peu de spires, soit avec un courant faible et beaucoup de spires. Ainsi l'on réalisera 100 ampère-tours par un courant de 50 ampères et 2 tours de spires, ou par un courant de 5 ampères et 20 tours, le produit des ampères par les spires étant toujours égal à 100.

Ces spires peuvent d'ailleurs être enroulées en une couche simple ou en plusieurs couches, le résultat sera toujours le même, pour un même nombre total de spires par unité de longueur.

69. **Variation de l'aimantation avec le champ magnétisant.** — Le champ magnétique d'un solénoïde fournit un flux total

$$N = 0.4 \times n \times I \times S$$

en désignant par S la surface limitée au contour d'une spire ou la section du cylindre électro-magnétique.

On voit qu'un pareil système permet d'obtenir des flux

variables, de telle valeur que l'on désire, en faisant varier I depuis o jusqu'à la valeur maximum compatible avec la conservation du conducteur, au point de vue de l'échauffement.

On remarquera également que ce flux se développe dans l'air, à l'intérieur du solénoïde, et que, par suite, l'air se laisse traverser par les lignes de force, contrairement à ce qui a eu lieu pour le flux du courant électrique, lequel éprouve de la part de l'air sec un obstacle insurmontable à sa propagation.

Si l'on place à l'intérieur d'un solénoïde un barreau de fer, celui-ci est traversé par les lignes de force du champ magnétisant et se transforme en aimant; l'ensemble prend le nom d'*électro-aimant*, comme nous l'avons dit plus haut, lorsque le noyau est en fer doux et qu'il ne conserve qu'une faible aimantation après la suppression du courant.

En faisant varier l'intensité du courant de la bobine ou *courant excitateur*, on fera varier proportionnellement le champ magnétisant ou *inducteur*, et l'on pourra étudier les variations correspondantes de l'aimantation du barreau.

Pour connaître à chaque instant la valeur du champ magnétisant, il suffit de lire les indications d'un ampèremètre intercalé dans le circuit : le champ inducteur est alors donné par la formule :

$$H = 1{,}25\, n \times I$$

dans laquelle I est le nombre d'ampères accusé par l'instrument.

Quant à l'intensité d'aimantation du barreau correspondante, on la constate à l'aide de méthodes de mesure appropriées, en étudiant l'action de l'un des pôles du barreau sur une aiguille aimantée.

On constate ainsi que, pour un même champ magnétisant, le fer doux prend une aimantation supérieure à celle de la fonte et surtout à celle de l'acier.

L'état physique du fer influe également sur l'intensité d'aimantation, le fer recuit est plus susceptible de s'aimanter que le fer écroui par le marteau ou l'étirage.

Les expériences précédentes permettent de dresser des tableaux indiquant, pour chaque intensité de champ magnétisant, la valeur de l'aimantation propre à chaque échantillon soumis à l'expérience.

On a l'habitude de représenter ces résultats par des courbes dont il est facile de comprendre la construction.

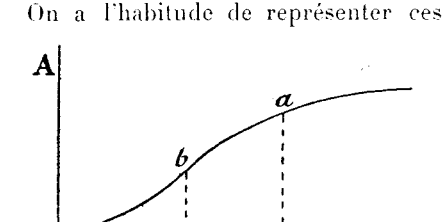


Fig. 41. — Courbe d'aimantation.

On trace (fig. 41) deux axes rectangulaires O *H* et O A, on porte sur O *H*, à partir de O, des longueurs représentant, à une échelle déterminée, diverses intensités du champ magnétisant et, au bout de chaque longueur, on élève une parallèle à O A représentant aussi à une échelle choisie, la valeur correspondante de l'aimantation.

Supposons, *par exemple*, que *pour une intensité de* champ de 500 unités on obtienne, pour un échantillon déterminé de fer doux, une aimantation de 1600 unités C G S d'aimantation. Si nous représentons les intensités de champ à une échelle de 1/2 centimètre par 100 unités et les intensités d'aimantation à l'échelle de 1 millimètre par 100 unités, le champ sera représenté par O h = 25 millimètres et l'aimantation par $h\,a$ = 16 millimètres.

Reproduisant la même construction pour les diverses valeurs de champ et les aimantations correspondantes, on obtiendra une série de points tels que *a*, que l'on pourra réunir par un trait continu, constituant ce qu'on appelle la *courbe d'aimantation* en fonction du champ magnétisant ou de la *force magnétisante H*. Les longueurs telles que O h sont aussi désignées sous le nom d'*abcisses*, et les longueurs analogues à $a\,h$ s'appellent *ordonnées*.

Etant donnée une pareille courbe, on pourra déter-

miner par une simple opération graphique l'aimantation correspondant à chaque champ inducteur, en mesurant sur l'épure les diverses ordonnées correspondant à chacune des abcisses.

Les courbes d'aimantation varient beaucoup suivant la nature des métaux et même en passant d'un échantillon à l'autre, mais elles conservent généralement une allure semblable à celle de la figure ci-contre.

Cette courbe montre que l'aimantation est d'abord très faible pour des champs magnétisants voisins de **0**, puis la courbe se relève indiquant une aimantation plus rapide et à peu près proportionnelle à l'intensité croissante du champ inducteur.

Au point *b* le sens de la courbure change: à partir de ce point d'inflexion, l'aimantation se ralentit, c'est-à-dire que les ordonnées croissent moins rapidement; plus loin pour des valeurs de *H* comprises entre 5 et 10 unités C G S, pour lesquelles la courbe présente un coude, l'accroissement des ordonnées devient de plus en plus faible.

Il semble donc qu'au fur et à mesure que l'intensité du champ devient plus considérable, le fer devient de moins en moins apte à emmagasiner une nouvelle quantité de magnétisme.

On dit alors que le barreau est voisin de son *état de saturation*.

On constate en effet que l'aimantation du fer doux est en moyenne de **1200** unités C G S pour les champs d'intensité voisine de 50 unités et que, pour des champs exceptionnellement intenses de **15.000** unités et au delà, les intensités d'aimantation maximum, correspondant par suite à la saturation, seraient pour le fer et l'acier de **1800** unités, pour la fonte de **1200**, et pour le nickel, qui est aussi doué de propriétés magnétiques, de **500** unités seulement.

Mais le point de saturation est pratiquement atteint pour une intensité de champ de **2000** unités C G S. Par exemple, un échantillon de fer prenant une aimantation de **1500** unités pour un champ égal à **600**, atteindra

seulement l'aimantation 1600 pour un champ de 12.000 unités.

On voit donc qu'il n'y a aucun intérêt pratique, au point de vue de l'aimantation, à employer des champs magnétisants de très grande intensité et qu'il faut s'en tenir aux champs correspondant à l'état voisin de la saturation, entre 500 et 2000 unités de force magnétisante.

Si même on ne cherche pas à obtenir le maximum d'aimantation dont le barreau est susceptible, on ne dépassera pas 20 unités de champ pour le fer doux, 30 pour la fonte et 50 pour l'acier trempé.

70. **Susceptibilité magnétique.** — En se limitant aux champs pratiques de faible intensité, on trouve que, lorsque le champ est voisin de l'unité, l'aimantation pour le fer doux est environ égale à 20, tandis que pour un champ de 2 unités, l'aimantation devient égale à 80.

Dans le premier cas, le rapport de l'aimantation au champ magnétisant est donc $\frac{20}{1} = 20$ et, dans le second, $\frac{80}{2} = 40$.

Ce rapport a reçu le nom de *susceptibilité magnétique* et on le désigne généralement par K, de sorte que l'on a :

$$K = \frac{A}{H}.$$

On voit que ce coefficient est faible pour les valeurs de H voisines de 0 ; puis il va en augmentant et atteint un maximum qui correspond au point d'inflexion b de la courbe d'aimantation.

Pour le fer doux, ce maximum de K se produit pour un champ magnétisant de 2.6 à 3 unités C G S, et il varie entre 150 et 300 environ.

A partir du maximum, et pour des valeurs croissantes de H, le rapport K va rapidement en décroissant, et tend vers 0 au fur et à mesure que le fer se rapproche de son point de saturation.

Avec l'acier, le maximum de K se produit pour une

valeur de H beaucoup plus grande, de 25 à 40 unités, et il atteint seulement des valeurs de 10 à 35, respectivement, pour l'acier dur et pour l'acier doux.

D'une façon générale, la susceptibilité et l'aimantation sont beaucoup moindres pour l'acier et la fonte que pour le fer doux.

71. **Retard à l'aimantation et à la désaimantation.** — Hystérésis. — Supposons que l'on soumette le fer à un cycle périodique d'aimantation, en le plaçant dans un solénoïde par-

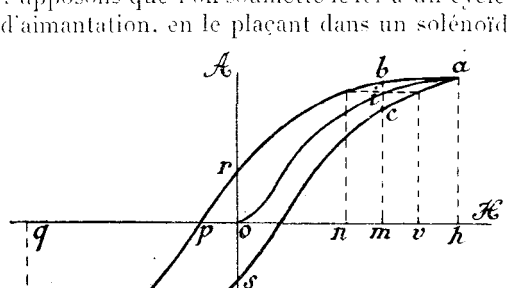


Fig. 42. — Courbe fermée d'un cycle d'aimantation.

couru par un courant progressivement croissant de 0 à 10 ampères par exemple, puis décroissant de 10^a à 0, changeant alors de signe, pour croître en sens inverse de 0 à 10 ampères; décroissant ensuite jusqu'à zéro pour augmenter de nouveau et revenir au point de départ.

L'aimantation suivra les mêmes variations d'intensité et de signe et les mêmes phases pourront se répéter indéfiniment, en constituant ce qu'on appelle une *période complète d'aimantaton* (fig. 42).

Soit *oh*, la force magnétisante correspondant à la saturation pratique du fer, en faisant varier le champ magnétisant de 0 à cette valeur *oh*, on obtiendra une première courbe partant du point o, et qui constituera la courbe d'aimantation correspondant à *l'état neutre* du fer, vierge au point de vue magnétique.

Faisons maintenant décroître le champ magnétisant de *oh* à **o** : pour une valeur intermédiaire *om*, on ne constatera plus la valeur *mi* d'aimantation trouvée précédemment, lorsque le champ *om* avait été atteint par accroissement, mais une aimantation *mb* supérieure.

A l'origine notamment, quand *H* sera devenu égal à **o**, l'aimantation ne sera pas nulle, mais elle sera représentée par l'ordonnée *or*. On obtient ainsi une courbe de désaimantation qui est constamment supérieure à la partie correspondante de courbe primitive *oa*.

Le champ prenant ensuite des valeurs négatives, au-dessous de o, que l'on porte à gauche de *oA*, l'aimantation s'annule pour une valeur de la force magnétisante *op*. Quand le champ a atteint une valeur *oq* égale et de sens inverse à *oh*, l'aimantation *qt* est aussi égale et de sens inverse à *ha*.

Si maintenant on fait décroître *H*, à partir de la valeur (— *oq*), la courbe d'aimantation *ts* enveloppera la courbe correspondante *tp* : puis, pour les valeurs de *H* croissant de **o** à *h*, on obtiendra une courbe *sa* enveloppée par la courbe *ra*.

En résumé, les courbes de désaimantation correspondant à des valeurs décroissantes positive ou négative de *H* enveloppent toujours les courbes d'aimantation données par des valeurs croissantes du champ.

On voit d'autre part que l'aimantation ne passe qu'une fois par la courbe *oa* ; elle suit, dès lors, deux courbes différentes pour l'aimantation et la désaimantation, dont l'ensemble constitue une courbe fermée, pour un cycle complet de variations magnétiques.

La forme de ces courbes et notamment la surface limitée à leur contour dépend de l'amplitude de la variation du champ magnétisant. *La courbe de plus grande surface correspond à la force magnétisante de saturation*. Pour des valeurs inférieures à cette force, la courbe d'aimantation est contenue tout entière dans le cycle de saturation.

Après une ou plusieurs oscillations entre les mêmes

limites égales et contraires du champ magnétisant, l'aimantation après avoir parcouru des courbes variables mais peu différentes, adopte définitivement une dernière courbe qu'elle suivra indéfiniment dans toutes les périodes subséquentes.

Si nous considérons, par exemple, la valeur *om* de la force magnétisante, à cette force correspondent trois ordonnées : *mi*, *mb* et *mc*. La première est relative à la période neutre, la seconde à la période décroissante du champ, la troisième à sa période croissante.

Ainsi, quand le champ décroissant devient égal à *om*, l'aimantation, qui aurait dû régulièrement décroître de *ha* à *mi*, est restée égale à *bm* et, pour retrouver la valeur primitive *mi*, il faut faire décroître le champ jusqu'à la valeur *on*. La désaimantation est donc en retard, par rapport à l'état neutre, sur la décroissance du champ.

De même, pendant la seconde période croissante, quand la force magnétisante atteint de nouveau la valeur *om*, l'aimantation n'est encore arrivée qu'à *mc*, et il faudrait pousser la force magnétisante jusqu'à *or*, pour retrouver l'aimantation primitive *mi* ; il y a donc encore retard de l'aimantation sur l'accroissement du champ.

C'est à ce phénomène de retard à l'aimantation et à la désaimantation, sur les variations correspondantes du champ magnétisant, que l'on a donné le nom d'hystérésis, mot grec qui signifie retard.

Les courbes d'hystérésis permettent de comparer aisément les différentes substances magnétiques au point de vue de leurs facultés d'aimantation.

On voit sur les deux courbes ci-contre (fig. 43), dont l'une (F) est relative à un échantillon de fer doux, et l'autre (A) concerne un barreau d'acier, que l'aimantation de saturation *sh* pour l'acier est moindre que celle *tm* pour le fer, et que ces aimantations extrêmes s'obtiennent pour des valeurs du champ plus élevées dans le premier cas, soit *oh* au lieu de *om*.

Les ordonnées *oa* et *oc*, qui correspondent à un champ inducteur nul, donnent la valeur de l'aimantation quand

le barreau est soustrait à l'influence du champ inducteur et constituent par conséquent ce que l'on appelle *le magnétisme rémanent*.

On voit qu'il est notablement plus élevé dans le fer que dans l'acier, mais on doit remarquer que ce magnétisme est fugitif dans le fer, tandis qu'il est beaucoup plus stable dans l'acier. Il suffit en effet d'un champ inducteur inverse de valeur *oi* pour annuler l'aimantation rémanente pour le fer, tandis qu'il faut donner au champ démagnétisant une valeur telle que *ok* pour annuler l'aimantation de l'acier.

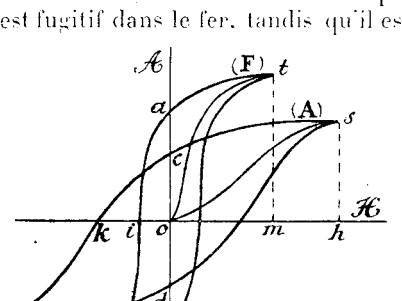


Fig. 43. — Comparaison des courbes d'aimantation.

Ces valeurs respectives *oi* et *ok*, des champs démagnétisants, prennent le nom de force coercitive ; elles doivent en effet être égales et de sens opposé à la cause qui maintient le magnétisme des aimants permanents.

D'une façon générale, le *magnétisme rémanent ou résiduel* des corps aimantés dépend de leur nature physique et chimique et aussi du rapport de leurs dimensions.

Le recuit diminue considérablement le magnétisme résiduel ; les opérations mécaniques telles que l'écrouissage, la traction, le martelage et la torsion, ainsi que la trempe tendent à l'augmenter.

La force démagnétisante des extrémités polaires, fait que la rémanence de l'aimantation dépend très nettement du rapport entre la longueur et le diamètre de l'aimant. Ainsi pour des barreaux de même nature, aimantés à saturation, pour lesquels le rapport de ces dimensions variait de 75 à 4, le magnétisme résiduel a passé de 700 à 40 unités.

Les aimants permanents tendent à perdre leur aiman-

tation progressivement. La diminution est assez rapide à l'origine de la fabrication, puis elle est de moins en moins rapide avec le temps.

Les hautes températures ont également pour effet de détruire l'aimantation; jusqu'à 700 degrés, l'élévation de température ne produit aucune variation sensible sur l'aimantation du fer; mais à partir de ce degré, les propriétés magnétiques disparaissent rapidement, et s'annulent complètement à 770 degrés; elles reprennent leur intensité primitive après refroidissement.

72. **Travail d'hystérésis.** — Que l'on aimante un barreau d'acier au moyen d'un aimant permanent ou par l'action d'un solénoïde, il y a dépense d'énergie, car, dans le premier cas, l'opérateur doit vaincre les forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre l'aimant inducteur et le barreau induit; dans le second cas, le courant qui développe le champ magnétisant du solénoïde représente une certaine quantité d'énergie électrique, que nous voyons utilisée en tout ou en partie pour aimanter le barreau soumis à l'induction.

L'aimantation de ce barreau a donc coûté un certain travail qui, en vertu de la conservation de l'énergie, doit être accumulé dans le barreau. On peut d'ailleurs considérer, comme en électricité, que les masses magnétiques m des pôles se trouvent portées à un certain potentiel correspondant à la situation même qu'elles occupent.

Pour évaluer le travail d'aimantation, reportons-nous à la définition du moment magnétique (§ 54). Un barreau aimanté placé perpendiculairement à la direction d'un champ magnétisant d'intensité H se déplace, pour venir se placer dans cette direction en produisant un travail égal à $m \times l \times H$ fig. 27.

Réciproquement, si le barreau était orienté suivant la direction du champ, il faudrait, pour l'écarter de cette position d'équilibre, dépenser un travail de même valeur $m \times l \times H$.

Supposons maintenant que le barreau, placé transversalement au champ magnétique, ne soit pas aimanté préala-

blement ; tant qu'il restera dans cette position, il ne sera pas traversé par les lignes de force du champ et ne manifestera aucune propriété magnétique ; mais si on le fait tourner pour l'amener dans la direction du champ, il s'aimantera et prendra une charge de magnétisme m, à chacun de ses pôles (fig. 44).

Il est permis d'imaginer que pendant ce mouvement, la charge des pôles s'est accrue progressivement de o à la valeur finale m, de telle sorte que la charge moyenne pendant le parcours complet a été de $\frac{m}{2}$

Or le travail correspondant au déplacement qui accompagne cette aimantation dans le champ d'intensité H est égal à : $\frac{m}{2} \times l \times H$

Telle est l'énergie dépensée et emmagasinée dans le travail d'aimantation quand le barreau (fig. 44), passe de la position XY à la position NS. Ce travail est emprunté au champ qui attire le barreau.

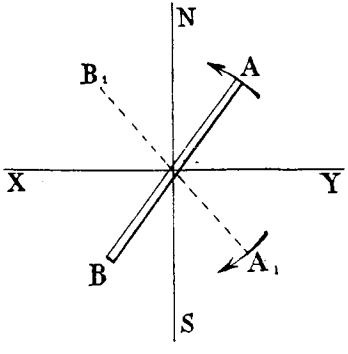


FIG. 44. — Travail d'aimantation d'un *barreau*.

Si maintenant nous ramenons le barreau dans la position primitive, il va perdre progressivement son magnétisme, mais en vertu de la force coercitive, il conservera encore un certain magnétisme rémanent en XY. Il s'ensuit que son magnétisme variera seulement de m à une valeur déterminée n différente de zéro et que la valeur moyenne du magnétisme pendant ce déplacement sera supérieure à $\frac{m}{2}$

Le travail qu'il faudra dépenser pour ramener le barreau en X Y sera donc plus grand que celui produit par le champ dans le travail précédent.

Si partant de la position X Y nous avions fait tourner le barreau en sens inverse, suivant la flèche A_1, l'aimantation se serait produite en sens contraire et aurait encore exigé un travail égal à

$$\frac{m}{2} \times l \times H$$

Par conséquent, la somme d'énergie développée par le champ pour produire deux aimantations égales et de sens inverse est égale à :

$$2 \times \frac{m}{2} \times l \times H = m \times l \times H$$

Tel serait le travail d'aimantation et celui de désaimantation qui complète le cycle, entre deux aimantations de signe contraire, sans la présence de la force coercitive ; mais celle-ci a pour effet d'augmenter le travail dépensé pour donner et faire perdre à l'aimant son potentiel magnétique, ainsi que nous l'avons dit plus haut.

73. **Evaluation du travail d'hystérésis pour les courbes d'aimantation.** — Il est facile de voir que ces différents travaux sont représentés par les diverses courbes d'hystérésis.

En effet, l'expression $\frac{m \times l \times H}{2}$ est le travail d'aimantation correspondant au volume total de l'aimant, lorsque l'on fait varier le champ inducteur de o à H (fig. 45), soit dans le sens positif oH, soit dans le sens négatif oX.

Le même travail par unité de volume sera donc :

$$\frac{1}{2} \times \frac{m \times l \times H}{V} = \frac{1}{2} \times \frac{m \times l}{S \times l} \times H$$

Or, d'après les règles de l'arithmétique, le facteur $\frac{m \times l}{S \times l}$ est égal à $\frac{m}{S}$, ce qui n'est autre que la densité superficielle magnétique, laquelle est égale à l'intensité d'aimantation A, ainsi que nous l'avons démontré plus haut.

L'expression du travail d'aimantation par unité de volume dans un champ d'intensité H se réduit donc à :

$$W = \frac{1}{2} \times A \times H$$

Considérons maintenant une valeur quelconque du champ croissant, représentée par oh; à ce champ correspond une aimantation ah, déterminée par la courbe d'hystérésis croissante D M.

Le travail d'aimantation est égal à :

$$W = \frac{1}{2} oh \times ha$$

c'est-à-dire qu'il est représenté par la moitié de l'aire du rectangle $ohan$.

Donnons maintenant au champ inducteur un accroissement très petit hp; l'aimantation deviendra pb, qui sera d'ailleurs très peu différent de ah, le travail d'aimantation correspondant à cette nouvelle valeur du champ sera :

$$W = \frac{1}{2} op \times pb$$

et il sera représenté par la moitié de l'aire du rectangle $ophi$.

En conséquence, la différence entre les aires des deux rectangles représentera, au facteur près $\frac{1}{2}$, le travail d'aimantation correspondant à l'accroissement élémentaire hp du champ magnétisant et il en sera de même pour toute autre valeur du champ H, tant pour le travail d'aimantation que pour celui de désaimantation.

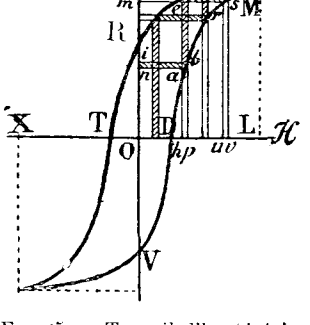


Fig. 45. — Travail d'hystérésis.

Ainsi les travaux élémentaires du cycle d'aimantation se composeront de couples de rectangles horizontaux et verticaux tels que $hpab$, $abni$, pour la courbe ascendante d'aimantation D M, et $hpec$, $ecdm$ pour la courbe de désaimantation descendante M R.

Considérons d'abord les rectangles verticaux dans chacun des systèmes ; ceux de désaimantation couvrent toute la surface O R M L, et ceux d'aimantation la surface D M L.

Chacun de ces derniers se retranche des premiers, $hpab$, par exemple, de $hpec$ et la différence $abec$ représente l'excès de travail dépensé pour l'aimantation.

La somme de tous ces rectangles différentiels constituera la surface O R M D de la courbe.

Les deux systèmes de rectangles horizontaux ont également pour différence la même surface intérieure de la courbe.

En définitive, le travail résultant serait représenté par les portions des rectangles verticaux et horizontaux qui recouvrent deux fois la surface considérée. Mais, en réalité, le travail relatif aux phases d'aimantation n'est que la moitié des surfaces représentatives, ainsi que nous l'avons exprimé au début de cette démonstration.

Nous écrirons donc en désignant par S l'aire comprise entre les courbes R M et M D, d'une part, et les axes O R et O D, d'autre part :

Travail d'aimantation absorbé par l'hystérésis, par centimètre cube de fer et par période :

$$W = \frac{1}{2} \times 2 S = S$$

Il est clair que tout se passera de même dans l'angle X O V; quant aux travaux de desaimantation correspondant aux courbes T R et V D, ils couvrent également deux fois les aires, O D V et O T R et représentent des travaux supplémentaires desquels ne se retranche aucun travail d'aimantation.

En résumé, l'excédent du travail de desaimantation sur le travail d'aimantation, qui constitue justement le travail d'hystérésis absorbé aux dépens de l'énergie du courant inducteur, est représenté par l'aire enveloppée par la courbe (fig. 45).

Si donc on a pu évaluer cette surface, le nombre de centimètres carrés obtenu représentera en ergs (§ 55) le travail d'hystérésis, pour chaque cycle d'aimantation, par centimètre cube du fer soumis à l'influence du champ magnétisant.

Cette surface serait assez difficile à calculer et nous donnerons plus loin des formules permettant d'évaluer le travail d'hystérésis. Mais si l'on se contente d'une première approximation, on remarquera que la surface de la

courbe (fig. 46) ne diffère pas très sensiblement de celle du rectangle construit sur le double du magnétisme rémanent oa et le double de la force coercitive ob.

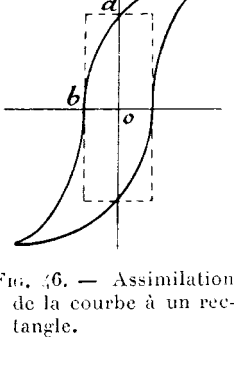


Fig. 46. — Assimilation de la courbe à un rectangle.

Cette dernière est voisine de 2,80 pour le fer doux et de 11 pour l'acier ; elle varie de 4 à 10 pour la fonte.

Pour un barreau de fer doux dont le magnétisme rémanent serait de 500. le travail d'hystérésis par cycle et par centimètre cube de fer serait de :

$$W = 500 \times 2 \times 2,8 \times 2$$
$$= 5.600 \text{ ergs.}$$

74. **Induction.** — Nous avons vu que lorsqu'un barreau de fer est placé dans un champ magnétisant d'intensité H, ce barreau prend une aimantation A, qui correspond à une quantité égale de magnétisme J développée par unité de section.

Il en résulte que le barreau aimanté rayonne à son tour un flux de force égal à $4\pi J$ par centimètre carré et, comme nous admettons que ce flux se ferme à l'intérieur du fer, nous en déduisons que le champ magnétique intérieur a une intensité égale à $4\pi J$.

D'autre part, si l'on mesure expérimentalement l'intensité de ce champ magnétique, on constate qu'il est supérieur à $4\pi J$, d'une quantité égale à la valeur du champ magnétisant H : de telle sorte que le champ à l'intérieur du fer n'est égal ni à celui d'un aimant permanent d'égale aimantation A soustrait à l'action du champ H, ni à ce champ H, mais qu'il prend une valeur :

$$B = H + 4\pi J.$$

Si, au lieu de considérer un barreau de fer non préalablement aimanté, nous placions dans le champ H un barreau d'acier, doué d'une telle force coercitive qu'il ait pu conserver entièrement son aimantation de saturation $A = J$,

son aimantation ne pourrait recevoir aucune augmentation par hypothèse, mais son champ fixe $4\pi J$, s'augmenterait de H.

Ainsi un aimant saturé sera traversé par les lignes de force du champ inducteur, exactement comme le serait l'espace d'air lui-même occupé par le corps de l'aimant.

Inversement, un barreau non préalablement aimanté sera d'abord traversé par les lignes de force du champ et en outre par les lignes de force correspondant à son aimantation (fig. 47). Tout se passe donc comme si le fer était plus perméable aux lignes de force que l'air environnant, de telle sorte que le flux semble se concentrer dans le fer, comme si ce milieu offrait aux lignes de force un passage moins résistant.

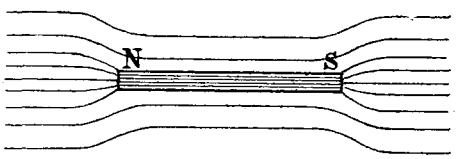


FIG. 47. — Flux d'induction.

La quantité B qui représente le flux de force par centimètre carré de section du fer, ou l'intensité de champ intérieur, est ce qu'on appelle l'*Induction*.

Le *flux d'induction* N, ou le nombre total de lignes de force, sera égal à $B \times S$ en désignant par S la section du barreau de fer et l'on aura :

$$N = B \times S = H \times S + 4\pi \times J \times S.$$

L'induction :

$$B = H + 4\pi \times J$$

peut se mettre sous une autre forme intéressante, en remarquant que

$$J = A = K \times H$$

ce qui donne :

$$B = H + 4\pi \times K \times H.$$

Cette expression est évidemment égale à :

$$B = H \times (1 + 4\pi \times K).$$

Cela signifie que le champ induit à l'intérieur du barreau s'obtient en ajoutant au champ inducteur H, un flux par centimètre carré $4\pi \times K \times H$, qui dépend directement de la susceptibilité.

La quantité $1 + 4\pi \times K$ a reçu le nom de perméabilité magnétique, et on la désigne généralement par la lettre grecque *mu* (μ) :

$$\mu = 1 + 4\pi \times K.$$

Si nous nous reportons aux valeurs de K, nous voyons que ce coefficient μ est essentiellement variable, et dépend non seulement de la nature et de la substance magnétique, mais encore de l'état de saturation de cette substance.

Pour un champ magnétisant H très faible, K est voisin de 0, ainsi que le terme $4\pi \times K$, et μ est voisin de 1 ; puis K augmente avec le champ magnétisant jusqu'à un maximum ; pendant cette période, μ croît rapidement et atteint en même temps sa valeur maximum.

A partir de ce moment, K va en décroissant et tend vers 0, pour des valeurs constamment croissantes de H. Pendant cette période, qui est celle de la saturation, B continue à croître, car $B = \mu \times H$, et si le facteur μ décroît, le facteur H augmente ; mais l'accroissement de B devient de plus en plus faible.

A la limite de saturation, pour $K = 0$, on a $\mu = 1$ et $B = H$, c'est-à-dire que le fer se comporte alors exactement comme l'air ambiant : que sa perméabilité est égale à celle de l'air.

Ainsi, dans le voisinage de la saturation, on ne gagne rien à la présence du fer dans le champ magnétisant, le champ induit n'étant pas sensiblement plus intense que dans l'air. Il s'ensuit également que les inductions intenses exigent des champs magnétisants hors de proportion avec les résultats obtenus, et qu'en pratique, il convient de s'en tenir aux valeurs moyennes que l'on obtient économiquement.

Si l'on adopte comme valeur maximum de la susceptibilité du fer doux, $K = 250$, on aura pour la valeur correspondante de μ :

$$\mu = 1 + 4\pi \times 250 = 3141$$

soit environ 3000 ; on peut donc dire que μ peut varier, pour le fer doux entre 3000 et 1 en moyenne.

On ne changera rien à l'expression $B = \mu \times H$ en divisant les deux membres par H :

$$\frac{B}{H} = \mu \times \frac{H}{H} = \mu.$$

Ce qui veut dire que *le coefficient de perméabilité μ n'est autre chose que le rapport entre l'induction et l'intensité du champ magnétisant :*

On peut considérer H comme représentant l'induction du champ magnétisant dans l'air, le rapport pour l'air serait donc :

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{H}{H} = 1.$$

Ainsi, en prenant la perméabilité de l'air pour terme de comparaison, on conviendra que la perméabilité de l'air est égale à 1, ou qu'elle est prise pour unité.

75. **Corps magnétiques et diamagnétiques.** — D'après ce qui précède, on voit que la perméabilité du fer est plus grande que celle de l'air et supérieure à 1, dans tous les cas.

C'est à cette circonstance qu'il faut attribuer l'augmentation du flux de force qui traverse le fer, par rapport à l'intensité du champ magnétisant tel qu'il existait antérieurement dans le milieu d'air occupé par le barreau. D'autres corps, tels que le nickel et le cobalt, ainsi que divers composés du fer, perchlorure, oxyde, sulfate de fer, présentent, quoique à un degré moindre, des propriétés analogues.

Ces corps étant tous plus perméables que l'air aux lignes de force magnétiques, se laissent traverser en grande quantité par le flux, et tendent à se placer dans la direction des lignes de force du champ magnétisant.

A côté de ces substances, il en est d'autres qui sont, au contraire, moins perméables que l'air, et les lignes de force du champ magnétisant tendent à les contourner plutôt qu'à les traverser suivant leur axe. Il en est ainsi du bismuth et de l'antimoine, notamment.

Tout se passe alors comme si la plus grande partie des lignes de force venant buter sur l'extrémité du barreau sans le pénétrer, celui-ci était repoussé au lieu d'être attiré; de telle sorte que, contrairement à ce qui se passe pour le fer, un barreau de bismuth se placera transversalement à la direction des lignes du champ magnétisant.

Ces corps ont reçu le nom de *diamagnétiques* par opposition à ceux qui se comportent à la manière du fer et qu'on dénomme corps *magnétiques*.

Si l'on place une sphère en substance diamagnétique dans un champ (fig. 48), les lignes de force s'écarteront dans le voisinage de cette sphère, de façon à ce que la densité du flux à l'intérieur du corps diamagnétique soit inférieure à celle du champ magnétisant.

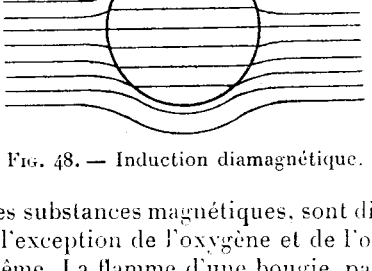


Fig. 48. — Induction diamagnétique.

La plupart des liquides, sauf les sels des substances magnétiques, sont diamagnétiques; les gaz, à l'exception de l'oxygène et de l'ozone, se comportent de même. La flamme d'une bougie, par exemple, placée entre les deux pôles d'un électro-aimant très puissant, est repoussée comme un corps diamagnétique, et peut être éteinte par le souffle magnétique du champ.

Les corps magnétiques sont caractérisés par cette condition que leur coefficient absolu K, par rapport à l'air, est plus grand que celui K_1 du milieu dans lequel ils sont plongés; si K_1 était au contraire supérieur à K, le corps considéré se comporterait comme un corps diamagnétique dans ce nouveau milieu.

Un corps peut donc être magnétique ou diamagnétique suivant le milieu dans lequel il est plongé, et les corps diamagnétiques ne sont tels que lorsqu'ils sont placés dans un milieu plus susceptible ou plus perméable, au point de vue magnétique.

Enfin, le coefficient de perméabilité relativement à l'air est plus grand que 1 pour les corps magnétiques et plus petit que 1 pour les corps diamagnétiques.

76. **Coefficient de susceptibilité relative.** — L'expression de l'induction d'un barreau de fer dans l'air est, comme nous l'avons vu :

$$B = \mu \times H = (1 + 4\pi K) \times H$$

Un autre milieu A, liquide ou gazeux, ayant une perméabilité μ_1 par rapport à l'air, prendrait pour un même champ magnétisant H, une induction :

$$B_1 = \mu_1 H = (1 + 4\pi K_1) \times H$$

Si maintenant nous plaçons le barreau de fer dans ce nouveau milieu, il prendra une induction différente de la première :

$$B_2 = \mu_2 H = (1 + 4\pi K_2) \times H$$

La quantité μ_2 sera la perméabilité du barreau relativement au second milieu; elle ne sera autre que le rapport entre les perméabilités respectives μ et μ_1 du fer et du milieu, relatives à l'air.

Supposons, en effet, que $\mu = 10$ et $\mu_1 = 5$, il est clair que le fer sera deux fois plus perméable que le milieu A; autrement dit, sa perméabilité par rapport à ce milieu est égale à $\frac{10}{5} = 2$ et d'une manière générale :

$$\mu_2 = \frac{\mu}{\mu_1}$$

A cette perméabilité μ_2 correspondra un certain coefficient de susceptibilité K_2 tel que l'on ait :

$$\mu_2 = 1 + 4\pi K_2$$

On pourra donc écrire :

$$1 + 4\pi K_2 = \frac{1 + 4\pi K}{1 + 4\pi K_1}$$

Or, les règles de l'arithmétique me permettent d'écrire

$$1 + 4\pi K_2 = \frac{1 + 4\pi K_2}{1}$$

et :

$$\frac{1 + 4\pi K_2 - 1}{1} = \frac{1 + 4\pi K - 1 - 4\pi K_1}{1 + 4\pi K_1}$$

ou, en simplifiant :

$$4\pi K_2 = \frac{4\pi K - 4\pi K_1}{1 + 4\pi K_1} = \frac{4\pi \times (K - K_1)}{1 + 4\pi K_1}$$

En supprimant le facteur 4π dans le premier et le dernier membre :

$$K_2 = \frac{K - K_1}{1 + 4\pi K_1}$$

et en remarquant que le coefficient de susceptibilité K_1 de toute substance autre que le fer est toujours un nombre très petit, de sorte que le diviseur $1 + 4\pi K_1$ diffère très peu de 1, l'on a :

$$K_2 = K - K_1$$

K_2 est ce qu'on appelle le *coefficient de susceptibilité relative*, c'est-à-dire le coefficient d'aimantation dans un milieu différent de l'air.

77. Variations numériques de la perméabilité. — La perméabilité varie comme la susceptibilité, dont elle dépend directement.

Elle varie, par conséquent, non seulement avec la nature du corps magnétique et d'un échantillon à l'autre des substances de même espèce, mais encore avec la valeur du champ inducteur et l'état de saturation du corps soumis à l'induction.

Nous avons indiqué plus haut le sens de la variation. D'autre part, il est très utile, dans l'étude des machines électriques, de connaître les valeurs du coefficient μ correspondant aux différentes intensités de champ inducteur.

Cette valeur dépend de deux quantités variables A et H, car elle est donnée par la formule :

$$\mu = 1 \times 4\pi K = 1 \times 4\pi \frac{A}{H}$$

Comme A est essentiellement variable avec H, il faudrait connaître pour chaque valeur de H, la valeur correspondante de A, et pour cela recourir aux tableaux d'expérience des ouvrages et aide-mémoire d'électricité, qui donnent, d'ailleurs, les valeurs de μ toutes calculées.

Mais on peut se passer de ces tableaux, en remarquant, comme le fait judicieusement observer Marcel Deprez, que pour les champs inducteurs les plus ordinairement employés dans la pratique, soit pour les valeurs de H comprises entre 200 et 1000 unités C G S, la valeur de A ne subit que des variations de peu d'importance. On peut donc, sans erreur sensible, attribuer à A, dans les limites précitées de H, la valeur 1500, s'il s'agit d'un barreau de fer doux.

Pour les valeurs de H supérieures à 1000 unités, et même au delà de 10.000, A se maintient aux environs de 1650 et c'est cette valeur qu'il faudra introduire dans la formule.

Calculons, par exemple, la perméabilité d'un barreau de fer doux expérimenté par Ewing et pour lequel les essais ont donné une intensité d'aimantation $A = 1680$ et une perméabilité $\mu = 6{,}81$, dans un champ $H = 3{,}630$.

Si nous n'avons pas sous les yeux le tableau de ces expériences, nous appliquerons la formule avec $A = 1650$ et nous obtiendrons pour le champ considéré :

$$\mu = 1 + \frac{4\pi \times 1650}{3{,}630} = 6{,}71$$

valeur très peu différente de celle trouvée expérimentalement.

Contrairement à ce qui a lieu pour l'aimantation, l'induction augmente indéfiniment avec l'intensité du champ inducteur, attendu que le flux induit se compose de deux parties : le flux d'aimantation qui atteint une limite de saturation laquelle ne peut être dépassée, et le flux du champ inducteur qui s'ajoute au champ induit quelle que soit son intensité.

Les inductions B, pratiquement utilisées dans les machines électriques, pour le fer, varient de 15.000 à 20.000 unités C G S, correspondant à des intensités de champ H respectivement égales à 30 et 700 lignes de force par centimètre carré.

Pour des champs très intenses de 10.000 C G S, l'induction dépasse 30.000. Enfin, en employant des champs

exceptionnellement puissants, on est arrivé à développer dans un échantillon de fer très doux une induction de 45.000 lignes de force par unité de section du barreau.

La perméabilité la plus grande se trouve dans le fer doux le plus pur, puis viennent, par ordre de perméabilité décroissante, les aciers doux, la fonte malléable et la fonte grise.

Le tableau ci-dessous, relatant des expériences faites entre des limites analogues de champ inducteur sur le fer et sur la fonte, permet de se faire une idée comparative des phénomènes d'induction dans ces deux natures de corps magnétiques.

Fer	$H = 3.630$	$\mu = 6,81$	$B = 24.741$
	$H = 10.840$	$\mu = 2,88$	$B = 31.323$
Fonte	$H = 3.900$	$\mu = 5,02$	$B = 19.658$
	$H = 10\,610$	$\mu = 2,41$	$B = 25.599$

78. **Evaluation du travail d'hystérésis par les courbes d'induction.** — Les valeurs variables de l'induction correspondant aux variations d'intensité du champ inducteur donnent lieu à des courbes d'hystérésis analogues à celle de l'aimantation. Ces courbes s'obtiennent en portant en abscisses les valeurs successives de H et en ordonnées les inductions qui s'y rapportent (fig. 49).

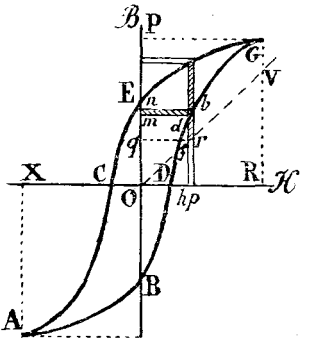


FIG. 49. — Travail d'hystérésis tiré des courbes d'induction.

Les courbes ainsi établies peuvent également servir à évaluer par leur surface l'énergie dissipée par hystérésis, ou le travail d'aimantation absorbé et transformé en chaleur dans la masse de fer soumise à l'induction.

La surface embrassée par les courbes d'induction est, en effet, proportionnelle sinon égale au travail d'hystérésis.

Rappelons que l'énergie absorbée par 1 centimètre cube de fer, prenant une aimantation A dans un champ H, a pour expression :

$$W = \frac{1}{2} A \times H$$

Nous avons d'autre part :

$$B = H + 4\pi A$$

Si nous comparons maintenant la courbe d'induction à la courbe d'aimantation, nous voyons que pour chaque valeur de H, l'ordonnée d'aimantation est A, tandis que l'ordonnée d'induction se compose de deux parties, l'une H égale à l'abcisse et la seconde qui n'est autre que A multiplié par le facteur 4π.

Ainsi pour $H = oh$, l'ordonnée hd comprend deux parties : $hf = H$ et $fd = 4\pi A$. On remarquera que le point f est sur le vecteur O V, à 45 degrés, passant par l'origine des axes.

Par analogie avec les constructions que nous avons faites dans le cas des courbes d'aimantation, nous voyons qu'à un petit accroissement hp de H correspond, sur les courbes d'induction, un système de deux rectangles hachurés $mnhd$, $hdhp$.

Mais il faut distinguer la partie simplement hachurée $hprf$ afférente à la fraction d'ordonnée H, et à la partie doublement hachurée qui correspond à la quantité $4\pi A$.

Il est évident qu'au retour, quand on fera décroître le champ de H à O, tous les petits rectangles tels que $hprf$ placés en dehors de la courbe se reproduiront exactement et s'annuleront deux à deux.

Il n'y a donc à s'occuper que des surfaces doublement hachurées. Or, celles-ci, comme celles des courbes d'aimantation, se réduisent finalement à l'aire comprise entre les courbes d'induction, comme on le démontrerait par un raisonnement identique.

Il suffit de remarquer d'ailleurs, que les bases des rectangles verticaux reposent toutes sur le vecteur O V et que tout se passe par rapport aux courbes d'aimantation, comme si l'axe O H avait tourné autour du point O pour venir en O V.

Mais les surfaces élémentaires qui composent l'aire considérée représentent les travaux d'aimantation successifs multipliés par 4π ; donc l'aire totale n'est autre que la surface des courbes multipliée par le même facteur. Réciproquement,

la surface de la courbe d'induction divisée par 4π donnera la valeur de l'énergie dissipée par l'hystérésis, pour chaque cycle et par centimètre cube du fer soumis à l'induction.

79. **Variation du travail d'hystérésis.** — Formules. — L'examen des courbes d'induction ou d'aimantation fait connaître que le travail d'hystérésis est d'autant plus important que le métal est doué d'une force coercitive plus intense; il montre aussi que ce travail déterminé par la surface, grandit avec le champ magnétisant, et devient maximum pour une induction correspondant à la saturation du fer.

L'énergie absorbée varie dans ces conditions extrêmes entre 10.000 et 15.000 ergs pour le fer et l'acier; elle atteint 217.000 ergs pour l'acier au tungstène.

La perte d'énergie ou énergie spécifique par $c\,m^3$ et par cycle peut être représentée par la formule :

$$W = a \times (\sqrt{1,9 \times B})^3$$

dans laquelle a est égal à 0,002 pour le fer doux et à 0,0045 pour la fonte grise; a peut d'ailleurs s'élever jusqu'à 0,008 et 0,009 pour l'acier.

Soit, par exemple, un barreau de fer doux recuit, soumis à une induction maximum $B = 10.000$; la perte d'énergie spécifique sera :

$$W = 0,002 \times (\sqrt{1,9 \times 10.000})^3 = 0,002 \times \overline{187,84}^3 = 5160 \text{ ergs.}$$

Si le barreau a un volume de 1000 centimètres cubes et s'il est soumis à des inductions alternatives de 100 périodes par seconde, la puissance totale absorbée sera de :

$$W = 5160 \times 1000 \times 100 = 516 \times 1.000.000 \text{ ergs}$$

ou encore :

$$W = \frac{51,6 \times 10.000.000}{10.000.000} = 51,6 \text{ watts}$$

énergie électrique qui se transforme en chaleur et dégage :

$$Q = 51,6 \times 0,24 = 13,38 \text{ calories}$$

Une règle empirique très simple, qui permet d'évaluer approximativement la perte d'énergie en ergs, sans tables ni calculs, lorsqu'il s'agit de fer doux, consiste à retran-

cher 5000 du chiffre de l'induction. Il est bien évident que cette règle n'est applicable que pour des inductions supérieures à 5000 ; en réalité, elle ne donne de résultats à peu près exacts qu'au delà d'une induction de **8000** unités.

80. **Formule du circuit magnétique.** — En nous reportant aux considérations développées sur le flux des aimants (§ **53**) ; nous sommes conduits à admettre que les lignes de force se propagent à travers les milieux du champ, en vertu d'une différence de potentiel ou de niveau magnétique, entre les extrémités des tronçons de ligne considérés.

Par exemple, une masse magnétique $m = 1$, se déplaçant du pôle positif au pôle négatif d'un aimant de longueur l, dans le champ d'intensité H développé par cet aimant, produit un travail ou accomplit une chute qui, par définition même, représente la différence de potentiel des deux pôles, par analogie avec la masse électrique unité, se déplaçant du pôle positif au pôle négatif d'une pile. Ce travail ou cette différence de potentiel V a donc pour mesure :

$$V = H \times l.$$

Inversement on peut dire que les lignes de force qui ont entraîné la masse m, comme si elles se propageaient du pôle Nord au pôle Sud, se sont développées sous l'action de la différence de potentiel V.

Si, au lieu d'un aimant, il s'agit d'un barreau de fer doux soumis à l'induction, le flux de force qui se propage à travers ledit, par centimètre carré de section, est :

$$B = \mu \times H = \frac{N}{S}$$

en désignant par N le flux total passant dans la section S du barreau.

En divisant les deux derniers termes de ces égalités par μ, on obtient :

$$H = \frac{1}{\mu} \times \frac{N}{S}$$

Et portant cette valeur de H dans la formule du potentiel :

$$V = \frac{l}{\mu} \times \frac{N}{S} = \frac{l}{\mu \times S} \times N$$

Sous cette forme, on est immédiatement frappé de l'analogie que présente cette relation avec celle de la loi d'Ohm en électricité.

Le facteur $\frac{1}{\mu}$, qui est l'inverse de la perméabilité, représente le coefficient de résistance magnétique ou de *reluctance;* on lui donne aussi le nom de *reluctivité*, par comparaison avec le coefficient de résistance électrique ou *résistivité.*

La reluctivité se représente par la lettre grecque *nu* (ν), d'où :

$$\nu = \frac{1}{\mu};$$

On aurait de même, en désignant par *gamma* (γ) la conductibilité électrique :

$$r = \frac{1}{\gamma}$$

l est la longueur du circuit magnétique considéré, à travers le barreau de fer ; S est la section du circuit offerte au flux de force, quantités analogues à la longueur et à la section d'un conducteur électrique ; enfin N est le flux de force comparable au flux d'électricité du courant électrique :

Le terme $\frac{l}{\mu \times S}$, dans son ensemble, est semblable au terme :

$$\frac{l}{\gamma \times S} = \frac{1}{\gamma} \times \frac{l}{S} = r \times \frac{l}{S}$$

qui constitue la résistance d'un circuit électrique, c'est la *réluctance* du circuit magnétique :

$$R = \frac{l}{\mu \times S}$$

D'où :

$$V = \frac{l}{\mu \times S} \times N = R \times N$$

Cette expression constitue la formule du circuit magnétique, elle est tout à fait comparable à celle d'Ohm.

$$E = r \times \frac{l}{S} \times I = R \times I$$

Finalement, on voit que la quantité V joue vis-à-vis du circuit magnétique et du flux qui le traverse le même rôle que E vis-à-vis du conducteur et du courant électrique : E est la différence de potentiel électrique ; V sera donc, comme nous l'avions admis *a priori*, la différence de potentiel magnétique.

Ces analogies permettent de traiter les circuits magnétiques comme ceux électriques, et de leur appliquer des lois analogues aux lois d'Ohm et de Kirchhoff, comme nous le verrons tout à l'heure.

Il faut toutefois remarquer que l'assimilation ne saurait être complète : en effet, d'une part, le flux de force ne comporte pas le transport continu de masses magnétiques, comme le flux électrique qui donne lieu à un courant permanent de masses électriques ; d'autre part, la résistance d'un conducteur électrique, pour une même température, est constante, quelle que soit l'intensité du courant ; au contraire, la résistance ou reluctance du circuit magnétique varie avec l'intensité du flux, car cette résistance augmente et tend à devenir égale à celle de l'air, lorsque le fer est arrivé à l'état de saturation.

81. **Force magnéto-motrice.** — En construisant un anneau fermé avec un barreau aimanté, on obtient un circuit magnétique circulaire qui ne manifeste aucune action extérieure, bien qu'il soit plus ou moins saturé de lignes de force intérieures. Les lignes de force circulaires peuvent être développées dans l'anneau de fer doux en l'enroulant d'un solénoïde (§ 63).

Un pareil circuit magnétique est analogue au circuit fermé d'une pile. Si l'on considère ce dernier circuit dans

son ensemble, on n'a plus à envisager des différences de potentiel partielles, mais la somme de ces diverses chutes qui constitue la force électro-motrice de la pile.

De même, dans un circuit magnétique annulaire et fermé, nous admettrons que la propagation des lignes de force est due non à une simple différence de potentiel, mais à une cause totale à laquelle, par analogie, nous donnerons le nom de *force magnéto-motrice*.

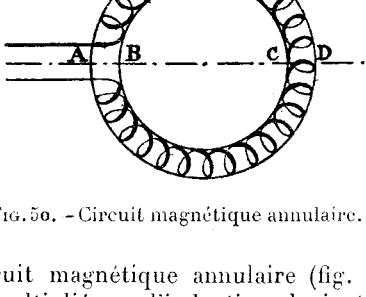


Fig. 50. - Circuit magnétique annulaire.

Nous savons que l'intensité du champ intérieur développé par un solénoïde a pour expression :

$$H = 0{,}4\pi \times \frac{N}{l} \times I.$$

Si nous appliquons cette formule au circuit magnétique annulaire (fig. 50), le champ intérieur multiplié par l'induction devient :

$$B = \mu \times H \times 0.4\pi \times N \times I \times \frac{\mu}{l}$$

Et comme $B = \frac{N}{S}$:

$$\frac{N}{S} = 0.4\pi \times N \times I \times \frac{\mu}{l}$$

Multipliant les deux nombres par $\frac{l}{\mu}$, on obtient :

$$\frac{l}{\mu \times S} \times N = 0.4\pi \times N \times I$$

Si l'on rapproche cette relation de la formule du circuit magnétique

$$\frac{l}{\mu \times S} \times N = V,$$

on voit que la quantité $0{,}4\pi \times N \times I$ joue le même rôle que la quantité V ; c'est donc la différence de potentiel

totale ou force magnéto-motrice qui agit dans le circuit annulaire pour y développer le flux N.

Ainsi la force magnéto-motrice produite par un solénoïde, dans un circuit magnétique, est égale au nombre d'ampère-tours multiplié par le facteur $0{,}4\ \pi$.

Cette force magnéto-motrice ne dépend donc nullement ni de la longueur l du solénoïde, qui se confond ici avec la longueur moyenne de l'anneau de fer, ni de la section du fer, ni de sa perméabilité, ni même de la forme du circuit, car nous serions arrivés au même résultat en considérant un électro-aimant droit de longueur l, recouvert de spires sur toute sa longueur.

Remarquons toutefois que dans ce dernier cas, on ne pourrait admettre, comme nous l'avons fait implicitement, que le flux N est constant dans toutes les parties du barreau, car vers les extrémités polaires le flux va en divergeant, et un certain nombre de lignes de force s'échappent, *ou dérivent*, comme on dit, dans l'air, avant d'arriver à l'extrémité du fer.

Dans le cas du circuit fermé et recouvert uniformément de spires, le flux reste entièrement canalisé dans le solénoïde sur tout le parcours de l'anneau, et il ne se produit aucune dérivation magnétique extérieure.

Nous avons admis jusqu'à présent que le solénoïde enroulé autour de l'anneau fermé recouvrait uniformément toute la surface de l'anneau, de telle sorte que l'enroulement présentait le même nombre de spires par unité de longueur.

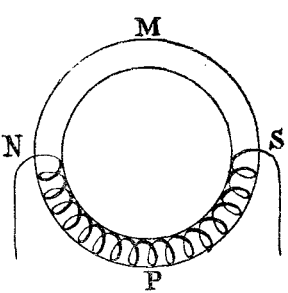


FIG. 51. – Demi-enroulement annulaire.

Supposons maintenant que le solénoïde soit enroulé seulement sur la moitié de l'anneau (fig. 51), qui portera alors la totalité des spires, ou deux fois plus de spires par unité de longueur. La force magnéto-motrice ne dépen-

dant, ainsi qu'il est dit plus haut, que du nombre total des spires, sera toujours égale à $0{,}4 \times N\,I$.

Cependant les choses ne se passeront pas tout à fait comme dans le cas précédent : le flux N, qui prend naissance à l'intérieur du solénoïde, suivra exactement le circuit magnétique jusqu'aux extrémités de l'enroulement. Mais à l'issue, en N et S, un certain nombre de lignes de force sont dérivées à travers l'air, de sorte qu'en réalité, le flux intérieur dans la partie NMS du circuit magnétique est moindre que dans la moitié inférieure de l'anneau.

Ce n'est donc qu'en négligeant les dérivations précitées que nous pourrons écrire, pour le circuit fermé tout entier :

$$0{,}4\,\pi \times N \times I = \frac{l}{\mu \times S} \times N$$

Tout se passe comme si le circuit NMS était soumis à ses deux extrémités, N et S, à une différence de potentiel qui détermine un flux de lignes de force de N vers S (fig. 52). Mais il ne faut pas oublier que l'air est relativement perméable aux lignes de force, et qu'une faible partie au moins du flux se propagera à travers ce milieu. Il en serait de même, si un circuit électrique présentant à ses deux extrémités N et S une certaine différence de potentiel était plongé dans un milieu conducteur, tel que l'eau acidulée : il se produirait des courants dérivés à travers le liquide ambiant ; il n'en serait pas de même dans l'air sec qui offre un obstacle presque insurmontable au passage de l'électricité.

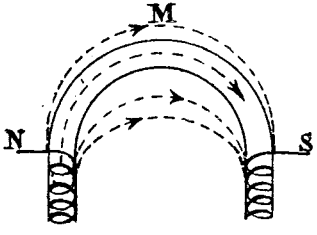


Fig. 52. — Dérivations magnétiques.

82. Circuit magnétique ouvert. — Il y a lieu maintenant de considérer le cas où le circuit de fer n'est pas fermé et présente même plusieurs tronçons séparés.

A cet effet, reprenons le solénoïde droit, dans lequel nous introduirons un barreau de fer de longueur l, mais coupé en deux tronçons séparés par une distance e (fig. 53).

Avant que les deux parties aient été séparées, la différence de potentiel aux deux extrémités était :

$$V = \frac{l}{\mu \times S} \times N = R \times N$$

Formule dans laquelle l'expression $\frac{l}{\mu \times S}$ représente la reluctance des deux tronçons de fer jointifs,

La formule est dès lors incomplète, car il faut nécessairement ajouter à V la différence de potentiel nécessaire pour faire franchir au flux N l'intervalle d'air e, entre les deux pôles intermédiaires B et A.

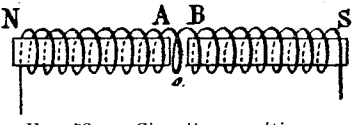


FIG. 53. — Circuit magnétique ouvert ou interrompu.

Cette force magnéto-motrice additionnelle sera :

$$v = \frac{e}{S} \times N$$

en remarquant que la perméabilité du circuit d'air est égale à 1, et que le flux qui passe dans l'intervalle e est le même que dans toute autre section de l'enroulement. En effet, le champ inducteur H est constant sur toute la longueur du solénoïde, et les lignes de forces propres à l'aimantation des barreaux passent directement du pôle A au pôle B, sans pouvoir s'épanouir en dehors, si, comme nous le supposons, l'écart des pôles intermédiaires est petit par rapport à l'épaisseur du barreau.

La somme des différences de potentiel, à laquelle nous pouvons donner par extension le nom de force magnétomotrice sera donc :

$$V + v = \frac{l}{\mu \times S} \times N + \frac{e}{S} \times N$$

ou, comme l'arithmétique permet de l'écrire :

$$V + v = \left(\frac{l}{\mu \times S} + \frac{e}{S} \right) \times N.$$

Nous passerons aisément de l'électro-aimant droit au circuit annulaire en recourbant les barres, de manière à ramener les pôles N et S en contact, tout en maintenant la rupture e : nous aurons alors pour la force magnéto-motrice proprement dite :

$$V + v = 0{,}4\,\pi\,N\,I = \left(\frac{l}{\mu \times S} + \frac{e}{S} \right) \times N$$

Enfin nous pouvons prendre un anneau interrompu, portant un solénoïde enroulé d'une manière quelconque et la même formule sera toujours applicable, à condition que l'on puisse négliger les dérivations magnétiques, soit le long du fer nu, soit au passage des lignes de forces dans l'intervalle d'air, ou *entrefer* (fig. 54).

Dans tous les cas la force magnéto-motrice est simplement égale à $0{,}4\,\pi\,N\,I$ et cette force se répartit entre les diverses chutes de potentiel qui s'étagent sur le circuit.

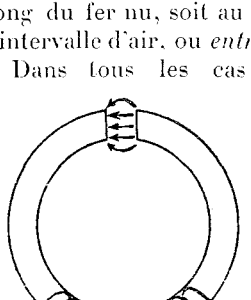


Fig. 54. — Circuit annulaire ouvert.

Comme ces chutes partielles dépendent du flux qui passe dans les divers tronçons du circuit, en même temps que de la nature, de la perméabilité et des dimensions de chacun d'eux, la formule générale applicable à un circuit complet non homogène, sera la suivante :

$$0{,}4\,\pi\,N\,I \text{ ou } 1{,}25\,N\,I = \frac{l_1}{\mu_1 \times S_1} \times N_1 + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} \times N_2 + \frac{l_3}{\mu_3 \times S_3} \times N_3.$$

83. **Circuit complexe**. — Considérons, par exemple, un circuit magnétique tel que celui de la figure 55, dans lequel la partie inférieure A M B est constituée par un barreau de fer de section S_1 uniforme sur toute sa longueur ; la partie supérieure A N S B est en fonte et comporte deux expansions

polaires N et S de section S_3; enfin l'entrefer d'épaisseur e présente la même section S_3.

Ce circuit complexe doit être traité comme un circuit électrique, dans lequel, d'après la seconde loi de Kirchhoff, la force électro-motrice totale est égale à la somme des différences de tensions successives réparties sur la totalité du circuit; nous écrirons donc de même :

$$1{,}25\,N \times I = \frac{l_1}{\mu_1 \times S_1} \times N_1 + 2\,\frac{l_2}{\mu_2 \times S_2} \times N_2 + 2\,\frac{l_3}{\mu_3 \times S_3} \times N_3 + \frac{e}{S_3} \times N_4$$

S'il n'y avait pas de dérivations à travers l'air, à partir des extrémités du solénoïde, le flux serait le même dans toutes les parties du circuit et l'on pourrait le mettre en facteur commun :

$$1{,}25\,N\,I = (R_1 + 2\,R_2 + 2\,R_3 + R_4) \times N_1$$

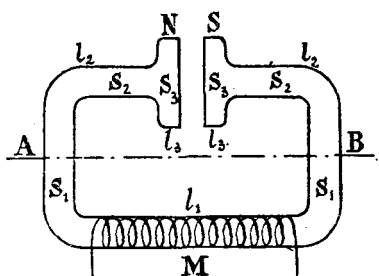


FIG. 55. — Circuit magnétique complexe.

On peut simplifier ces formules en remarquant que chacun des termes du second membre correspond à une certaine fraction de la force magnéto-motrice totale $1{,}25\,N \times I$; c'est-à-dire qu'à chaque expression telle que $R_1 \times N_1$ correspond un certain nombre d'ampère-tours $n_1 \times I$ multiplié par le facteur 1,25 :

$$1{,}25\,N \times I = 1{,}25 \times (n_1\,I + n_2\,I + n_3\,I + \text{etc.}).$$

ou en désignant chaque terme tel que $n_1\,I$ par t_1 pour simplifier :

$$1{,}25\,N \times I = 1{,}25 \times (t_1 + t_2 + t_3 + \ldots)$$

Nous pourrons donc écrire, en ce qui concerne le premier tronçon par exemple :

$$1{,}25\,t_1 = \frac{l_1}{\mu_1 \times S_1} \times N_1 = \frac{l_1}{\mu_1} \times \frac{N_1}{S_1}$$

Mais $\frac{N_1}{S_1}$ n'est autre que l'induction B_1, d'où, en divisant

les deux membres par 1,25 :

$$l_1 = \frac{l_1}{1{,}25\ \mu_1} \times B_1 = l_1 \times \frac{B_1}{1{,}25\ \mu_1}$$

Nous aurions de même :

$$l_2 = l_2 \times \frac{B_2}{1{,}25\ \mu_2}$$

Or les quantités $\frac{B_1}{1{,}25\ \mu_1}$, $\frac{B_2}{1{,}25\ \mu_2}$, etc., sont ce qu'on appelle les ampère-tours spécifiques, c'est-à-dire le nombre d'ampère-tours nécessaire pour produire une induction B ou densité de flux donnée, dans un circuit déterminé, dont la longueur est égale à 1 centimètre.

On trouve dans les ouvrages[1] des tableaux donnant les valeurs numériques de ces quantités, pour des inductions variant de 1000 à 20.000 C G S.

Nous reproduisons seulement quelques-uns de ces chiffres :

	Ampères-tours spécifiques.		
Induction B.	Acier.	Fonte.	Fer forgé.
—	—	—	—
5.000	4.000	8	1,6
10.000	8.000	150,4	4,0
15.000	—	—	22,8

Exemple numérique. — Soit un circuit analogue à celui de la fig. (55), dont l'entrefer a 2 centimètres d'épaisseur, avec une induction $B = 5000$; le circuit de fer, 90 centimètres de longueur, avec une induction de 15.000 ; les pièces polaires en fonte, une épaisseur de 20 centimètres et une induction de 10.000.

Il suffira de chercher dans le tableau le nombre d'ampère-tours spécifiques afférant à chaque tronçon induit et de multiplier ces chiffres respectivement par les longueurs des tronçons correspondants ; on aura ainsi :

[1] Hospitalier, *Industrie électrique*, t I, p, 82.

	Induction B	ampère-tours spécifiques	longueur en centimètres	nombre total des ampère-tours
	—	—	—	—
Entrefer . . .	5000	4000	2	8000
Circuit de fer .	15.000	22,8	90	2052
Circuit de fonte .	10.000	150.4	20	3008
			TOTAL . .	13.060

Il faudra donc 13.060 ampère-tours, pour produire dans chacune des parties du circuit l'induction B nécessaire.

On voit que c'est l'entrefer ou le circuit d'air qui exige la plus grande partie des ampère-tours ou de l'*excitation*. Il conviendra donc de réduire le plus possible l'épaisseur de cet entrefer ainsi que la valeur de l'induction y relative, en augmentant la section ou la surface des pièces polaires.

On remarque en même temps l'avantage que présente le fer sur la fonte, qui pour une induction et une longueur de circuit moindre exige une excitation beaucoup plus grande. Cette observation montre aussi la nécessité de réduire l'induction dans la fonte et, pour cela, d'augmenter la section des parties du circuit formées de ce métal.

84. Dérivations magnétiques. — Les lois de Kirchhoff sont applicables aux dérivations magnétiques comme aux dérivations électriques.

En conséquence : *1° Le flux passant dans un tronçon principal est égal à la somme des flux dans les tronçons dérivés ;*

2° Le flux se répartit dans les diverses branches de dérivation, en raison inverse des reluctances de chacune d'elles.

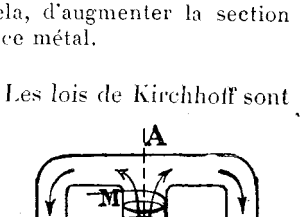


FIG. 56. — Circuits magnétiques dérivés.

Dans le circuit ci-contre (fig. 56), le flux N, qui émane du noyau M N, se divise en deux flux dérivés, N_1 et N_2 dans les branches C et D, et l'on a :

$$N = N_1 + N_2,$$

Si les reluctances des deux tronçons dérivés A C B et A D B sont égales, les flux se partagent également, et de telle sorte que $N_1 = N_2$.

La différence de potentiel magnétique entre les extrémités M N du solénoïde excitateur étant égale à 0.4π N I, on écrira comme dans le cas du circuit électrique :

$$0{,}4\pi \,\mathrm{N\,I} = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} \times N_1 = \frac{l}{\mu_2 S_2} \times N_2$$

ou

$$0.4\pi \,\mathrm{N\,I} = R_1 N_1 = R_2 N_2.$$

Si $R_1 = R_2$, il il est clair que $N = N_2$ d'après ces égalités.

Remarquons que les diverses spires du solénoïde excitateur peuvent être assimilées aux éléments d'une batterie de pile en tension, car la différence de potentiel entre ses deux extrémités est la somme des différences accumulées d'une spire à l'autre. Les différences de potentiel magnétiques sont réparties de même, de M en N, de telle sorte que, par exemple, la force magnéto-motrice entre la section M et la section médiane *c d* sera la moitié de la force électro-motrice totale, soit : $0{,}2\pi$ N I.

85. **Dérivations dans le circuit d'une machine électrique.** — Appliquons ces observations à un circuit magnétique tel que celui représenté ici (fig. 57) que l'on trouve fréquemment dans les machines électriques ou dynamos.

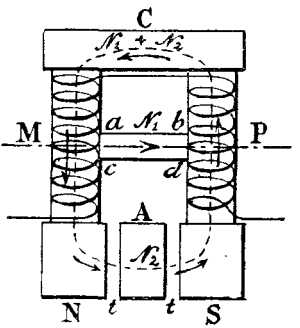


Fig. 57. — Circuit magnétique des dynamos.

Il se compose de deux noyaux M et P recouverts de solénoïdes inducteurs; d'une pièce C qui les relie par en haut et qui est désignée sous le nom de *Culasse;* de deux pièces polaires N et S et d'une armature A séparée des deux pôles par deux intervalles d'air ou entrefers *t*, Si N est le nombre total des spires des deux solénoïdes, la

force magnéto-motrice sera égale en totalité à $0{,}4\,\pi\,N\,I$, et c'est celle qui s'exercera dans le circuit C M A P C. Si maintenant nous ajoutons une branche *a b c d* à mi-hauteur des noyaux, nous déterminerons deux autres circuits partiels C M P C, M A P M.

Dans ces derniers circuits, la force magnéto-motrice qui agit n'est plus que $0{,}2\,\pi\,N\,I$.

Nous voyons également que le flux qui prend naissance dans les électros, à l'intérieur des solénoïdes, se bifurque en M et donne deux flux dérivés, l'un N_1 passant suivant M P, l'autre N_2 qui passe dans le circuit inférieur. Ces deux flux se réunissent en P, dans le circuit supérieur qui est traversé par la somme $N = N_1 + N_2$.

La deuxième loi de Kirchhoff appliquée au circuit total et à l'un des circuits partiels, le supérieur par exemple, donnera les relations suivantes, en désignant par :

R_1 la résistance du parcours M C P, ainsi que celle de M A P, déduction faite des entrefers, qui lui est sensiblement égale;

R_2 la résistance des entrefers;

R_3 la résistance du bras de dérivation;

Pour le circuit partiel M C P M;

$$0{,}2\,\pi\,N\,I = R_1 \times (N_1 + N_2) + R_3 \times N$$

Pour le circuit total C M A P C :

$$0{,}4\,\pi\,N\,I = R_1 \times (N_1 + N_2) + R_1 \times N_2 + R_2 \times N_2$$

La première égalité multipliée par 2 donne :

$$0{,}4\,\pi\,N\,I = 2\,R_1 \times (N_1 + N_2) + 2\,R_3 \times N_1$$

Ce qui montre que tout se passe dans le petit circuit et notamment dans le bras de dérivation, comme si, la force électro-motrice agissant dans ce circuit étant celle du circuit total, les résistances R_1 et R_3 étaient doublées.

On pourra donc, d'une manière générale, opérer comme si les flux se propageaient dans tous les circuits partiels quels qu'ils soient, en vertu de la force magnéto-motrice totale, à condition de multiplier les reluctances de chacune des parties par le rapport entre la force magnéto-motrice agissant réellement dans le circuit considéré et la force électro-motrice totale.

Les seconds membres des deux dernières égalités étant égaux, on en tire aisément la relation :

$$R_1 \times (N_1 + N_2) + 2\,R_3 \times N_1 = R \times N_2 + R_2 \times N_2$$

Ce qui donne après simplification

$$(R_1 + 2\,R_3) \times N_1 = R_2 \times N_2$$

Les règles de l'arithmétique nous permettent encore d'écrire :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{R_2}{R_1 + 2\,R_3}$$

Ce qui nous donne le rapport des deux dérivations M P et M A P.

86. Dérivations à travers les espaces d'air. — Nous avons vu (§ 81) que les lignes de force se dérivent dans les espaces d'air environnant, entre deux points d'un circuit présentant une différence de potentiel magnétique. Ces lignes échappent au circuit de fer et ne sont plus canalisées.

Il est difficile de déterminer exactement la trajectoire du flux dérivé à travers les espaces d'air, mais on suppose, pour simplifier la question, que les lignes de force suivent des circuits de forme géométrique que l'on ramène à trois types principaux.

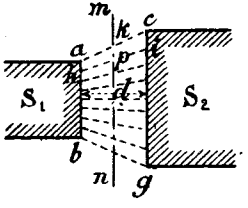


FIG. 58. — Dérivation du flux entre deux surfaces parallèles.

1° Si le flux (fig. 58) passe entre deux surfaces parallèles, S et S_2, situées à une distance d, on considère que chaque petit canal élémentaire, tel que $a\,h\,c\,i$, que suivent les lignes de force dans l'air, est équivalent à un canal cylindrique ayant pour section constante la moyenne des petites surfaces terminales $a\,h$, $c\,i$, c'est-à-dire la section médiane $k\,p$. On adoptera donc pour section totale la somme des petites sections moyennes qui sera évidemment égale à la moyenne des sections terminales, soit à : $\frac{S_1 + S_2}{2}$

Il s'ensuit que *la reluctance* du circuit d'air, qui est toujours proportionnelle à sa longueur et en raison inverse de la section, sera :

$$R = \frac{d}{\frac{1}{2}\,(S_1 + S_2)}$$

Et *la perméance* qui est l'inverse de la reluctance :

$$\frac{1}{R} = \frac{\frac{1}{2}(S_1 + S_2)}{d}$$

La même formule serait applicable à un flux jaillissant entre deux surfaces courbes parallèles.

2° Considérons en second lieu, le cas où les surfaces à potentiels différents sont dans un même plan et disposées parallèlement à une distance au plus égale à la largeur des pièces polaires (fig. 59).

On admet alors que le flux émanant de l'une des surfaces, se propage par arcs de cercle concentriques, ou faisceaux parallèles cylindriques, tels que A*g* B*b*, *c*C *d*D.

Ces différents faisceaux sont en dérivation sur les pièces polaires, et la perméance totale, ou perméance réduite, est la somme des perméances de chacun d'eux.

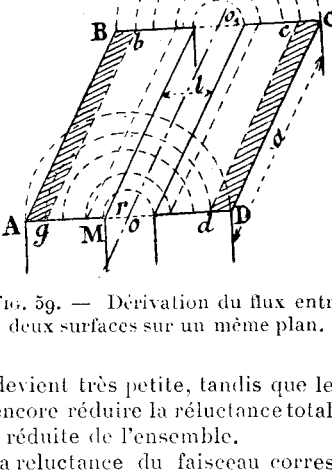


Fig. 59. — Dérivation du flux entre deux surfaces sur un même plan.

Remarquons que lorsque la distance $o\,M = r_1$ tend vers zéro, la reluctance du faisceau voisin du point M devient très petite, tandis que les autres dérivations viennent encore réduire la réluctance totale en augmentant la perméance réduite de l'ensemble.

A la limite, pour $r_1 = o$, la reluctance du faisceau correspondant est nulle ou sa perméance infinie; il en est de même de l'ensemble. Mais à ce moment, les pièces étant en contact prennent le même potentiel magnétique, de telle sorte qu'il n'y a plus de flux dérivé entre les deux pièces.

La reluctance et la perméance varient donc dans des proportions considérables, suivant l'écart plus ou moins grand des deux surfaces. L'expression exacte de ces diverses valeurs, pour l'hypothèse admise de faisceaux cylindriques, donne une formule transcendante qui sortirait du cadre de notre ouvrage. Nous proposons de la remplacer par la formule suivante, qui donne des résultats suffisamment approchés dans les cas ordinaires de la pratique :

$$\frac{1}{R} = 0{,}212 \times \frac{a \times (r_2 - r_1)}{\sqrt{(r_2 - 1{,}5\, r_1) \times r_1}}$$

Dans cette formule relative à la reluctance du circuit aérien, $r_1 = \mathrm{OM}$, $r_2 = \mathrm{OA}$ et $a = \mathrm{CD}$.

Exemple numérique. — Soit : $r_2 = 15$, $r_1 = 5$ et $a = 25$. On aura, en remplaçant les lettres par leurs valeurs respectives :

$$\frac{1}{R} = 0{,}212 \times \frac{25 \times 10}{\sqrt{7{,}50 \times 5}} = 8{,}66$$

Il ne faut pas perdre de vue que cette formule n'est applicable que pour un intervalle maximum $l = \mathrm{MA}$, ce qui correspond à $r_2 = 3\, r_1$; pour cette valeur limite r_2 est plus grand que $1{,}5\, r_1$, condition nécessaire pour que le calcul du dénominateur soit possible.

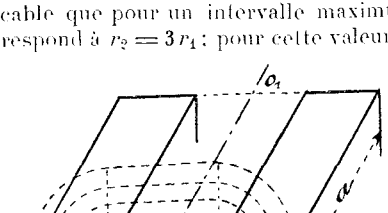


Fig. 60. — Cas de surfaces plus écartées.

3° Le troisième cas à considérer est celui pour lequel la distance des deux surfaces parallèles est supérieure à leur largeur.

On suppose alors que le flux se propage par des arcs de cercles raccordés par des parties droites (fig. 60).

Nous proposerons encore pour ce cas la formule suivante :

$$\frac{1}{R} = 0{,}515 \times \frac{a \times (r_2 - r_1)}{r_1 + 0{,}8\,(r_2 - r_1)}$$

Exemple numérique. — Soit : $r_2 = 30$, $r_1 = 20$, $l = 2\, r_1 = 40$ et $a = 25$.

On aura, comme précédemment :

$$\frac{1}{R} = 0{,}515 \times \frac{25 \times 10}{20 + 8} = 4{,}60$$

La formule sera applicable, dès que l'intervalle entre les deux surfaces dépassera l'épaisseur de la pièce polaire, soit lorsque r_1 atteindra le tiers de r_2.

On utilise ces formules pour déterminer la résistance réduite

des circuits magnétiques en dérivation, dans les espaces d'air environnant la carcasse des champs inducteurs, dans les machines dynamos.

87. **Force portante d'un électro-aimant.** — L'induction qui se développe dans les pièces de fer doux soumises à l'action de solénoïdes inducteurs ou excitateurs est utilisée dans l'emploi des *électro-aimants*.

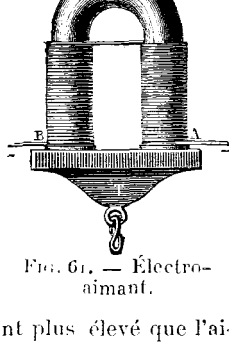


Fig. 61. — Électro-aimant.

Cet appareil comprendra donc deux circuits : l'un, magnétique, constitué par la carcasse en fer ou en fonte ; l'autre, électrique, formé par les spires des solénoïdes enroulés sur les branches ou noyaux de l'*électro* (fig. 65).

La force portante d'un électro-aimant sera beaucoup plus grande que celle d'un aimant permanent, puisque l'induction B comporte un nombre de lignes de forces notablement plus élevé que l'aimantation A.

Nous avons démontré antérieurement (§ 57) que la force portante d'un aimant par unité de section a pour expression :

$$P = 2\pi A^2 = 2\pi J^2$$

J étant la densité superficielle, ou quantité de magnétisme par unité de surface polaire, soit $\frac{m}{S}$

Or, d'après la démonstration rappelée, $2\pi J$ n'est pas autre chose que le flux émané de la couche de magnétisme J, agissant sur la masse égale répartie sur l'unité de surface correspondante de l'armature.

Dans le cas de l'électro-aimant, cette dernière masse est en outre soumise à l'action du champ inducteur H dû au solénoïde, de sorte que l'attraction totale par unité de surface, devient :

$$p = 2\pi \times J^2 + H \times J$$

Mais les solénoïdes magnétisants eux-mêmes peuvent être considérés comme pourvus de pôles correspondant aux feuillets magnétiques équivalents (§ 68). La masse de ces pôles est $n \times i$ par unité de surface, de sorte que cette quantité joue

le même rôle que J dans le barreau de fer. Ainsi l'attraction supplémentaire due à ces pôles sera $2\pi \times n^2 \times i^2$, expression qui est égale à $\frac{H^2}{8\pi}$ en vertu de la relation :

$$H = 4\pi n \times i \text{ ou } n \times i = \frac{H}{4\pi}$$

d'où : $$2\pi n^2 \times i^2 = 2\pi \times \frac{H^2}{16\pi^2} = \frac{H^2}{8\pi}$$

Finalement, la force totale de l'électro-aimant sera la somme de toutes ces forces partielles, soit :

$$p = 2\pi \times J^2 + H J + \frac{H^2}{8\pi}$$

Je puis simplifier cette formule en réduisant au même dénominateur, par les règles ordinaires de l'arithmétique :

$$p = \frac{16\pi^2 J^2 + 8\pi H J + H^2}{8\pi}$$

D'autre part, on a :

$$B = (H + 4\pi \times J) \text{ et } B^2 = (H + 4\pi J)^2$$

Or, il est facile de voir que le numérateur de p est précisément égal à $(H + 4\pi J)^2$ et, par suite, à B^2.

En effet, si ces expressions sont identiques, elles le seront pour toutes les valeurs numériques que l'on pourra assigner aux lettres qui les composent et notamment pour π, H et $J = 1$.

Le numérateur devient alors : $16 + 8 + 1 = 25$ et l'expression :

$$(H + 4\pi J)^2 = (1 + 4)^2 = 25$$

On peut donc remplacer le numérateur par B^2 et l'on a :

$$p = \frac{B^2}{8\pi}$$

La force portante totale pour la surface polaire S sera :

$$p \times S = P = \frac{B^2 S}{8\pi}$$

Cette formule sert à calculer les dimensions d'un électro-aimant capable de porter un poids donné.

88. Attraction à distance. — Les formules de la force portante exposées ci-dessus ne s'appliquent exclusivement

que dans le cas où l'armature est au contact des pôles de l'électro-aimant et forme ainsi avec lui un circuit magnétique fermé.

Lorsque l'armature est à une certaine distance, l'induction diminue rapidement, par suite de la résistance de l'air, au fur et à mesure de l'éloignement.

A titre d'exemple, un électro-aimant excité par un courant de 4 ampères, produisait entre ses pièces polaires une induction de 9300 à 600 unités CGS, lorsque la distance des pôles variait de 1 2 centimètre à 8 centimètres.

Quand la distance atteint cette valeur, on remarque que l'induction est à peu près proportionnelle à la force magnéto-motrice ou aux ampère-tours de l'excitation, ce qui prouve que la résistance de l'air devient prépondérante et que la présence du noyau de fer est presque sans objet.

Lorsque, au contraire, la distance des pôles est courte, la perméabilité du noyau augmente considérablement l'induction pour les faibles champs magnétisants, et la proportionnalité ne réapparaît que pour les inductions élevées voisines de la saturation du fer.

89. Attraction d'un solénoïde sur un noyau de fer doux mobile. — Lorsqu'on présente un noyau de fer doux à l'entrée d'un solénoïde, dont l'axe coïncide avec celui du noyau, celui-ci s'aimante par induction, et les pôles magnétiques qui se développent à ses extrémités subissent, de la part du solénoïde, des actions inégales et contraires. Ainsi la face *a b* du solénoïde (fig. 62) étant négative et analogue au pôle sud d'un aimant, il naîtra un pôle nord en X dans le barreau, et un pôle sud à l'autre extrémité.

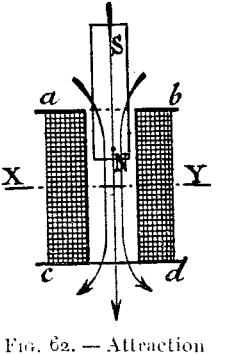


FIG. 62. — Attraction d'un solénoïde.

Ce pôle nord est attiré par le champ de force intérieur, tandis que le pôle S est repoussé par le feuillet négatif *a b* qui

termine le solénoïde ; mais dans la position actuelle, l'action du champ est prépondérante et le noyau est aspiré à l'intérieur du solénoïde.

L'effort d'attraction croît, à mesure que le noyau s'enfonce davantage, l'induction augmentant par suite de la diminution progressive de la reluctance due à la pénétration du noyau ; mais en même temps, l'action antagoniste qui s'exerce sur le pôle S, augmente, puisqu'il se rapproche de la base *a b* du solénoïde.

Dans le cas où le noyau a la même hauteur que la bobine, l'expérience montre que l'effort d'attraction maximum a lieu, lorsque l'extrémité inférieure du noyau a atteint le milieu de la bobine ; à partir de ce moment, la force attractive diminue par suite de la répulsion croissante de *a b* sur S et de la réduction du champ magnétique vers l'extrémité *c d* de la bobine. L'effort attractif s'annule et les actions s'exerçant sur le noyau s'équilibrent, lorsque celui-ci a pénétré entièrement dans le solénoïde, ou que son milieu se trouve sur l'axe X Y amené à égale distance des deux bases de la bobine.

Nous verrons que ces actions sont utilisées dans les régulateurs électriques et notamment dans les appareils de réglage automatique des lampes à arc. Dans ces applications, la variation d'intensité de l'effort attractif nuit au fonctionnement du système, et il conviendrait de le rendre constant quel que soit le degré d'insertion du noyau dans le solénoïde.

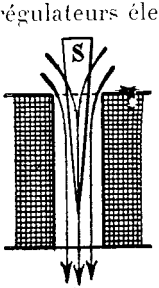


FIG. 63. — Emploi d'un noyau conique.

Dans ce but, on remplace les noyaux cylindriques par des noyaux coniques : de cette manière, les effets antagonistes sont contre-balancés par l'accroissement d'induction que provoquent les sections croissantes du noyau pénétrant dans la bobine. L'attraction est, dès lors, à peu près constante, quelle que soit la position relative du solénoïde et du noyau (fig. 63).

Les actions attractives qui se développent dans les solénoïdes sont beaucoup moins intenses que celles qui s'exercent au contact, entre les pôles des électro-aimants et leurs armatures. On augmente l'effort attractif à l'intérieur du solénoïde en améliorant le circuit magnétique par l'addition d'une cuirasse en fer enveloppant extérieurement la bobine.

CHAPITRE IV

INDUCTION ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE

90. **Courants induits.** — Les phénomènes *d'induction électro-magnétique* ont été découverts par Faraday; ils consistent en ce fait que des courants électriques prennent naissance dans les circuits conducteurs, en présence de champs magnétiques, lorsqu'il se produit *une variation* quelconque, soit dans l'orientation relative des conducteurs et du champ, soit dans l'intensité magnétique de celui-ci.

Les circonstances dans lesquelles les courants d'induction prennent naissance seront toutes celles qui permettront de réaliser ces variations, et on peut les classer au point de vue expérimental dans les diverses catégories de procédés suivants :

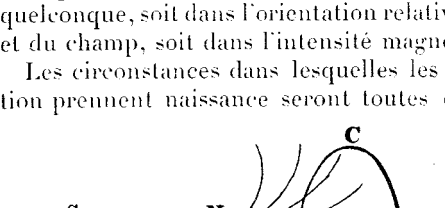


Fig. 64. — Induction électrique par un barreau aimanté.

1° Le circuit C étant fixe (fig. 66), on peut rapprocher ou éloigner un aimant de sa surface, par un mouvement de va et vient normal au plan du circuit, ou parallèlement à ce plan. Dans les deux cas, on remarquera qu'il y a variation de l'orientation des lignes de force par rapport

au circuit et que, par ce fait même, d'une part, le flux de force qui traverse le plan du circuit est variable, d'autre part, les lignes de force qui entrent ou sortent de l'intérieur du circuit sont coupées par le conducteur.

2° L'aimant étant fixe, on peut imprimer les mêmes mouvements relatifs au circuit, ce qui donnera lieu, nécessairement, aux mêmes variations dans l'orientation respective des lignes de force, entraînant la variation du flux et la coupure des lignes magnétiques (fig. 65).

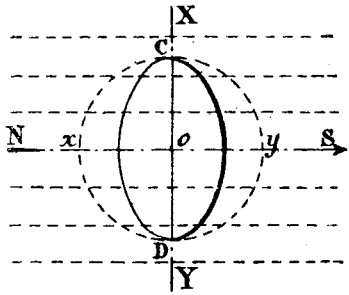


Fig. 65. — Induction électrique dans un champ magnétique fixe.

Remarquons que si le circuit était placé dans un champ uniforme caractérisé par ce fait que toutes les lignes de force sont également espacées, parallèles et dirigées dans le même sens, on n'obtiendrait aucun phénomène d'induction, en déplaçant le circuit parallèlement à lui-même dans la direction des lignes de force; c'est-à-dire de N vers S ou de S vers N; car ce mouvement ne produirait aucune modification dans l'orientation relative des lignes et du circuit, et, comme conséquence, nulle variation du flux traversant le circuit, ni coupure de lignes de forces.

Mais l'induction se produira pour un déplacement perpendiculaire aux lignes de force. De même on réalisera les conditions nécessaires en faisant tourner le circuit autour d'un axe tel que XY contenu dans son plan. Lorsque dans ce mouvement de rotation, le plan du circuit sera perpendiculaire aux lignes de force et se projettera sur le dessin suivant C D, il sera traversé par le flux de force maximum; puis ce flux diminuera progressivement et deviendra nul quand le plan du circuit sera parallèle aux lignes de force et se projettera en vraie grandeur suivant $x\,y$.

A ce moment, en effet, les lignes de champ passeront partie en avant, partie en arrière du plan du circuit sans le traverser aucunement.

3° On observera évidemment les mêmes phénomènes si on remplace l'aimant inducteur par un solénoïde qui possède les mêmes propriétés magnétiques.

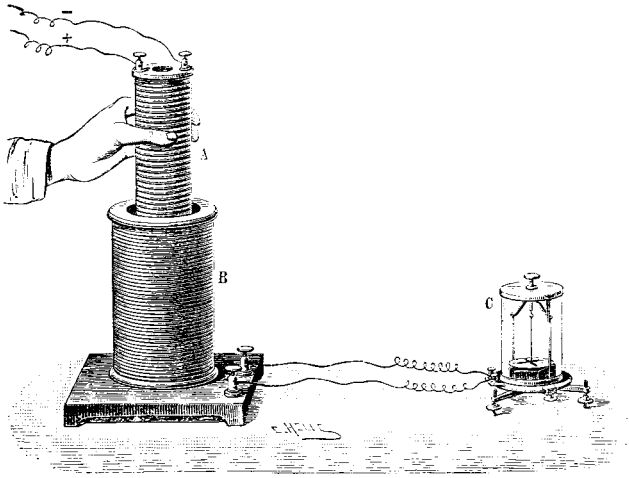


Fig. 66. — Induction par les courants.

Ainsi, quand on introduit (fig. 66) une bobine A, parcourue par le courant d'une source extérieure d'électricité, à l'intérieur d'une bobine B, le circuit de cette dernière devient le siège d'un courant électrique d'induction que l'on peut recueillir sur un circuit extérieur relié aux extrémités de cette bobine et contenant un galvanomètre C, par exemple, qui révèle son passage.

On constate que lorsque le solénoïde A pénètre dans la bobine B, il naît dans celle-ci un courant de sens inverse à celui qui excite la première bobine; si, au contraire, on retire la bobine A, le courant induit en B est de même sens que celui qui circule dans A.

Le fait comporte une conséquence importante, car l'insertion de la bobine tend à augmenter le flux qui pénètre dans les spires de B, tandis que le courant inverse qui prend naissance dans cette bobine donne lieu à un flux magnétique de sens opposé qui se retranche du flux inducteur principal et tend à le diminuer, c'est-à-dire a s'opposer à sa variation, cause efficiente de la production du courant induit.

On remarquera également que, dans ces conditions, les flux opposés se repoussent, aussi éprouve-t-on une certaine résistance à faire pénétrer la bobine A dans B ; il en est de même dans le mouvement inverse, car alors les deux flux s'attirent.

4° L'emploi des bobines inductrices permet de développer encore des courants d'induction, sans avoir besoin de déplacer le champ inducteur et le courant induit, l'un par rapport à l'autre.

D'après ce qui a été dit plus haut, les phénomènes d'induction ne se développent que pendant le mouvement relatif de l'un ou l'autre des organes en présence ; tout courant cesse avec le mouvement.

Mais si maintenant, la bobine A étant immobile à l'intérieur de B, on fait varier le courant excitateur de la première bobine, l'intensité de son champ magnétique subira des variations proportionnelles et donnera lieu à un flux inducteur variable à l'intérieur du circuit induit.

On réalisera donc ainsi, sans déplacement mécanique, les conditions requises pour la production des courants d'induction.

Tels sont les divers procédés que l'on peut mettre en œuvre pour obtenir l'énergie électrique induite.

En somme, tous ces procédés reviennent, soit à faire varier le flux de force magnétique qui pénètre dans la surface limitée aux contours d'un circuit conducteur, soit à faire couper les lignes de force du champ inducteur par le fil induit.

91. **Force électro-motrice d'induction.** — Dans tout ce qui précède, nous avons parlé de courants, admettant implici-

tement que le circuit induit était fermé. Mais si, comme il est logique de le faire, nous assimilons les courants d'induction aux courants des piles, nous devrons attribuer la production de ces courants à une cause analogue, c'est-à-dire à une force électro-motrice d'induction.

Ainsi, lorsqu'un barreau de cuivre (fig. 67) tel que A B se déplace dans un champ magnétique, de manière à couper les lignes de force de ce champ, ce barreau devient le siège d'une force électro-motrice d'induction, et l'on constate la présence d'une différence de potentiel entre les points A et B, qui persiste pendant toute la durée du mouvement.

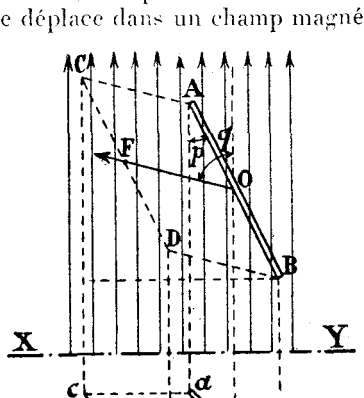


Fig. 67. — Analyse du phénomène d'induction électrique

Il faut admettre que chaque élément de longueur du barreau qui frappe les lignes de force pour les couper, donne lieu à une force électro-motrice partielle, et c'est la somme de toutes ces forces électro-motrices élémentaires qui constitue la force électro-motrice totale ou la différence de potentiel entre les extrémités du barreau.

Si l'on réunit ces points, A et B, aux extrémités d'un circuit extérieur fixe, par une liaison flexible permettant le mouvement du barreau, celui-ci jouera le rôle d'une pile à deux pôles, A et B, donnant lieu à un courant électrique dans l'ensemble du circuit et, en particulier, dans le circuit extérieur.

Tout ce que nous avons dit touchant les courants

d'induction s'applique donc à la force électro-motrice qui, elle, existe dans tous les cas, que le circuit soit fermé ou ouvert.

Puisque la force électro-motrice d'induction dépend des lignes de force coupées par la partie mobile du circuit, on doit prévoir que la valeur de cette force électro-motrice est en relation immédiate avec l'orientation de l'organe mobile et la direction du mouvement par rapport au champ inducteur.

Dans la figure ci-dessus, la position relative du barreau dans l'espace est donnée par sa projection A B sur le plan vertical parallèle aux lignes de force, et sa projection *a b* sur un plan horizontal.

Le barreau fait un angle *p* avec la direction du champ et un angle *m* en projection horizontale avec la direction du mouvement; enfin, celle-ci fait un angle *q* avec la direction du champ. En se transportant de A B en C D, le conducteur a balayé tout l'espace compris dans la surface A B C D, qui se projette horizontalement en *a b c d*. Or, ces deux surfaces constituent, la première une section *oblique*, la seconde une section *droite* d'un même prisme de lignes de forces.

Ainsi, le barreau A B ne coupe pas plus de lignes de force que n'en couperait le barreau réduit à la projection *a b*, se transportant dans le plan horizontal de *a b* en *c d*.

Si maintenant le barreau était orienté normalement aux lignes de forces, l'angle devenant égal à 90 degrés, il se projetterait en vraie grandeur sur le plan horizontal; il en serait de même si la direction du mouvement était perpendiculaire au champ, le chemin parcouru se projetterait également en vraie grandeur suivant *o f*. Dans ces conditions, la surface *a b c d* serait plus grande et le flux de force coupé plus considérable.

Enfin, si nous supposons encore que *a b* s'oriente de façon à faire un angle *m* de 90 degrés avec la direction du mouvement, le parallélogramme *a b c d* se transformera en rectangle dont la surface sera maximum pour le déplacement considéré.

Cette discussion montre que l'on réalisera les conditions les plus favorables à l'obtention de la force électromotrice, en plaçant le conducteur perpendiculairement au champ magnétique et en le déplaçant dans un plan normal aux lignes de force et dans une direction perpendiculaire à sa propre longueur.

On voit de même que si l'angle q du mouvement et du champ était nul, le barreau glisserait le long des lignes de force sans les couper, il n'y aurait donc pas de force électro motrice : dans ce cas, d'ailleurs, la projection horizontale se réduirait à la droite $a\,b$. Rien ne se produirait non plus, si l'angle p était nul, ou si la direction du mouvement se confondait avec A B.

En général, pour qu'il y ait production de force électromotrice, il faut que la projection de la surface parcourue par le conducteur, sur le plan normal au champ, ne soit pas nulle et les effets les plus intenses correspondront à la surface projetée d'étendue maximum.

Un autre facteur important du phénomène est la vitesse du mouvement : on conçoit, en effet, que la grandeur de la force électro-motrice dépend de la rapidité plus ou moins grande avec laquelle le flux de force est coupé, de même que la hauteur d'un son est d'autant plus élevée que le corps sonore bat un plus grand nombre de vibrations par seconde.

Enfin, rappelons qu'il est indifférent que la variation de flux ou la coupure des lignes de forces s'opère par le déplacement du conducteur ou par celui de l'organe inducteur c'est-à-dire du champ.

92. **Loi de Lenz.** — Les phénomènes d'induction sont régis par la loi de Lenz qui s'énonce ainsi :

Les courants induits sont tels qu'ils s'opposent à chaque instant à la cause ou au mouvement qui les produit.

Cette loi est une conséquence du principe de la conservation et de la transformation de l'énergie; elle annonce, en effet, que pour produire par induction des courants électriques, il faut dépenser une certaine quantité

d'énergie mécanique afin de vaincre la résistance opposée par le courant induit. Nous avons mis ce fait en évidence dans le cas de l'induction d'une bobine sur une autre.

Autres lois de l'induction. — La loi de Lenz permet de déterminer le sens du courant comme nous le verrons plus loin. D'autre part, on peut résumer dans les règles suivantes les divers phénomènes étudiés ci-dessus.

1° *Tout conducteur soumis à l'action d'un flux magnétique variable, est le siège d'une force électro-motrice d'induction; si le circuit est fermé, il est parcouru par un courant induit qui persiste pendant tout le temps de la variation du flux;*

2° *La force électro-motrice induite est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique, à la vitesse de variation du flux ou au taux de lignes de force coupées par seconde et à la longueur du circuit soumis à l'induction;*

3° *Lorsque l'induction est due au champ galvanique d'un solénoïde, le courant induit est de même sens que le courant inducteur, quand le flux diminue; il est de sens contraire quand le flux augmente;*

4° *Dans tous les cas, le sens du courant est tel qu'il obéit à la loi de Lenz.*

93. **Détermination du sens des courants induits.** — Les courants d'induction, comme ceux des piles, peuvent circuler soit dans un sens soit dans l'autre, en donnant lieu à des phénomènes inverses par lesquels se manifeste précisément cette qualité de *sens* que l'on est conduit à leur assigner.

Un grand nombre de règles ont été proposées pour déterminer *a priori* le sens des courants induits, qui dépend à la fois de l'orientation du champ et de la direction du déplacement de l'organe mobile. Nous citerons trois de ces règles.

1° Règle de Flemming. — Elle consiste à employer les trois premiers doigts de la main droite (fig. 68). On place la main de telle sorte que le pouce soit dirigé dans le sens

du mouvement du corps mobile, l'index dans le sens des lignes de force du champ et le médius dans la direction du conducteur. Le courant induit par le déplacement ira dans le sens indiqué par la direction naturelle du médius.

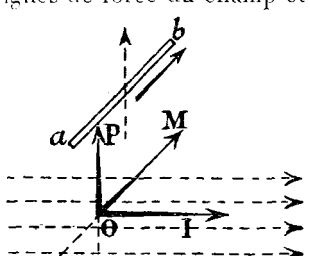


Fig. 68. — Règle de Flemming.

Ainsi dans le cas de la figure, le courant va de *a* vers *b* dans le conducteur, c'est-à-dire dans la direction du médius O M.

Si *a b* se déplaçait de haut en bas, il faudrait tourner la main de 180 degrés, le pouce en bas, et le médius O M' indiquerait un courant de sens inverse.

2° Règle de Maxwell. — Le tire-bouchon de Maxwell qui nous a permis de déterminer le sens du flux de force galvanique émis par un solénoïde ou un simple circuit magnétique, s'applique également aux phénomènes d'induction.

Le tire-bouchon étant placé normalement au plan du circuit (fig. 69), on lui donne un mouvement de rotation tel qu'il progresse dans le sens des lignes de force du champ; dans ces conditions le courant circule dans le sens de rotation du tire-bouchon si le flux de force décroît à l'intérieur du circuit; il circule en sens inverse quand le flux croît. Si nous supposons, par exemple, que le circuit tourne autour de l'axe X Y à partir de la position qu'il occupe sur le dessin, dans le sens de la flèche inférieure, le flux tendant à croître dans le circuit, le courant sera dirigé dans le sens de la flèche pointillée.

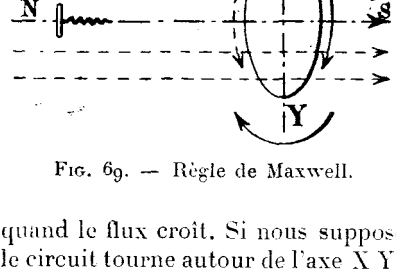


Fig. 69. — Règle de Maxwell.

Règle de l'auteur. — Cette règle est une modification de celle de Maxwell, qui consiste à rendre à la fois le bouchon et le tire-bouchon mobiles; c'est-à-dire à utiliser la vis d'Archimède munie de son écrou, dont on se sert pour percer les pièces minces de bois ou de fer.

On se représentera naturellement la croissance et la décroissance du flux comme produites par le rapprochement et l'éloignement d'un aimant, dirigé suivant l'axe du circuit, le pôle Nord tourné vers celui-ci (fig. 70). On peut donc assimiler la vis d'Archimède à cet aimant et lui imprimer un mouvement d'avance ou de recul vers son écrou, ce dernier étant maintenu entre deux joues, de sorte qu'il ne puisse prendre qu'un mouvement de rotation.

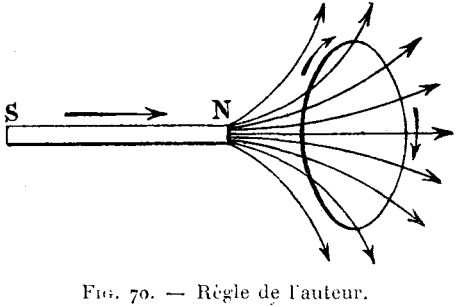


Fig. 70. — Règle de l'auteur.

Le mouvement d'avance de la vis correspondra donc à une augmentation du flux dans l'écrou qui, lui, représentera le circuit électrique, et l'on voit que celui-ci tournera alors dans le sens inverse des aiguilles d'une montre; son mouvement représentera donc le sens du courant, comme l'indique la loi de Maxwell.

Le mouvement de recul correspond à une diminution du flux, et il produit une rotation de l'écrou dans le sens des aiguilles d'une montre, c'est-à-dire dans le sens voulu du courant.

Cette règle a l'avantage de n'exiger absolument aucun effort de mémoire, elle est la représentation matérielle des phénomènes envisagés; elle est, d'ailleurs, susceptible de s'appliquer facilement à tous les cas et notamment quand il s'agit d'un circuit rectiligne qui coupe des lignes de force.

A cet effet, nous assimilerons la vis à un conducteur qui monte et descend pour couper les lignes de force (fig. 71).

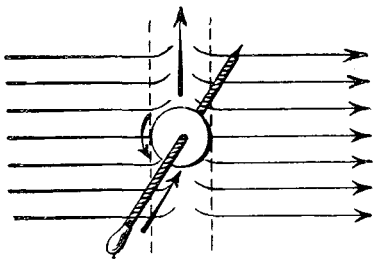


Fig. 71. — Cas d'un circuit rectiligne.

Dans ce mouvement, on peut imaginer que l'écrou subit un frottement à son passage à travers ces lignes coupées : par suite du sens admis du champ magnétique, le frottement ne s'exerce que sur la gauche et l'écrou tourne sous cette action. Le mouvement d'avancement ou de recul de la vis dans son écrou donnera le sens du courant.

94. Travail d'un circuit électrique dans un champ magnétique. — D'après la loi de Laplace, que nous avons invoquée précédemment (§ 64), chaque centimètre de longueur d'un circuit électrique exerce sur un pôle magnétique égal à l'unité et placé sur une droite normale à l'élément considéré, à une distance r, une force :

$$f = \frac{I}{10\,r^2} = \frac{J}{r^2}$$

J étant le courant exprimé en unités C G S.

Par suite, l'action réciproque qui se développerait entre un circuit de l centimètres de longueur et un pôle d'intensité m sera :

$$F = \frac{J \times l \times m}{r^2}$$

La loi de Coulomb nous fait connaître, d'ailleurs, que le champ créé par le pôle m à la distance r où se trouve le circuit, a pour valeur :

$$H = \frac{m}{r^2}$$

D'où nous concluons que la force exercée sur un cou-

rant placé dans un champ magnétique d'intensité *H* sera :

$$F = J \times l \times \frac{m}{r_2} = J \times l \times H$$

Nous savons également que cette action est perpendiculaire au plan déterminé par le conducteur et la force du champ, c'est-à-dire au plan parallèle au champ et contenant le conducteur.

De ces principes il résulte que si un conducteur traversé par un courant se trouve dans un champ magnétique, il se déplacera sous l'action de la force F en produisant un certain travail qui ne pourra être emprunté qu'à la propre énergie du courant, puisqu'il n'existe dans le système aucune autre source d'énergie.

Réciproquement, si, à l'aide d'une force extérieure, on déplace le circuit à l'encontre de la force F, il faudra dépenser une énergie mécanique équivalente au travail résistant de la force F.

Dans le premier cas, l'énergie empruntée au courant se transforme en mouvement automatique ; dans le second cas, l'énergie fournie par une force mécanique extérieure se transformera en électricité, ou en énergie électrique équivalente. C'est justement ainsi que l'on produit les courants d'induction par le déplacement relatif du conducteur et du champ magnétique.

Il est facile, d'ailleurs, d'évaluer le travail accompli par un conducteur se déplaçant de lui-même dans un champ megnétique, ce qui correspond au premier cas envisagé.

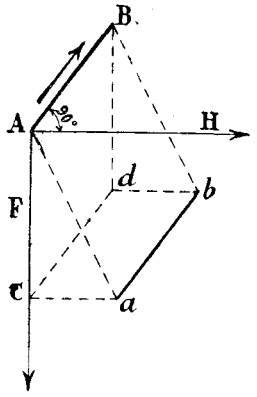


FIG. 72. — Travail électromagnétique.

Considérons, par exemple (fig. 72), un conducteur AB de longueur *l*, parcouru par un courant d'intensité I. Supposons d'autre part que la tige

A B soit orientée perpendiculairement au champ d'intensité H et de direction A H. Elle sera soumise à l'action d'une force F, perpendiculaire au plan A B H et dirigée, suivant la règle d'Ampère, à la gauche d'un observateur placé dans le courant et regardant dans la direction du champ A H.

Si le conducteur est astreint, par des guidages quelconques, à se mouvoir suivant A a, B b, le travail dû à la force F, pendant ce déplacement, est égal, suivant la règle générale, au produit de la force par le chemin parcouru dans la direction de la force.

Or, la force étant supposée verticale, quand le barreau est venu de A B en $a\,b$, il est descendu verticalement de A c, c'est-à-dire de la projection de A a sur F.

Le travail aura donc pour expression :

$$T = \mathrm{F} \times \mathrm{A}\,c = \mathrm{J} \times l \times H \times \mathrm{A}\,c.$$

Mais $l \times \mathrm{A}\,c$ n'est autre que la surface du rectangle A B $c\,d$ qui est elle-même la projection de la surface A B $a\,b$ balayée par le conducteur, sur un plan perpendiculaire au champ.

On pourra donc écrire :

$$T = \mathrm{J} \times H \times \text{surf. A B } c\,d.$$

Or, le produit $H \times$ surf. A B $c\,d$ est, par définition même, le flux de force traversant cette surface, et comme ce flux est compris entre les plans B A H et $b\,d\,c\,a$, il est constitué par les mêmes lignes de force qui traversent la surface A B $a\,b$, et qui sont coupées dans le déplacement du conducteur.

On écrira donc finalement :

$$T = \mathrm{J} \times \text{Nombre de lignes de force ocupées par le conducteur.}$$

D'où la loi suivante :

Le travail accompli par un circuit mobile dans un champ magnétique est le produit du courant en unités C G S. par le nombre de lignes de force coupées par le circuit dans son déplacement.

Ce travail étant exprimé en ergs, on le transformera en joules en divisant par 10.000 000, soit :

$$T = \frac{J}{10.000.000} \times \text{Nombre de lignes de force coupées.}$$

Ou $T = \frac{I}{100.000.000} \times$ Nombre de lignes coupées.

Considérons, en second lieu, non plus une fraction de circuit, mais un circuit complet fermé, placé dans un champ magnétique uniforme d'intensité *H* et parcouru par un courant I.

Nous savons (§ 66) que ce circuit est équivalent à un feuillet magnétique ou aimant plat dont l'intensité d'aimantation serait égale à J ou $\frac{I}{10}$.

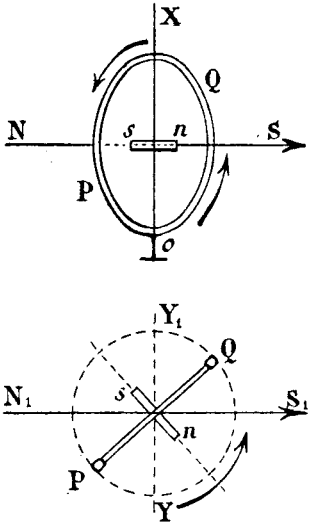


Fig. 73. — Travail électro-magnétique d'un circuit fermé.

Un pareil aimant aurait un pôle d'intensité :

$$m = \frac{I \times S}{10}$$

en désignant par S la section du feuillet ou la surface du circuit (fig. 73). Or, cet aimant, disposé comme il convient, de sorte que son axe soit perpendiculaire au plan du circuit, tendrait à se placer suivant la direction du champ N S, et de même le circuit, dans la direction $Y Y_1$. *C'est-à-dire que le circuit s'orientera de telle sorte que le flux pénétrant par sa face sud ou négative soit maximum.*

Dans ce mouvement, le circuit effectuera le même travail que l'aimant équivalent.

Or, le travail d'un aimant se déplaçant de $Y Y_1$ à $N_1 S_1$, est exprimé (§ 54) par le moment magnétique :

$$M = m \times l \times H = m \times H$$

dans le cas actuel, où le feuillet considéré a une longueur égale à l'unité.

Le circuit, en passant de la position $N_1 S_1$ à la position $Y Y_1$, développera donc un travail égal à :

$$T = m \times H = \frac{I \times S \times H}{10} = J \times S \times H.$$

On remarquera que le travail a la même expression que dans le cas du conducteur droit, avec cette différence que la surface plane, embrassée par le circuit fermé, est remplacée, dans le premier cas, par la section droite du flux correspondant à la surface balayée.

Il est bien entendu que le travail sera multiplié par le nombre des spires enroulées sur le cadre P Q, soit pour n spires.

$$T = n \times J \times S \times H.$$

Remarquons encore que ce travail est égal au produit du courant par la variation du flux de force correspondant aux deux positions extrêmes du circuit. Le circuit étant en $N_1 S_1$ était traversé par un flux nul ; dans la position $Y Y_1$, il est traversé par un flux maximum égal à $H \times S$, de telle sorte que la variation du flux est bien

$$H \times S - 0 = H \times S.$$

Il est à peine besoin de faire observer, d'autre part, que toutes les lignes de force composant ce flux sont nécessairement coupées par les bords du cadre, c'est-à-dire par les spires de la bobine, dans son mouvement de rotation.

La variation du flux ou le nombre de lignes de force coupées sont donc une seule et même chose.

D'une manière générale, un circuit placé dans un champ magnétique s'oriente et prend une position d'équilibre telle que le flux qui le pénètre par sa face négative soit le plus grand possible, ce qui correspond à la position normale au champ.

Pour cette position, le circuit est en équilibre stable, de même qu'un corps pesant tombé au niveau du sol. Pour

déplacer le circuit et le ramener dans la position $N_1 S$, il faut couper de nouveau un flux $H \times S$ et dépenser un travail équivalent à celui que le circuit avait fourni, aux dépens de l'énergie électrique, en passant de $N_1 S_1$ à $Y Y_1$.

On peut donc admettre qu'arrivé dans sa position d'équilibre, le circuit a dépensé toute l'énergie mécanique dont il était susceptible et se trouve dans un état comparable à celui d'un ressort détendu.

Pour rendre au circuit l'énergie ainsi dépensée, il faut de nouveau tendre le ressort, c'est-à-dire ramener le cadre du circuit dans la direction du champ et, pour cela, fournir le travail mécanique voulu.

Si, au lieu d'une simple rotation de 90 degrés, on fait tourner le cadre de 180 degrés de manière à opposer normalement au flux sa face positive, le cadre sera en équilibre instable comme une aiguille aimantée dont on tournerait le pôle sud vers le nord. Dans ces conditions, le flux à l'intérieur de la bobine serait minimum, puisqu'il serait la résultante du flux principal du champ et du flux propre au circuit qui, étant opposé, se retranche.

On voit alors que, pour cette rotation de 180 degrés, le cadre coupe deux fois le flux et la variation du flux est égale à $2 \times H \times S$, le travail correspondant serait donc, pour n spires :

$$T = 2n \times \frac{I \times S \times H}{10}$$

95. **Valeur de la force électromotrice d'induction.** — D'après les considérations qui précèdent, un circuit ou une fraction de circuit conducteur traversé par un courant et se déplaçant automatiquement dans un champ magnétique peut être considéré comme un électro-moteur ou récepteur mécanique.

Or, nous avons dit (§ 42), et nous expliquerons ultérieurement, que de pareils récepteurs, d'après la loi de la conservation de l'énergie et en particulier de la loi de Lenz elle-même, doivent développer une force électro-

motrice e, opposée à celle de la source, et absorber une énergie correspondante $e \times I$, empruntée à l'énergie totale du courant d'alimentation.

Nous avons la relation :

$$E \times I = R \times I^2 + e \times I.$$

Ce qui veut dire que l'énergie totale de la source $E \times I$ développée par seconde se répartit en énergie calorifique $R \times I^2$ dans le circuit, d'après la loi de Joule, et en travail mécanique $e \times I$.

Nous pouvons donc écrire immédiatement, dans le cas où le flux $S \times H$ serait coupé dans l'espace d'une seconde.

$$T = e \times I = n \times \frac{I \times S \times H}{10}$$

d'où la force contre-électro-motrice

$$e = n \times \frac{S H}{10}$$

Mais cette force électro-motrice est exprimée en unités C G S; pour la transformer en volts, exprimons le travail T en watts :

$$T = \frac{n \times I \times S \times H}{100{,}000{,}000} = \frac{n \times I \times S \times H}{10^8}$$

d'où :

$$e = n \times \frac{S \times H}{10^8}$$

Cette force électro-motrice est absolument indépendante du courant I qui traverse l'électro-moteur, elle ne dépend que du travail mécanique développé pendant l'unité de temps, c'est-à-dire du nombre de lignes de force coupées ou de la variation du flux à travers le circuit par seconde.

Par conséquent, si l'on déplace volontairement un conducteur dans un champ, il développera la même force électro-motrice e, quel que soit le courant extérieur qui l'alimente et alors même que l'intensité de ce courant diminuerait jusqu'à la valeur o. Mais nous serons alors dans les conditions de production des courants d'induction, et e sera précisément la force électro-motrice d'induction cherchée.

Ainsi la force électro-motrice d'induction en volts est égale au nombre de lignes de force coupées par seconde, divisé par 100.000.000 ou 10^8.

Le courant d'induction aura de même pour expression :

$$I = \frac{e}{R} = n \times \frac{S \times H}{R \times 10^8}$$

De l'équation générale de l'énergie on tire :

$$E = R \times I + e \quad \text{ou} \quad E - e = R \times I$$

et enfin :

$$I = \frac{E - e}{R}$$

Si le circuit ou le courant, comme on dit, était immobile et ne produisait aucun travail, e serait nul et le courant I de la source extérieure prendrait dans le circuit sa valeur maximum. Quand le courant travaille, en se déplaçant de lui-même, e se retranche de E et le courant I se réduit d'autant plus que e est plus grand.

Si l'on supprime la source extérieure, c'est-à-dire E et qu'on déplace mécaniquement le conducteur dans le même sens, de manière à produire une force électro-motrice d'induction e, on obtient :

$$I = -\frac{e}{R}$$

Ce qui veut dire que *le courant d'induction est de signe contraire ou inverse par rapport au courant extérieur qui aurait produit le déplacement automatique du circuit dans le champ.* Ce fait est conforme à la loi de Lenz, puisque le courant d'induction tend ainsi à s'opposer au mouvement qui lui donne naissance.

On voit, d'après l'étude que nous venons de faire, qu'un conducteur placé dans un champ peut jouer indifféremment le rôle d'un électro-moteur ou d'un électro-générateur.

Dans le premier cas, il reçoit un courant extérieur dont l'énergie se transforme en travail moteur; dans le second cas, il transforme en énergie électrique le travail moteur qui lui est appliqué pour le déplacer dans le champ.

Le mode de génération du travail mécanique est le même que celui de l'énergie électrique, et les deux espèces d'énergie produites ont également pour valeur l'expression $e \times I$; e étant la force contre-électro-motrice du moteur ou la force électro-motrice d'induction, égale dans les deux cas au nombre de lignes coupées par seconde, et I le courant qui traverse le circuit mobile.

Nous savons d'ailleurs que, pour qu'il se développe une force électro-motrice d'induction, il n'est pas nécessaire qu'il y ait déplacement relatif du circuit et du champ; il suffit que, par un moyen quelconque, le flux varie à l'intérieur du circuit induit.

Mais le flux de force peut varier dans un sens ou dans l'autre, c'est-à-dire augmenter ou diminuer. Soit N_0 le flux a un instant donné et N_1 le flux au bout d'une seconde; la variation sera donnée par la différence $N_1 - N_0$ et la force motrice sera :

$$e = \frac{N_1 - N_0}{10^8}$$

Si la variation est un accroissement, N_1 est plus grand que N_0 et la différence est positive, e est donc positif; si la variation est une diminution, N_0 est plus grand que N et e est négatif, c'est-à-dire de signe contraire ou inverse.

On voit donc la possibilité de produire des forces électro-motrices et des courants dirigés soit dans un sens soit dans l'autre, suivant que l'on fera croître ou décroître le flux qui traverse le circuit.

96. Quantité d'électricité induite. — La quantité d'électricité est donnée par la formule générale

$$Q = I \times t$$

t étant exprimé en secondes, et I étant l'intensité ou, par définition, la quantité d'électricité débitée par seconde.

Mais l'intensité dépend de la force électro-motrice, qui peut être variable d'un instant à l'autre, suivant la vitesse de variation du flux; de même la variation peut s'effectuer en moins d'une seconde et donner lieu à un courant de

très courte durée ou, comme on dit, à un courant instantané.

Dans ce cas, pour évaluer la quantité d'électricité débitée pendant le temps considéré, il faudrait faire la somme des intensités variables pendant les fractions de temps correspondant à chacune des valeurs de ces intensités, mais si l'on remarque que l'intensité ou la quantité produite à chaque seconde est égale au produit de $\frac{1}{10^8 \times R}$ par la variation du flux (§ 95), on en déduira que la quantité débitée pendant un temps quelconque est encore égale à $\frac{1}{10^8 \times R}$ multiplié par la variation totale du flux pendant le temps considéré. Soit :

$$Q = \frac{1}{10^8 \times R} \times (N_1 - N_0)$$

La quantité d'électricité induite ne dépend donc nullement de la vitesse de variation du flux, mais uniquement du montant de cette variation, contrairement à ce qui a lieu pour la force électro-motrice; c'est-à-dire que pour une même variation de flux, on obtiendra toujours le même débit d'électricité, quel que soit le temps long ou rapide de la variation.

97. **Disque de Faraday** et **roue de Barlow.** — Ces deux instruments fournissent un exemple d'application des deux principes exposés ci-dessus, savoir : transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique par induction et transformation inverse, par déplacement automatique d'un circuit électrique dans un champ magnétique.

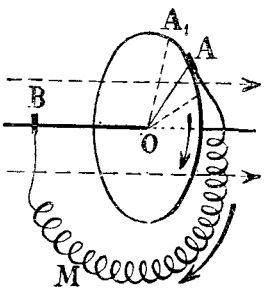


FIG. 74.— Disque de Faraday.

Le disque de Faraday (fig. 74) consiste en un disque de cuivre, calé sur un axe perpendiculaire à son plan et

placé dans un champ magnétique d'intensité H et de direction normale au disque.

On imprime à l'axe et au disque, par conséquent, un mouvement de rotation.

Si l'on considère une file de molécules suivant un rayon OA; la molécule O sur l'axe est fixe, la molécule A est animée de la vitesse maximum et les molécules intermédiaires de vitesses croissant du point O à A. Le potentiel en O est donc nul et maximum en A.

Si donc on réunit les points O et A par des Balais B et A, il se produira un courant de A en B, à l'instant considéré.

Un moment après, ce sera une file de molécules OA_1 qui correspondra au contact du balai A et qui donnera lieu au même phénomène, de telle sorte qu'il y aura production d'un courant continu dans le conducteur AMB.

Au lieu de placer un balai en A, on peut disposer un godet de mercure dans lequel plonge le bord inférieur du disque; le courant passera alors de l'axe au mercure et de ce liquide dans le circuit extérieur, dont une extrémité est en contact avec le mercure et l'autre se rattache comme précédemment au balais B.

La force électro-motrice développée sera toujours égale au nombre de lignes de forces coupées dans l'unité de temps par la rangée de molécules OA; si nous désignons par N le nombre de tours par seconde, par r le rayon du disque, cette force électro-motrice aura pour valeur,

$$E = \frac{N \times S \times H}{10^8}$$

Et comme,

$$S = \pi r^2$$

$$E = \frac{N \times \pi r^2 \times H}{10^8}$$

Si au lieu d'exprimer la vitesse en nombre de tours par seconde, on veut faire figurer dans la formule la vitesse angulaire a, comme on a l'habitude de le faire, on remarquera

que cette vitesse angulaire n'est autre que l'angle décrit en une seconde par le rayon OA; or si la vitesse était d'un tour par seconde, la vitesse angulaire serait $a = 2\pi$. Comme elle est par hypothèse de N tours, on aura :

$$\text{Vitesse angulaire } a = 2\pi N$$

d'où :

$$N = \frac{a}{2\pi}$$

En remplaçant, on trouve :

$$E = \frac{a \times \pi \times r^2 \times H}{10^8 \times 2\pi} = \frac{a \times r^2 \times H}{10^8 \times 2}$$

De même, on aura :

$$I = \frac{a \times r^2 \times H}{10^8 \times 2 \times R}$$

en désignant par R la résistance du circuit.

Enfin, l'énergie électrique produite, par seconde, par cette machine ou sa puissance sera :

$$W = E \times I = \frac{a \times r^2 H}{10^8 \times 2} \times I$$

ou plus simplement :

$$W = \frac{N \times S \times H}{10^8} \times I$$

La roue de Barlow correspond au second cas de transformation, c'est-à-dire à celui de l'électro-moteur.

Le courant (fig. 75) arrivant par la borne positive B', passe dans le mercure et de là, par la dent inférieure, à l'axe de rotation et à la borne négative.

Le conducteur formé par un chapelet de molécules radiales passant par la dent considérée est soumis de la part du champ à une force, perpendiculaire au plan, passant par cette file de molécules et parallèle au champ, c'est-à-dire à une force parallèle au plan du disque et dirigée à gauche de l'observateur placé en AO, suivant la règle d'Ampère : le disque, par conséquent, tournera dans le sens des aiguilles d'une montre.

Nous savons, d'autre part, que le travail mécanique effectué par le conducteur OA et tous ceux qui viennent le remplacer successivement dans la même position, est

égal à : $\frac{I}{10^8} \times$ nombre de lignes de force coupées ; soit :

$$T = \frac{N \times S \times H}{10^8} \times I$$

On voit que ce travail par seconde ou cette puissance *mécanique a exactement la même valeur* que l'énergie électrique due à l'induction, dans le premier cas : et que, pour un même champ magnétique et un même nombre de tours par seconde, le courant d'induction aura la même intensité que le courant extérieur fourni au disque dans le cas de l'électro-moteur.

Le disque de Faraday et la roue de Barlow peuvent servir indifféremment l'un et l'autre soit à la production des courants d'induction, soit à l'obtention de la force motrice.

La roue, ou le disque, faisant fonction de génératrice développe une force électro-motrice et un courant d'in-

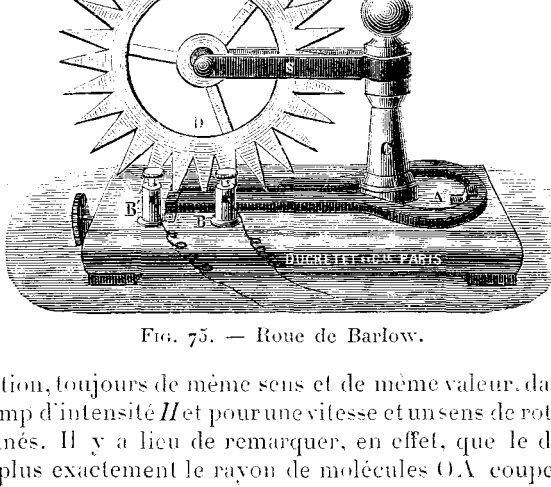


FIG. 75. — Roue de Barlow.

duction, toujours de même sens et de même valeur, dans un champ d'intensité *H* et pour une vitesse et un sens de rotation donnés. Il y a lieu de remarquer, en effet, que le disque ou plus exactement le rayon de molécules OA coupe tou-

jours le flux magnétique du champ inducteur dans le même sens, de sorte qu'il n'y a pas renversement de sens de la force électro-motrice induite. On remarquera en même temps que chaque ligne de force n'est coupée par le rayon du disque qu'une seule fois par tour. Les machines qui présentent de pareilles dispositions sont dites *unipolaires*, parce que le flux étant coupé uniquement à l'émergence d'un seul pôle, et non comme dans les machines le plus généralement employées, deux fois, à l'émergence du pôle Nord et à l'entrée dans le pôle Sud, on peut n'envisager qu'un seul des pôles inducteurs et faire abstraction de l'autre.

Les mêmes disques fonctionnant comme électro-moteurs constituent le type du moteur électrique théoriquement parfait. Il ne se présente pas en effet dans ce système de ces effets parasites, tels que les pertes d'énergie par hystérésis et par courant de Foucault, qui se produisent dans les machines industrielles.

98. **Courants de Foucault.** — Le disque de Faraday nous donne un exemple de courants d'induction se développant, non pas suivant l'axe d'un conducteur linéaire, mais dans une masse métallique de forme quelconque. Toutefois, par suite de la disposition des balais sur le bord et sur l'axe du disque, il se produit en réalité un courant linéaire du centre à la périphérie.

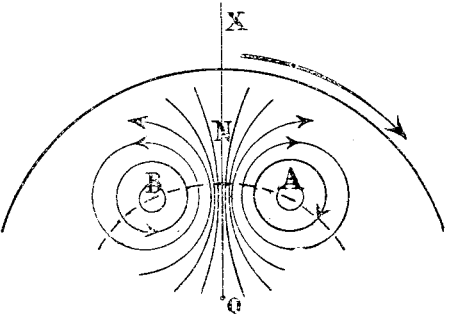


FIG. 76. — Courants de Foucault dans un disque.

Si l'on supprime les collecteurs, les courants qui prennent naissance dans la masse du disque se ferment sur

eux-mêmes en produisant des courbes qui s'enveloppent sans se couper.

Ces courants forment deux groupes distincts situés de part et d'autre du plan passant par le centre du disque et l'axe des pôles inducteurs.

Avec le sens de rotation adopté (fig. 76), la partie A s'éloigne des pôles projetés en N et la partie B s'en approche, le flux diminue en A, il augmente en B. Par conséquent, les courants formés seront équivalents à des feuillets, donnant un flux contraire aux pôles inducteurs en B, et de même sens en A; c'est-à-dire que le système B présentera sa face positive opposée au pôle N inducteur supposé en avant du tableau, et le système A sa face négative.

Ces courants obéissent donc à la loi de Maxwell. Leur sens est tel qu'il s'oppose, comme nous venons de le voir, à la variation du flux, cause efficiente de la génération des courants. On a donné à ces courants intérieurs aux masses métalliques le nom de courants de Foucault. Ce physicien, en effet, a mis en évidence les propriétés de ces courants en disposant un disque de cuivre A entre les pôles N', S' d'un puissant électro-aimant D (fig. 77).

Tant que l'électro n'est pas excité et ne développe par suite aucun champ magnétique, on peut imprimer au disque un mouvement rapide de rotation, à l'aide de la manivelle M qui commande un train d'engrenage approprié; mais dès que l'électro devient actif, on éprouve une résistance considérable et il faut dépenser une énergie mécanique très notable pour entretenir le mouvement de rotation.

Cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique, qui elle-même se dissipe sous forme de chaleur, en portant la masse du disque à une température très élevée.

Ces phénomènes se reproduisent dans les masses métalliques, de cuivre, de fer ou de fonte qui entrent dans la construction des dynamos, toutes les fois que ces masses sont traversées par des flux magnétiques variables.

Si les variations de flux sont très fréquentes, l'échauffe-

ment des pièces métalliques peut atteindre un degré dangereux pour la conservation de la machine et notamment pour les isolants qui recouvrent les circuits des bobines induites ou ceux des solénoïdes inducteurs.

Dans tous les cas, cette énergie ne peut être empruntée

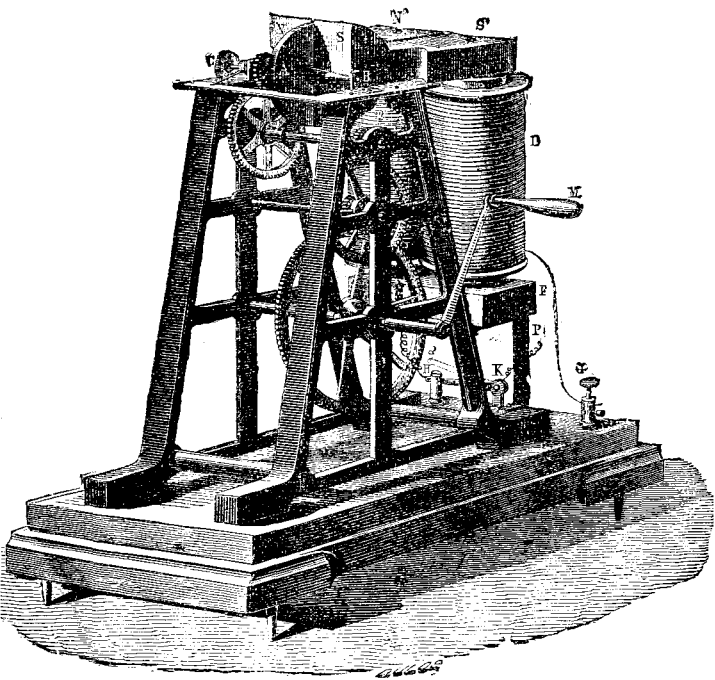


FIG. 77. — Appareil de Foucault.

qu'à la source d'énergie mise en œuvre, et comme elle se dépense à l'intérieur et se dissipe par l'effet Joule en chaleur qui ne peut être utilisée, elle constitue une perte qu'il convient de réduire autant que possible.

Pour y remédier, on constitue les noyaux et masses métalliques quelconques exposés à être traversés par des

flux variables, au moyen de faisceaux de fils de fer ou de piles de plaques minces, présentant dans leur ensemble une masse sectionnée qui n'offre plus de continuité aux circuits des courants induits.

A cet effet, (fig. 78), il faut que les plans de sectionnement soient parallèles aux lignes de force du flux inducteur, puisque les courants induits se développent dans des plans perpendiculaires à ces lignes.

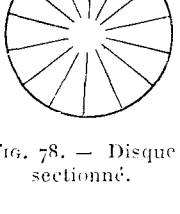


FIG. 78. — Disque sectionné.

Ainsi l'on supprimera presque entièrement les effets dont il s'agit dans le disque de Foucault, en le sectionnant par des traits de scie, dirigés radialement.

S'il s'agit d'un électro-aimant, dont la bobine excitatrice est traversée par un courant périodique changeant alternativement de sens, par exemple, comme les courants dits alternatifs, le noyau de fer sera formé de lames minces, isolées l'une de l'autre soit par une couche de vernis à la gomme laque, soit par du papier vernis ou paraffiné, et disposées parallèlement à l'axe, c'est-à-dire au flux de la bobine. C'est ainsi que l'on construit les carcasses des inducteurs de moteurs à courants alternatifs ou de transformateurs qui sont soumis aux flux engendrés par les courants variables utilisés dans ces appareils.

Les induits des dynamos à courant continus sont également le siège de courants de Foucault, puisqu'ils présentent, comme nous le verrons, un noyau de fer tournant dans un champ magnétique ; ils seront donc construits de même par des spires de fil de fer ou des rondelles de tôle mince, dont les plans devront être disposés perpendiculairement à l'axe de rotation, ou parallèlement au flux inducteur.

99. **Énergie absorbée par les courants de Foucault.** — Cette énergie dépend du taux de variation du flux dans la masse métallique ou du nombre des lignes de force coupées par seconde.

D'après Eric Gérard, la perte de puissance par centimètre cube de métal, pour un noyau cylindrique, serait donnée en ergs par l'expression :

$$W = \frac{R^2}{8\,r} \times (B_1 - B_0)^2$$

dans laquelle R est le rayon du cylindre, r la résistance spécifique du métal et $(B_1 - B_0)$ la variation de l'induction par seconde.

S'il s'agit par exemple d'un noyau en fer de rayon $R = 10$, pour lequel $r = 9{,}60$ microhms ou $0{,}0000096$ ohms, ou enfin 9600 unités C G S de résistance, puisque l'ohm vaut 10^9 unités C G S ; si l'induction que subit ce noyau varie de O à 10.000 dans une seconde, on aura :

$$W = \frac{100}{8 \times 9600} \times 10.000^2 = 130.200 \text{ ergs environ.}$$

Dans le cas d'un noyau à section rectangulaire, le même auteur propose la formule

$$W = \frac{e^2}{16\,r} \times (B_1 - B_0)^2$$

On voit que si l'épaisseur e est très faible, la perte sera très petite, de même si R est petit dans le cas du noyau cylindrique.

100. Courants de Foucault dans les conducteurs. — Un conducteur qui se déplace perpendiculairement aux lignes de force, dans un champ magnétique peut être considéré comme constitué par des fils parallèles, formant un faisceau d'épaisseur égale au conducteur. Chacun de ces fils devient le siège d'une force électro-motrice d'induction, et les différences de potentiel aux extrémités seront égales, si chaque filet coupe le même nombre de lignes de force dans un temps donné.

Il en sera ainsi si le champ est uniforme ou si, n'étant pas uniforme, l'épaisseur du conducteur est assez faible pour que le champ puisse être considéré comme uniforme dans l'espace occupé par ledit conducteur.

Les divers filets du faisceau pourront alors être considérés comme disposés en parallèle et seront parcourus par les courants dans le sens de la longueur.

Mais dans le cas de conducteurs de grande largeur, le champ ne présentera pas généralement la même intensité sur toute la section transversale.

Si nous considérons, par exemple (fig. 79) le conducteur MN, orienté comme il est indiqué en *a b*: la bande voisine de *a* coupera dans le même temps plus de lignes de force que celle voisine de *b*.

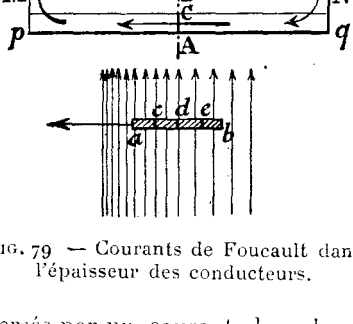


FIG. 79 — Courants de Foucault dans l'épaisseur des conducteurs.

Par suite, la différence de potentiel entre *q* et *p* sera plus grande qu'entre *k* et *r*. Il en résultera une circulation de courants de la lame *pq* dans la lame *rK*, de même que deux éléments de pile en opposition sont traversés par un courant dans le sens de la force électromotrice la plus grande.

Ces courants fermés, analogues aux courants de Foucault, constituent aussi des pertes qu'il convient d'éviter. On y parvient en pratique en prenant toutes les dispositions nécessaires pour supprimer les causes d'inégalité du champ, dans les divers cas, et en constituant les gros conducteurs par des torons de fils plutôt que par des barres massives de grande épaisseur.

101. Application des courants de Foucault. — Faisons tourner un aimant en fer à cheval (fig. 80) autour de son axe vertical XY, le mouvement relatif des pôles de l'aimant et du disque de cuivre placé en A B, détermine dans celui-ci des courants de Foucault qui, suivant l'étude exposée plus haut, doivent réagir sur l'aimant pour tendre à le faire tourner en sens inverse du mouvement dont il est animé. Par suite du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, l'aimant agit de même sur le disque et l'entraîne dans son mouvement de rotation.

Tout se passe comme s'il se produisait une sorte de frottement électro-magnétique entre les deux pièces en présence.

Arago avait imaginé cette expérience, mais en sens inverse : il faisait tourner le disque de cuivre à l'aide d'une manivelle et d'une transmission de mouvement par courroie : une aiguille aimantée, montée sur un pivot au-dessus du disque, était entraînée dans le même sens, par suite des réactions mutuelles des courants d'induction et du champ de l'aimant.

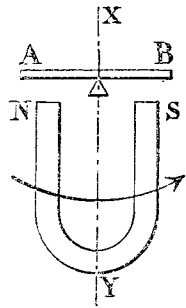


FIG. 80. — Rotation d'un disque par les courants de Foucault.

Dans tous les cas, la pièce entraînée tend à prendre la même vitesse que la pièce entraînante, mais toutefois, il doit exister une certaine différence de vitesse entre l'aimant et le disque, car si les deux pièces se déplaçaient d'un seul bloc pour ainsi dire et sans vitesse relative l'une par rapport à l'autre, il ne pourrait y avoir production de courant de Foucault et, par suite, aucune réaction n'interviendrait pour entretenir le mouvement.

On met également à profit l'observation faite par Gambey en 1824, qui avait remarqué que les oscillations d'un barreau aimanté s'amortissaient rapidement au-dessus d'une plaque conductrice fixe. C'est ainsi que l'on amortit les oscillations des aiguilles des galvanomètres, voltmètres, ampèremètres, en plaçant ces aiguilles à l'intérieur ou dans le voisinage de masses de cuivre ; les courants induits dans ces masses conductrices s'opposent au mouvement de l'aiguille et arrêtent ses oscillations.

102. Induction mutuelle. — Parmi les divers procédés qui permettent de produire les forces électro-motrices d'induction, nous avons déjà considéré le cas de deux bobines dont la première, que nous appellerons *primaire*, est traversée par un courant variable, la seconde étant disposée

de manière à recevoir suivant son axe le flux engendré par le courant de la première. La bobine *secondaire*, se trouvant traversée par un flux variable, devient le siège d'une force électro-motrice induite. C'est à ces phénomènes particuliers que l'on donne le nom *d'Induction mutuelle*.

Il est évident que le flux variable émané de la bobine primaire et reçu par la secondaire dépend des positions respectives des deux circuits, de leurs formes et du nombre de spires de chacun d'eux, pour un courant primaire d'intensité donnée.

Suivant ces multiples circonstances, le flux d'induction qui pénétrera dans le circuit secondaire pour un courant égal à l'unité passant dans le circuit inducteur, prendra des valeurs très différentes et que la théorie ne saurait évaluer que dans certains cas particuliers.

Quoi qu'il en soit, on donne le nom de *coefficient d'induction mutuelle* au taux du flux reçu par unité de courant inducteur, et on désigne ce coefficient par M; d'une manière générale, on a :

$$M = \frac{\text{Flux total dans induit}}{\text{Intensité du courant inducteur}}$$

Dans la plupart des cas il faut recourir aux mesures expérimentales pour déterminer le coefficient d'induction mutuelle de deux bobines, mais on peut l'évaluer simplement s'il s'agit de deux bobines concentriques et assez longues pour que l'influence des bases soit négligeables.

Dans ce cas, le champ magnétique développé par la bobine primaire comprenant n_1 spires par centimètre de longueur est :

$$H = 4\pi n_1 I,$$

Le flux passant par la section S de la bobine induite sera donc :

$$HS = 4\pi n_1 I S$$

Et comme ce flux traverse successivement les N_2 spires de cette bobine, le flux total sera :

$$N = 4\pi n_1 N_2 I S$$

Enfin le flux par unité de courant inducteur ou le coefficient de mutuelle induction sera :

$$M = \frac{N}{I} = 4\pi n_1 N_2 S$$

Connaissant le coefficient d'induction mutuelle M de deux circuits, on en déduit immédiatement le flux d'induction par la formule

$$N = M \times I$$

Si le courant inducteur I varie de I_0 à I_1 dans une seconde, la variation de flux sera :

$$N_1 - N_0 = M (I_1 - I_0)$$

Et la force électro-motrice induite dans la bobine secondaire sera toujours égale à cette variation divisée par 10^8, soit :

$$e = \frac{M \times (I_1 - I_0)}{10^8}$$

Cette formule suppose que M une fois déterminé est constant pour toutes les valeurs de I, or il n'en sera ainsi qu'à la condition que le circuit magnétique traversé par le flux présente une perméabilité constante, ce qui exige que les bobines ne contiennent pas de noyau de fer ou tout au moins que la valeur de M corresponde à une induction suffisamment éloignée de l'état de saturation du fer.

103. **Auto-induction.** — Jusqu'ici nous n'avons considéré que des circuits dans lesquels se développent des phénomènes d'induction, soit par le mouvement relatif de ces circuits et d'un champ magnétique, soit par l'influence mutuelle des circuits les uns sur les autres.

Mais il y a lieu de tenir compte également du champ magnétique relatif à un circuit considéré isolément, et des phénomènes d'induction qui peuvent se développer dans ce circuit sous l'influence des variations de son propre flux, dans le cas où le courant qui le traverse est lui-même variable.

C'est à ces phénomènes que l'on donne le nom *d'auto-*

induction ou *d'induction propre* et *encore de self-induction*.

Il faut considérer que tout circuit électrique est accompagné d'un flux transversal magnétique (fig. 81). Or, si ce flux est variable il devra produire nécessairement les mêmes phénomènes d'induction que s'il provenait d'un aimant ou d'un solénoïde distinct et le circuit deviendra le siège d'une force électro-motrice induite.

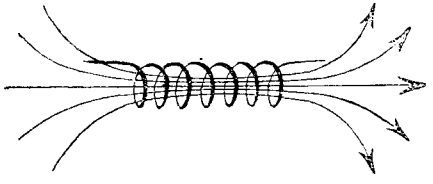


Fig. 81. — Self-induction d'un solenoïde.

Nous aurons encore un *coefficient de self-induction qui, par définition, sera le flux développé dans le solénoïde pour le courant égal à l'unité*, de sorte que l'on écrira :

$$L = \frac{\text{Flux total}}{\text{Intensité du courant}} = \frac{N}{I}$$

Ce coefficient dépendra nécessairement du nombre des spires du circuit, puisque le champ et le flux sont, l'un et l'autre, proportionnels à ce nombre de spires; on aura donc, comme précédemment, si toutefois la bobine est suffisamment longue :

$$H = 4\pi n \times I$$

de sorte que le flux total à travers les N spires sera :

$$N = 4\pi n \times N \times I \times S$$

Et le flux par unité d'intensité ou le coefficient de self-induction :

$$L = 4\pi n \times N \times S$$

ou, comme n est le nombre de spires par centimètre de longueur de la bobine et, par conséquent, est égal à $\frac{N}{l}$;

$$L = \frac{4\pi \times N^2 \times S}{l}$$

La définition du coefficient de self-induction permet d'écrire :

$$N = L \times I$$

Soit une variation $N - N_0$ du flux d'induction, correspondant à une variation $I_1 - I_0$ de l'intensité du courant inducteur par seconde, la force électro-motrice induite par cette variation aura pour expression :

$$V_s = \frac{L \times (I_1 - I_0)}{10^8}$$

La grandeur du coefficient d'induction L se mesure comme toute autre quantité en adoptant *une unité de même nature, que l'on définit comme étant le coefficient de self-induction d'un circuit qui, traversé par l'unité* C G S *d'intensité ou dix ampères, produit un flux d'induction égal à l'unité de flux de force.*

Mais, en pratique, on prend une unité 10^9 fois plus grande, à laquelle on donne le nom de *quadrant* ou d'*Henry*, de telle sorte que

$$\frac{L}{10^9} = Q = \frac{4\pi N^2 \times S}{l \times 10^9} \text{ quadrants.}$$

Par conséquent, la force électro-motrice étant exprimée en unités G G S :

$$E_s = L \times (I_1 - I_0)$$

Si nous remplaçons les unités C G S par leurs valeurs pratiques, soit L par $10^9 \times Q$ et J par $\frac{I}{10}$, nous aurons :

$$E_5 = 10^9 \times Q \times \frac{I_1 - I_0}{10} = 10^8\, Q \times (I_1 - I_0)\, C\, G\, S$$

Et pour transformer en volts :

$$\frac{E_5}{10^8} = Q \times (I_1 - I_0)$$

Donc on obtiendra la force électro-motrice en volts en exprimant la self-induction en unités pratiques, et le courant en ampères.

Le coefficient L de self-induction est constant seulement si la perméabilité du champ est elle-même invariable, il n'en est plus ainsi lorsqu'on introduit un noyau de fer dans le solénoïde, puisque alors la perméabilité dépend de

l'induction et, par suite, de l'intensité du courant magnétisant. Le flux de force, par suite de la présence du fer, est considérablement plus élevé que dans le cas d'un milieu constitué par l'air, et les phénomènes de self-induction prennent une intensité beaucoup plus grande.

Le coefficient devient alors, en tenant compte de la perméabilité qui multiplie les lignes de forces :

$$L = 4\pi \times n \times N \times \mu \times S$$

D'une manière générale, on voit que la self-induction se manifeste particulièrement dans les bobines présentant un nombre de spires plus ou moins considérables, puisque l'effet se répète sur chaque spire traversée par le flux d'induction.

Un conducteur rectiligne sans enroulement ne pourra être le siège que d'une self-induction très faible; on peut également atténuer et annuler presque entièrement les effets d'induction dans une bobine en faisant l'enroulement au moyen d'un fil plié en double, dont les deux brins se trouvent, par conséquent, parcourus en sens inverse par les courants excitateurs, et produisent des effets magnétiques de sens inverse dont la résultante est nulle sur les spires de la bobine.

104. Courants de self-induction. — Les courants et force électro-motrice de self-induction obéissent à la loi de Lenz comme à celle de la conservation de l'énergie, ils doivent donc être opposés à la cause qui tend à les produire; si donc le courant augmente, faisant croître le flux de force à l'intérieur du circuit, la force électro-motrice de self-induction devra être de sens inverse à la force électro-motrice de la source extérieure qui fait passer le courant dans le circuit; si le courant diminue avec le flux qui l'accompagne, la force électro-motrice de self-induction sera de même sens et viendra ajouter son action à celle de la force électro-motrice extérieure pour compenser la réduction du flux de force.

L'énergie totale fournie par une source d'électricité à un circuit pourvu de self-induction se divise en deux parts;

l'une correspondant à la puissance absorbée par la résistance du circuit, l'autre à la puissance développée dans le champ magnétique ; celle-ci se transforme en énergie électrique par les phénomènes de self-induction ; on a toujours d'après la loi de la conservation de l'énergie :

$$E \times I = R \times I^2 + e \times I$$

d'où l'on tire :

$$E = R\,I + e$$

et :

$$I = \frac{E - e}{R}$$

On voit donc que le courant qui passe dans le circuit est moindre que si la force électro-motrice de self-induction n'existait pas, lorsque e se retranche de E, c'est-à-dire quand le courant est dans une période de croissance.

On remarque également que le courant I est dû à une force électro-motrice qui est la résultante, d'une part, de la force électro-motrice engendrée par la source d'énergie électrique, d'autre part, de la force électro-motrice de self-induction.

Si le flux diminuait on aurait :

$$I = \frac{E + e}{R}$$

puisque les forces électro-motrices s'ajouteraient pour s'opposer à cette réduction.

105. **Courant de rupture.** — Un cas particulier qu'il est intéressant d'examiner est celui où la variation de courant se produit brusquement, soit par la rupture d'un circuit, soit par sa fermeture.

Quand on ferme un circuit, on constate que le courant ne s'établit pas instantanément et n'arrive que progressivement à son intensité de régime ; il se produit, en effet, une force électro-motrice de self-induction, de sens inverse à celle du courant, qui retarde l'établissement de celui-ci.

Dans le cas d'une rupture brusque, le flux passe rapidement d'une valeur déterminée à une valeur nulle ; la force électro-motrice de self-induction sera donc de même

sens que celle de la source extérieure, elle s'ajoutera à celle-ci et sera d'autant plus intense que la variation du flux se sera produite dans un temps plus court. La force électro-motrice peut alors prendre une valeur très élevée et suffisante pour faire passer un courant de grande intensité dans le circuit, alors même qu'il est coupé. Ce courant se manifeste par une étincelle dite *d'extra-courant de rupture* qui jaillit entre les extrémités séparées du circuit.

Ces extra-courants, dus à des forces électro-motrices instantanées, souvent très considérables, peuvent endommager les fils des bobines et brûler ou percer les isolants, par suite de la différence de tension énorme qui peut exister entre les diverses spires de l'enroulement.

Pendant la période variable d'établissement du courant à la fermeture, l'énergie fournie par la pile se transforme en partie en chaleur dans la résistance du circuit, et s'emmagasine en partie sous forme de flux de force.

Si le courant varie de **0** à l'intensité I de régime, la variation du flux est égale à $L \times I$. Pour avoir le travail correspondant il faut multiplier ce flux par le courant moyen qui est égal à $\frac{I}{2}$; de sorte que l'énergie emmagasinée sous forme magnétique a pour expression :

$$w = L \times I \times \frac{I}{2} = \frac{1}{2} L \times I^2$$

Quand on ouvre le circuit, le courant passe inversement de I à **0**, et restitue la même quantité d'énergie sous forme d'extra-courant de rupture.

Le phénomène est analogue à celui du mouvement d'un volant : pour le faire démarrer et vaincre son inertie, il faut lui communiquer un travail supérieur à celui des résistances qui s'opposent à son mouvement ; l'excédent de travail dépensé s'emmagasine dans la masse du volant, et quand la force motrice cesse d'agir le mouvement ne s'arrête pas brusquement, car l'énergie emmagasinée dans le volant se dépense pour l'entretenir encore quelque temps.

Nous empruntons à l'ouvrage de M. Paul Janet l'exposition suivante qui permet de se rendre un compte exact des phénomènes de self-induction :

1° Soit une bobine (fig. 82) à grande self-induction AB et une lampe à incandescence L placée en dérivation aux extrémités A et B de cette bobine. Si le système est traversé par un courant permanent de faible intensité, la lampe sera peu éclairante; mais si le courant étant interrompu, on le rétablit brusquement, la self-induction de AB s'oppose au passage du courant qui passe en quantité beaucoup plus grande par L en faisant briller la lampe d'un vif éclat. Quand ensuite le courant a atteint sa valeur de régime, la lampe cesse de briller.

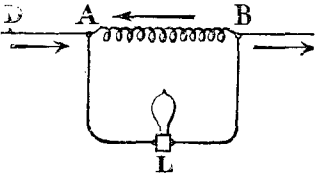


FIG. 82. — Force contre-électromotrice de self-induction.

2° A ce moment, si l'on rompt brusquement le circuit en *d*, par exemple (fig. 82), la lampe redevient brillante,

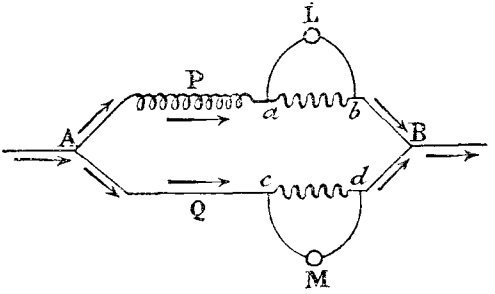


FIG. 83. — Retard à l'établissement du courant.

étant traversée par l'extra-courant de rupture, dû à la force électro-motrice de self-induction de la bobine.

3° Deux lampes L et M sont placées en dérivation sur deux résistances égales, *a b* et *c d*, qui sont elles-mêmes

intercalées dans les deux branches P et Q d'un circuit électrique (fig. 83). Dans la branche P se trouve un circuit à grande self-induction. En régime permanent, on constate que les deux lampes L et M sont également lumineuses, mais au moment où l'on établit le courant, la lampe M placée sur la branche Q s'allume sensiblement avant la lampe L précédée du circuit à self-induction P.

Ce fait met bien en évidence le retard que la self-induction détermine dans l'établissement du courant ;

4° Si l'on alimente les deux branches d'un circuit (fig. 84) comprenant chacune une bobine à self-induction et une lampe, au moyen d'un courant alternatif, c'est-à-dire d'un courant qui change alternativement de sens d'une façon périodique, les lampes présenteront le même éclat ; mais si l'on vient introduire dans la bobine M par exemple, un barreau de fer, le flux de self-induction augmente considérablement et détermine une force électro-motrice de sens inverse, qui a pour effet de réduire le courant dans cette branche, jusqu'à éteindre la lampe L.

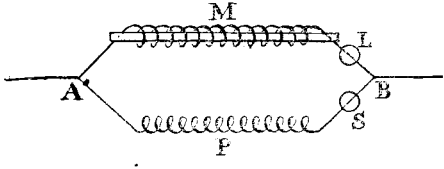


FIG. 84 — Influence d'un noyau magnétique.

Tout se passe comme si la résistance de la bobine M augmentait, et l'on exprime ce fait en disant que la self-induction a pour effet d'accroître la *résistance apparente* de la bobine.

La force contre-électro-motrice de self-induction équivaut à un accroissement de résistance du circuit, au point de vue de l'intensité du courant, mais il est bien entendu que la résistance réelle du circuit ne change pas et présente toujours le même nombre d'ohms, quelle que soit la nature du courant qui le traverse.

CHAPITRE V

LES DYNAMOS

106. **Principe des dynamos.** — Les lois de la conservation et de la transformation de l'énergie nous ont appris que l'on peut obtenir l'énergie électrique en la produisant directement par une dépense d'énergie mécanique. Les phénomènes d'induction que nous venons d'exposer constituent le moyen d'opérer cette transformation ; nous avons vu que les déplacements des conducteurs, dans un champ magnétique, exigent un certain effort pour vaincre la résistance au mouvement, et un travail mécanique équivalent à l'énergie électrique engendrée.

Les machines dynamo-électriques, qui constituent les sources d'électricité presque exclusivement employées aujourd'hui par l'industrie, sont des appareils dans lesquels l'énergie électrique est obtenue par les procédés de l'induction.

Une dynamo comprendra donc en principe deux organes principaux : l'*inducteur* qui doit créer le champ des lignes de force magnétique et l'*induit* comportant des circuits conducteurs où se développeront la force électro-motrice et le courant d'induction.

Le champ inducteur peut être produit, soit par des *aimants permanents*, soit *par des électro-aimants*.

Mais nous savons que les lignes de force émanées des

pôles des aimants permanents sont beaucoup moins denses que celles qui émanent des électros, et cela pour plusieurs raisons.

D'abord, les aimants permanents, qui sont nécessairement en acier, ne peuvent atteindre une intensité d'aimantation aussi grande que le fer doux qui entre dans la construction des électros, et, de plus, bien que doués d'une grande force coercitive, ils ne conservent sous forme de magnétisme rémanent qu'une partie de l'aimantation acquise dans le champ magnétisant qui les a formés.

D'autre part, l'aimantation ne peut fournir qu'un champ magnétique dont l'intensité est égale à $4\pi \times J$, alors que l'induction magnétique dans les électros recouverts de solénoïdes excitateurs est augmentée de l'intensité H du champ provenant du solénoïde :

$$B = H + 4\pi \times J.$$

Le champ d'induction B comprend donc deux termes, l'un $4\pi \times J$ dans lequel J a la valeur maximum correspondant au champ magnétisant H, et le terme complémentaire H lui-même.

L'aimantation J d'un aimant permanent ne dépassant pas 800 unités C G S, le champ y relatif atteindrait au maximum $800 \times 4\pi = 10{,}000$, alors que l'induction B des électro-aimants s'élève facilement à 20.000 et peut atteindre et dépasser 45.000 lignes de forces.

Par ces diverses considérations, on conçoit que l'obtention des champs très intenses que comportent les puissantes machines industrielles exigerait des aimants permanents d'un volume et d'un poids considérable: c'est pourquoi les machines dites magnéto-électriques, à aimants permanents, sont presque entièrement délaissées aujourd'hui et remplacées par les machines à électro-aimants dites machines *dynamo-électriques* ou simplement *dynamos*.

Carcasse magnétique. — L'électro-aimant constitue en général la carcasse de la machine et fait partie intégrante du bâtis, qui porte les paliers et les coussinets dans lesquels tourne l'arbre de l'induit mobile.

La forme des inducteurs est très variée ; la plus usitée toutefois est celle de l'électro-aimant en fer à cheval (fig. 85). Dans ce cas, l'inducteur se compose de trois parties bien distinctes : 1° Les noyaux N et M, sur lesquels s'enroulent les spires des solénoïdes inducteurs ; 2° la culasse C qui réunit les deux noyaux ; 3° les pièces polaires A et B.

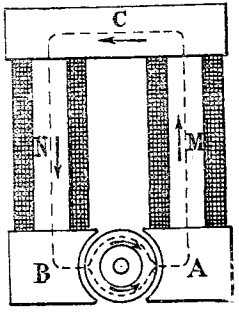


Fig. 85. — Carcasse magnétique en fer à cheval.

Lorsque les bobines excitatrices placées sur les noyaux sont parcourues par un courant, le flux se développe dans les noyaux et se propage dans le sens des flèches marquées sur l'axe du faisceau des lignes de forces, soit du pôle Nord au pôle Sud entre les pièces polaires, et du pôle Sud au pôle Nord à travers la culasse, à l'intérieur de l'inducteur.

Le circuit induit devra nécessairement se déplacer entre les deux pôles de l'inducteur et il sera disposé de manière à recevoir un mouvement de rotation autour d'un axe perpendiculaire à la ligne des pôles B A. Dans ce mouvement il décrira un cylindre, et comme il convient qu'il coupe les lignes de force le plus près possible de leur émergence des pôles, ceux-ci devront être alésés suivant une surface cylindrique concentrique à celle décrite par le conducteur.

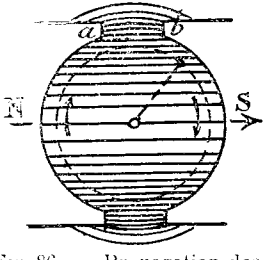


Fig. 86. — Propagation des *lignes de force dans l'entrefer*

C'est pourquoi les pièces polaires sont évidées suivant deux demi-cylindres, embrassant la trajectoire cylindrique du conducteur (fig. 86).

Avec une telle disposition, l'*entrefer*, c'est-à-dire la portion du circuit magnétique constitué par l'intervalle d'air compris entre les deux surfaces concaves des pôles, aura une longueur relativement grande et exigera, pour créer le flux nécessaire, une grande dépense d'ampères-tours. En outre, la densité du flux sera faible sur la plus grande partie de la trajectoire du conducteur, car les lignes de force s'accumuleront de préférence vers les becs tels que *a b*, dans les régions situées en dehors de cette trajectoire.

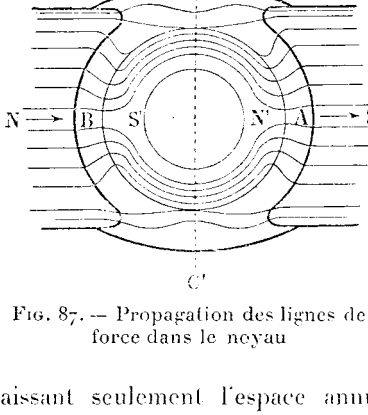


Fig. 87. — Propagation des lignes de force dans le noyau

Armature. — Pour remédier à cet inconvénient, on vient combler pour ainsi dire le vide entre-polaire par un pont magnétique, un cylindre de fer N'S' (fig. 87) que l'on utilisera d'ailleurs pour fixer les conducteurs induits, et qui remplira l'intervalle, en laissant seulement l'espace annulaire voulu pour loger l'épaisseur du circuit induit et maintenir le jeu nécessaire au mouvement mécanique de l'induit mobile.

Les entrefers se trouvent ainsi réduits au minimum, ainsi que la dépense d'excitation en ampères-tours.

Ce noyau ou *armature*, ainsi appelé parce qu'il joue en effet le rôle de l'armature, en fermant presque entièrement le circuit magnétique, a généralement la forme d'un manchon plus ou moins allongé, à parois épaisses.

Il ne serait pas nécessaire théoriquement de fixer les conducteurs induits sur le noyau, et l'on pourrait les faire tourner dans l'entrefer en laissant l'armature immobile, mais dans la pratique, cette disposition comporte de grandes difficultés de construction et l'on adopte la solu-

tion la plus simple, qui consiste à faire tourner simultanément l'armature et le circuit induit qu'il supporte.

Il est d'ailleurs facile de voir que le flux magnétique n'est nullement déformé ni influencé par le mouvement de rotation de l'armature : grâce à sa forme cylindrique, en effet, qu'il tourne ou qu'il soit en repos, il occupe toujours dans l'espace le même volume annulaire, et le flux se divise en deux parties égales, l'une dans le demi-anneau supérieur, l'autre dans celui inférieur. La pièce de fer doux qui joue le rôle d'armature s'aimante entre les pièces polaires et prend elle-même deux pôles S' et N', qui sont toujours situés sur l'axe polaire N S, que l'anneau soit immobile ou en mouvement.

Il convient de remarquer toutefois que si le champ inducteur est fixe dans l'espace, malgré le déplacement d'une partie de son circuit, il n'en est pas moins vrai que ce flux traverse les diverses molécules de l'anneau dans un ordre constamment variable, suivant que ces molécules se rapprochent soit des points S' et N' où elles sont soumises à l'aimantation maxima : soit des points c et c' où leur aimantation est nulle, les points c et c' étant situés sur l'axe neutre de l'aimant annulaire. En résumé, une molécule quelconque a une aimentation sud dans la demi-circonférence de gauche, nord dans celle de droite, son aimantation change donc deux fois de sens par tour, en passant par o aux points c et c' sur le diamètre perpendiculaire à l'axe polaire inducteur.

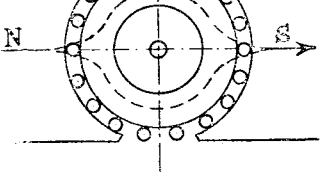


FIG. 88. — Conducteur engendrant un cylindre.

CONDUCTEURS INDUITS. — En ce qui concerne les conducteurs induits qui doivent couper les lignes de force du champ, on voit tout de suite qu'ils peuvent être disposés soit parallèlement à l'axe de rotation, soit perpendiculairement à cet

axe, suivant que ledit axe sera lui-même normal ou parallèle aux lignes de forces, car il faut que le conducteur coupe toujours normalement le champ inducteur.

Ces deux dispositions donneront lieu à des constructions tout à fait différentes. Le premier type (fig. 88) correspond au cas où le conducteur décrit un cylindre, et il comporte par suite la disposition des pièces polaires évidées et l'emploi d'une armature sur laquelle sont fixés les conducteurs induits.

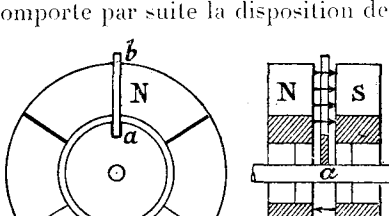


FIG. 89. — Conducteur engendrant un disque.

Dans la seconde disposition (fig. 89), les conducteurs tels que *a b* tracent, dans leur mouvement de rotation, le volume d'un disque, compris entre deux groupes de pôles aplatis. Les pôles opposés peuvent alors être très rapprochés l'un de l'autre, juste à la distance déterminée par l'épaisseur des conducteurs, augmentée simplement du jeu nécessaire.

Dans ces conditions, l'entrefer étant réduit au minimum, il devient inutile d'intercaler une carcasse magnétique entre les pièces polaires pour faciliter le passage du flux, et l'on peut fixer les conducteurs sur des supports constitués en toute autre matière que le fer.

107. **Mode de génération des courants dans les dynamos.** — Dans tous les cas, les courants qui prennent naissance dans les conducteurs des dynamos obéissent aux lois de l'induction. Nous prendrons, comme exemple d'application, le premier type ayant ses conducteurs parallèles à l'axe de rotation et fixés sur une armature en fer cylindrique.

Considérons le conducteur *a* solidaire du noyau, auquel on imprime un mouvement de rotation continu dans le sens des flèches du dessus (fig. 90).

A partir de la position a sur l'axe polaire, en face du pôle N, le conducteur monte verticalement, suivant une direction perpendiculaire aux lignes de force, c'est-à-dire qu'il décrit un plan normal au flux, et, pour un déplacement déterminé, coupe le maximum de lignes de forces. Il sera donc le siège d'une force électro-motrice maxima dans le voisinage de a.

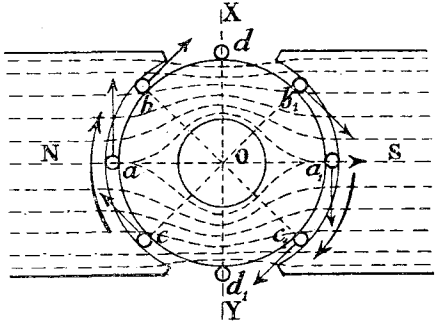


FIG. 90. — Génération des courants dans les conducteurs des dynamos.

Au fur et à mesure qu'il s'éloigne de ce point, il coupe obliquement les lignes de force sous un angle de plus en plus aigu; le flux coupé pour un même chemin parcouru sur la circonférence est donc de plus en plus faible, et la force électro-motrice développée va en diminuant.

Arrivé en d, sur l'axe X Y perpendiculaire à l'axe polaire N S, le conducteur se déplace parallèlement aux lignes de forces et glisse entre elles, pour ainsi dire, sans les couper; dans la région d, par conséquent, la force électro-motrice est nulle.

De d en a_1, au contraire, le conducteur va couper les lignes de force suivant des directions de moins en moins obliques et sa force électro-motrice croîtra jusqu'au maximum correspondant à la position a_1.

On verra de même que la force électro-motrice va en décroissant de a_1 au point d_1 pour lequel elle sera nulle, et en croissant de nouveau de d_1 à a.

Il y a lieu de s'occuper également du sens de la force électro-motrice; la règle de Fleming nous montre que pour toutes les positions dans lesquelles le conducteur va

en montant, comme en *b*, par exemple, le courant se dirige d'avant en arrière du tableau et en sens inverse pour les positions à la descente.

Comme le conducteur monte dans toute la demi-circonférence située à gauche de l'axe X Y et descend dans le parcours de la demi-circonférence de droite, on voit que deux forces électro-motrices de sens inverse correspondent à chacune de ces demi-circonférences.

Il en résulte que la force électro-motrice change de sens dans un conducteur, au moment où celui-ci coupe l'axe X Y soit en *d* soit en d_1, et alors que sa force électro-motrice devient nulle. C'est d'ailleurs une loi générale et évidente qu'une quantité ne peut changer de signe ou de sens qu'à condition de passer par la valeur zéro.

Ainsi une locomotive en marche doit nécessairement s'arrêter et annuler sa vitesse avant de rebrousser chemin pour changer le sens de son mouvement.

La ligne X Y, perpendiculaire au champ inducteur de direction N S, suivant laquelle se fait le changement de sens des courants, s'appelle la *ligne neutre ;* on donne aussi le nom *de plan de commutation* au plan mené suivant cette ligne perpendiculairement à l'axe polaire.

En résumé, un conducteur fixé suivant la génératrice de l'armature et entraîné dans son mouvement de rotation est le siège d'une force électro-motrice variable, qui s'annule deux fois par tour dans le plan de commutation, prend deux valeurs maxima dans le plan de l'axe polaire et change deux fois de sens, en conservant le même sens dans chacune des demi-circonférences situées de part et d'autre du plan de commutation.

108. **Représentation graphique de la force électro-motrice variable.** — Il est commode et très utile, dans la théorie des dynamos, de représenter géométriquement, par des longueurs proportionnelles, les valeurs variables de la force électro-motrice induite à chaque instant. Supposons que la circonférence décrite par le conducteur (fig. 91) soit divisée en un nombre quelconque d'angles égaux et très petits, tels que *a o b*, *d o g*, que le mobile

ou le conducteur décrit successivement dans des temps égaux.

Prenons comme origine du mouvement le point A situé sur l'axe neutre perpendiculaire à la ligne des pôles NS. Le flux coupé par le mobile dans cette région, pour un déplacement angulaire très petit peut être considéré comme nul. Dans une région quelconque $a\,b$, la section droite du flux est $c\,b$: dans la région $d\,g$ située sur l'axe polaire NS, la section est égale à $d\,g$ et maximum pour l'angle considéré.

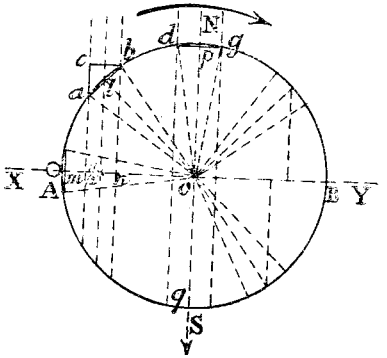


Fig. 91. — Représentation graphique de la force électro-motrice variable.

Les angles $a\,o\,b$ et $d\,o\,g$ étant égaux par hypothèse, $a\,b = d\,g$.

Or les deux triangles $l\,h\,o$, $a\,c\,b$ sont semblables comme ayant leurs trois côtés respectivement perpendiculaires deux à deux et l'on aura :

$$\frac{a\,b}{c\,b} = \frac{o\,l}{h\,l} = \frac{o\,p}{h\,l}$$

puisque $o\,p$ est très sensiblement égal au rayon $o\,i$. par suite de l'exiguïté des angles considérés.

D'autre part, $a\,b$ ou $d\,g$ et $c\,b$ sont proportionnels aux flux dans les régions correspondantes, et les flux coupés sont proportionnels aux forces électro-motrices développées dans ces régions: on peut donc écrire :

$$\frac{d\,g}{c\,b} = \frac{flux\ d\,g}{flux\ c\,b} = \frac{o\,p}{h\,l} = \frac{force\ électro\text{-}motrice\ d\,g}{force\ électro\text{-}motrice\ c\,b}$$

C'est-à-dire que les forces électro-motrices développées dans le conducteur en chaque point de son cycle, sont proportionnelles aux perpendiculaires telles que $l\,h$ et $p\,o$

abaissées des différents points de la circonférence, occupées successivement par le conducteur, sur l'axe neutre perpendiculaire au champ inducteur.

Cette représentation géométrique nous montre clairement que la force électro-motrice est nulle dans le plan de commutation Y X ; qu'elle va en croissant jusqu'en N sur l'axe polaire ; qu'elle décroît ensuite, devient nulle en B, change de signe, croît jusqu'en q, décroît et redevient nulle en A où elle change de signe pour croître et reprendre sa valeur de départ en p.

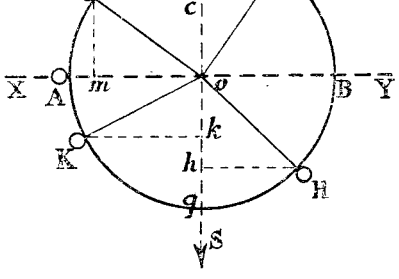


FIG. 92. — Représentation graphique par la projection d'un vecteur tournant.

Nous obtiendrons encore un mode de représentation continu de la variation de la force électro-motrice en assimilant le mouvement du conducteur à celui du bouton de manivelle et en projetant à chaque instant sur l'axe polaire le rayon oC (fig. 92 : les projections oc, od, oh, ok, etc., donneront à chaque instant les valeurs de la force électro-motrice, si le rayon oC représente à une échelle déterminée la force électro-motrice maxima.

Si nous admettons maintenant que ce rayon est pris pour unité, la longueur de la circonférence sera égale à 2π fois ce rayon, c'est-à-dire à 2π.

Le mobile ou le conducteur fait donc par tour un chemin égal à 2π et si nous désignons par T le temps de cette rotation, l'arc parcouru par seconde sera égal à $\frac{2\pi}{T}$. Ce chemin, qui correspond à un certain angle $\frac{360°}{T}$ est ce

qu'on appelle la *vitesse angulaire* que l'on désigne souvent par la lettre grecque ω et l'on pose :

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Si la vitesse de rotation est uniforme, comme nous le supposons, les parcours effectués sur la circonférence sont proportionnels aux temps correspondants et *les diverses fractions des temps du cycle peuvent être représentées par les fractions d'arc de circonférence.*

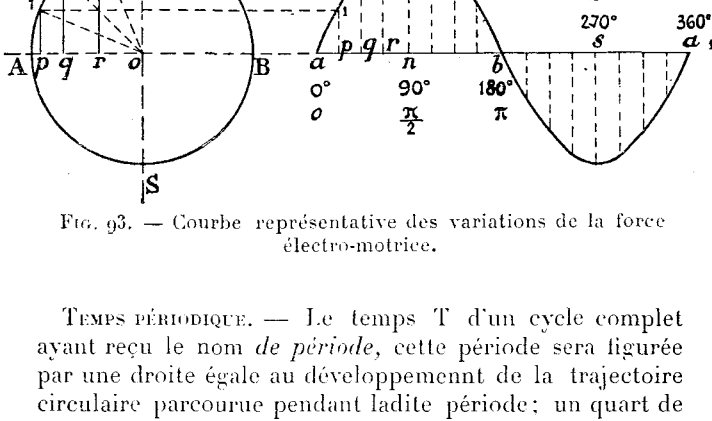


Fig. 93. — Courbe représentative des variations de la force électro-motrice.

Temps périodique. — Le temps T d'un cycle complet ayant reçu le nom *de période,* cette période sera figurée par une droite égale au développemennt de la trajectoire circulaire parcourue pendant ladite période; un quart de période par exemple, sera représenté par le quart du développement et ainsi de suite.

Ainsi, coupons la circonférence ci-dessus (fig. 93) au point A, par exemple et développons ce circuit en ligne droite. Soit aa_4, à une échelle déterminée, le développement cherché ; la longueur aa_4, représente à volonté 2π où 360 degrés ou le temps T de la période.

La circonférence étant supposée divisée en angles égaux par les points 1,2,3, etc., les points correspondants de la droite des temps aa_4 diviseront aussi cette

droite en parties ou fractions de temps égales. En chacun de ces points de division de *a a*, nous élèverons les perpendiculaires ou ordonnées, sur lesquelles nous projetterons les diverses longueurs *p1*, *q2*, *r3*, et nous aurons ainsi, à tous les instants de la période, la représentation cynématographique pour ainsi dire des variations de la force électro-motrice d'induction, pour une période complète.

Il est à remarquer ici que le temps périodique est égal à celui d'un tour, et que le nombre de périodes dans un temps donné, par seconde par exemple, se confond avec le nombre de tours pendant le même temps. Mais cela tient à ce que nous avons considéré une machine bipolaire qui ne présente sur le pourtour de la circonférence que deux pôles, de sorte que le conducteur partant du pôle nord, passe devant le pôle sud et revient au même pôle nord après un tour complet.

La force électro-motrice variable passe donc par toutes les *phases* possibles positives et négatives correspondant à la période complète, quand elle a franchi deux fois *l'espace interpolaire;* mais s'il y a quatre pôles disposés sur le pourtour de la circonférence, il y aura quatre espaces interpolaires et, par suite, deux périodes complètes par tour.

En général dans les machines multipolaires le nombre de périodes par tour sera égal au nombre de paires de pôles.

Dans ces conditions, il convient de noter que la circonférence considérée plus haut ne correspond plus à l'induit réel de la machine, mais constitue une circonférence fictive qui serait parcourue par un mobile, avec la même vitesse et dans le même temps que le conducteur met à parcourir l'espace interpolaire qui sépare deux pôles de même nom.

Fréquence. — Le nombre de périodes par seconde s'appelle *fréquence* ou *périodicité*.

Si T est le temps périodique, le nombre de périodes par seconde, sera égale à $\frac{1}{T}$, ce sera également le nombre de tours pour une machine à inducteur bipolaire.

Dans une machine multipolaire, la fréquence sera égale au nombre de tours à la seconde, multiplié par le nombre de paires de pôles. Ainsi pour une machine à 8 pôles, dont 4 nord et 4 sud, faisant 15 tours par seconde, la fréquence sera égale à :

$$4 \times 15 = 60 \text{ périodes.}$$

Cette fréquence correspond à $60 \times 2 = 120$ changements de sens de courants ou *alternativités*.

Enfin, remarquons que la vitesse angulaire, dans le cas des machines multipolaires, n'est plus égale à $\omega = \frac{2\pi}{T}$, mais à $\frac{\omega}{n} = \frac{2\pi}{n \times T}$, n étant le nombre des paires de pôle.

Valeur de la force électro-motrice instantanée. — Nous voyons encore que la force électro-motrice variable ou instantanée d'un courant peut être exprimée, à chaque instant, en fonction de la force électro-motrice maximum représentée par l'ordonnée maximum de la courbe et l'on écrira :

$$e = E \text{ max.} \times K.$$

K *étant un coefficient variable avec le temps de la période et variant de 1 à 0, comme les diverses ordonnées de la courbe considérée.* Ainsi pour l'ordonnée égale à la moitié de l'ordonnée maximum ou pour $K = \frac{1}{2}$, la force électro-motrice sera :

$$e = \frac{E \max}{2}.$$

Cette force électro-motrice correspondrait à l'angle de 30 degrés avec oA.

109. **Courants déphasés.** Si l'on relie les deux extrémités du conducteur mobile par l'intermédiaire de connexions flexibles avec les extrémités d'un circuit extérieur, un courant électrique prendra naissance dans l'ensemble du circuit en vertu de la force électro-motrice d'induction développée dans le conducteur. Ce courant sera périodique et alternatif comme la force électro-motrice qui le

produit, et ses variations pourront être représentées par une courbe semblable.

Il est évident que l'on peut disposer plusieurs conducteurs en même temps sur l'armature et en les reliant chacun à des circuits différents, obtenir autant de courants distincts.

Les forces électro-motrices de ces courants seront toutes semblables, elles présenteront les mêmes variations, auront la même période et le même maximum ou *amplitude*, mais elles différeront toutefois, en ce que les mêmes valeurs se produiront à des instants différents de la période.

Ainsi, quand la force électro-motrice sera maximum dans le circuit relié au conducteur *a*, elle sera nulle dans celui desservi par le conducteur, *d*, fig. 94.

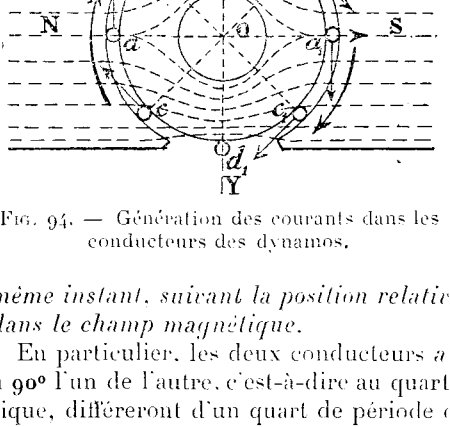


Fig. 94. — Génération des courants dans les conducteurs des dynamos.

La force électro-motrice et les courants engendrés dans les divers conducteurs différeront donc entre eux, au même instant, suivant la position relative qu'ils occupent dans le champ magnétique.

En particulier, les deux conducteurs *a* et *d* étant placés à 90° l'un de l'autre, c'est-à-dire au quart du cycle magnétique, différeront d'un quart de période ou, comme on dit, *ils seront décalés l'un par rapport à l'autre* d'un quart de phase.

Les courbes 1 et 2 devront donc être représentées simultanément l'une en retard sur l'autre (fig. 95, de telle sorte que le zéro de la première se produisant à l'origine des temps considérés, le zéro de la seconde ne s'éta-

blisse qu'un quart de période plus tard, et de même pour

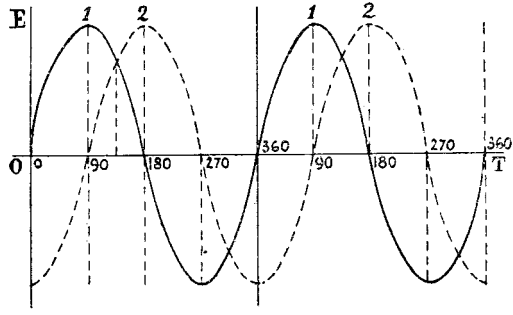


Fig. 95. — Courbes de force électro-motrice décalées d'un quart de phase.

les maxima et toutes les autres valeurs deux à deux semblables, positives ou négatives.

110. **Collecteur.** — Le conducteur dans lequel se développe la force électro-motrice d'induction étant mobile, il faut nécessairement relier ce conducteur au circuit extérieur d'utilisation, qui lui est fixe, au moyen de contacts mobiles.

Le procédé universellement adopté consiste à souder les extrémités des conducteurs à deux bagues de cuivre, fixées sur l'arbre de rotation et isolées tant entre elles que par rapport à l'arbre. La connexion avec le circuit extérieur se fait au moyen de deux ressorts ou balais attachés respectivement à chacune des extrémités de ce circuit et s'appuyant sur les bagues qui peuvent tourner en glissant, tout en maintenant la continuité du contact, fig. 96.

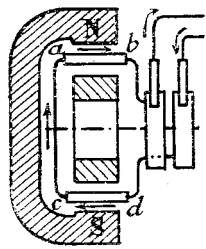


Fig. 96. — Bagues collectrices.

La force électro-motrice d'un seul conducteur ne peut jamais atteindre une grande valeur, mais on multiplie l'effet produit en

additionnant les forces électro-motrices individuelles d'un nombre plus ou moins considérable de conducteurs disposés simultanément sur le pourtour de l'armature.

Ainsi l'on voit immédiatement la possibilité d'obtenir une force électro-motrice double en reliant en série, comme deux éléments de pile, qui sont aussi des sources de forces électro-motrices, les deux conducteurs ab et cd diamétralement opposés.

Ces conducteurs en effet, se trouvent au même instant semblablement placés par rapport au champ magnétique, abstraction faite du sens des lignes de force : ab étant situé dans l'axe du pôle Nord, par exemple, cd occupe la même position relative en face du pôle Sud. Ces deux conducteurs sont donc en cet instant le siège d'une force électro-motrice maximum ; ils se trouveront aussi en même temps dans le plan neutre de commutation avec une force électro-motrice nulle, pour tous les deux.

Il est vrai que les forces électro-motrices, quoique de même valeur, sont de signe contraire ; mais il est facile de voir, en suivant le circuit dans le sens des flèches, que cette circonstance est au contraire favorable pour faciliter les connexions entre les deux conducteurs, de manière à ce que les forces électro-motrices et les courants soient concordants dans toutes les parties du circuit.

Avec cette disposition de collecteur à deux bagues isolées, on recueille, dans le circuit extérieur, le courant tel qu'il se produit dans les conducteurs induits de l'armature ; c'est-à-dire que le courant utilisé sera un courant alternatif et périodique ainsi que nous l'avons défini ci-dessus.

111. **Courants redressés.** — Collecteurs commutateurs. — Ce renversement périodique du sens des courants alternatifs, n'a aucun inconvénient dans la plupart des applications industrielles, notamment pour l'éclairage et la force motrice ; mais il est incompatible avec certaines autres applications, comme l'électrolyse, qui exigent un courant de sens invariable.

Pour obtenir un pareil courant, étant donné que les courants d'induction sont toujours produits dans les géné-

ratrices à l'état alternatif, il faut nécessairement les redresser, de manière à les diriger continuellement dans le même sens, à leur entrée dans le circuit d'utilisation. De là le nom de *courants redressés* que l'on donne aux courants ainsi transformés.

A cet effet, on remplace les deux bagues précédentes par un collecteur formé de deux coquilles de cuivre (fig. 97) faisant partie d'un même cylindre concentrique à l'axe et isolées par deux sections pratiquées suivant deux génératrices diamétralement opposées.

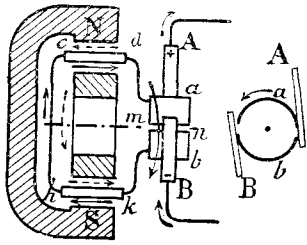


FIG. 97. — Redressement des courants.

Les balais dans le dessin ci-contre sont disposés de manière à établir leur contact avec le cylindre sectionné, suivant les génératrices situées dans le plan de commutation. D'autre part, les lignes de séparation des demi-cylindres du collecteur doivent être placées dans le même plan que les conducteurs, contrairement aux indications du dessin dans lequel les conducteurs ont été reportés à 90 degrés de part et d'autre de la position qu'ils devraient réellement occuper, afin d'éviter leur projection commune sur l'axe de l'armature.

En définitive, les dispositions doivent être telles que les conducteurs soient situés dans le plan de commutation au même instant où le contact des balais se fait suivant les lignes de sectionnement des deux cylindres.

On arriverait encore à ce résultat, en plaçant réellement les conducteurs dans la position relative où ils figurent sur le dessin et en déplaçant les balais de 90 degrés dans la position indiquée à droite, en pointillé ; dans ces conditions en effet, la fente du collecteur viendrait au contact des balais, en même temps que les conducteurs passeraient dans le plan de commutation perpendiculaire au tableau.

On remarquera que dans le premier système, les conduc-

teurs et les lignes de séparation du collecteur sont dans le même plan; que dans le second cas, les uns et les autres sont dans deux plans faisant entre eux un angle droit; nous retrouverons ces deux dispositions dans les dynamos industrielles à courants continus.

Ceci posé, voyons comment on obtiendra dans le circuit extérieur un courant toujours de même sens. Supposons que le système induit tournant dans le sens de la flèche, le demi-cylindre *a* soit en arrière de la position qu'il occupe sur le dessin et, par suite, en contact avec A, tandis que le demi-cylindre *b* sera en contact avec B.

Le courant suivra alors les flèches en trait plein: il passera de *d* en *a* et A, suivra le circuitextérieur et rentrera dans l'induit par B, *b* et *k*.

Un moment après, l'induit continuant à tourner, la ligne de séparation *mn*, ainsi que les conducteurs supposés ramenés dans leur situation réelle, seront dans le plan de commutation: pendant un instant très court, chacun des balais sera à cheval sur les deux demi-cylindres à la fois, de sorte que tout se passera comme si les deux pièces étaient soudées par l'intermédiaire de ces balais, et le circuit intérieur formé par les deux conducteurs induits sera en court-circuit, c'est-à-dire fermé sur lui-même.

Comme d'ailleurs, à cet instant, les conducteurs sont dans le plan neutre, ils ne sont le siège d'aucune force électro-motrice et si la self-induction n'existait pas, qui a pour effet de prolonger le courant au delà de la force électro-motrice, le courant s'annulerait également dans le circuit considéré.

Faisant, pour le moment, abstraction des phénomènes de self-induction, nous remarquerons que le court-circuit se prolongera d'autant plus que la fente de sectionnement du collecteur sera plus large et occupera une fraction plus considérable de la circonférence du cylindre. Ce court-circuit serait pour ainsi dire instantané, si la fente était réduite à une ligne géométrique, mais en pratique, pour assurer l'isolement, il est nécessaire de lui donner une largeur assez notable.

Quoi qu'il en soit, au point où nous en sommes, le conducteur $c\,d$ étant en avant du tableau, va traverser en descendant le plan de commutation et sa force électromotrice changeant de sens, sera dirigée suivant la flèche pointillée : il en sera de même dans le conducteur $h\,k$ qui remonte derrière le tableau.

Si, dans cet état, ce dernier conducteur, par exemple, qui est toujours relié au demi-collecteur b, était resté en relation avec le balais B, il aurait déversé dans ce balais et, par suite, dans le circuit extérieur un courant de sens inverse à celui qui le traversait précédemment. Mais il faut remarquer que le secteur b a abandonné le balais B au moment même où le conducteur traversait le plan de commutation et changeait son courant dans le sens pointillé; que le même secteur est maintenant en contact avec A dont le courant primitif concorde justement avec le nouveau de $h\,k$.

En un mot, par le jeu même du commutateur qui a pour effet d'intervertir les communications des balais et des secteurs au moment où le courant change de sens dans l'induit, le balais A est toujours en relation avec un conducteur positif, le balais B avec un conducteur négatif; autrement dit, les pôles des balais sont invariables et le courant est toujours de même sens dans le circuit extérieur.

Ces forces électro-motrices redressées peuvent être représentées par la série de courbes ci-contre, qui s'obtient

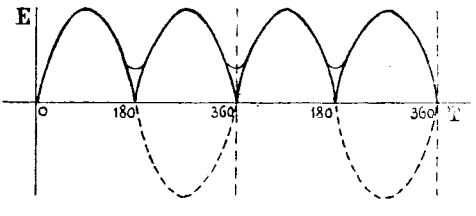


Fig. 98. — Courbes représentatrices de courants redressés.

des courbes alternatives ordinaires, en redressant la partie négative en dessous de l'axe des temps, pour la reporter en dessus (fig. 98).

Le courant suit les mêmes oscillations; toutefois, par suite des phénomènes de self-induction, l'intensité du courant ne devient jamais nulle et la courbe d'intensité présente des angles arrondis, sans descendre jusqu'à l'axe des temps.

Nous verrons également que la self-induction a pour effet de retarder le courant par rapport à la force électromotrice, de telle sorte qu'en réalité, la courbe d'intensité ne se confond pas avec celle de la force électro-motrice, la première étant en retard sur la seconde : autrement dit ces deux courbes sont décalées d'un certain angle de phase, l'une par rapport à l'autre.

112. Courants continus. — Les courants redressés diffèrent des courants alternatifs en ce qu'ils sont toujours dirigés dans le même sens, mais leur intensité est variable à chaque instant, comme celle de ces derniers courants.

Il peut être utile, au contraire, d'avoir à sa disposition des courants de force électro-motrice constante, ou, comme on les appelle, des courants continus.

Ces courants s'obtiendront en reliant en série les divers conducteurs répartis sur le pourtour de l'induit de façon que leurs forces électro-motrices s'ajoutent.

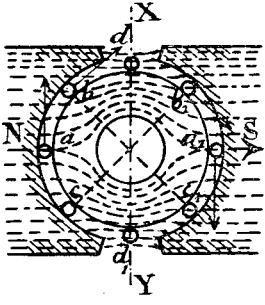


Fig. 99. — Génération des courants dans les conducteurs des dynamos.

Supposons, par exemple (fig. 99), que les conducteurs d, b_1, a_1, c_1, d_1 soient réunis bout à bout, par des connexions intermédiaires et forment ainsi un circuit ininterrompu. Tous ces conducteurs, placés d'un même côté du plan de commutation sont le siège de forces électro-motrices de même sens, qui s'additionnent. Mais ces diverses forces électro-motrices sont à chaque instant à des phases différentes de leur période. Elles sont décalées, l'une par rapport à l'autre, de l'angle correspondant à cha-

cune d'elles, et, dans le cas particulier de la figure, de 45 degrés ou d'un huitième de période.

Si l'on n'avait relié ensemble que les conducteurs d et a, qui sont décalés de 90 degrés, leurs forces électro-motrices respectives seraient représentées par les deux courbes pleine et pointillée du graphique ci-contre fig. 100. La

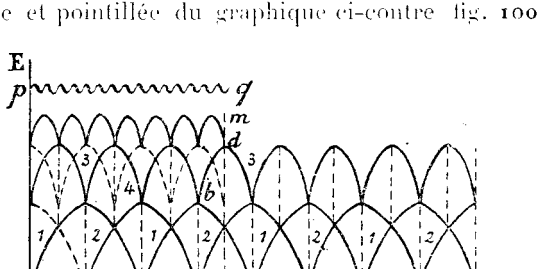


FIG. 100. — Composition des forces électro-motrices partielles.

force électro-motrice résultante, obtenue en ajoutant deux à deux les ordonnées correspondantes de ces courbes 1 et 2 sera représentée par la courbe 3 supérieure. Les ordonnées de cette dernière courbe varient seulement de ab à cd au lieu de varier de o à ab comme les courbes partielles.

Il est évident maintenant que si l'on introduit les conducteurs b_1 et c_1 dans le circuit, leurs courbes vont s'intercaler également entre les courbes précédentes en prenant leurs points de départ à 45 degrés et à 135 degrés. La résultante de ces deux nouvelles courbes sera analogue à la courbe 3 et sera représentée par la courbe pointillée n° 4.

Enfin, la résultante totale obtenue en sommant les ordonnées des courbes 3 et 4, sera la courbe ondulée supérieure dont les ordonnées minima et maxima comptées au-dessus de l'axe des T, ne diffèrent que de la hauteur de la boucle dm.

Ainsi l'on voit que l'on peut réduire autant que l'on veut les oscillations de la force électro-motrice, de manière

à obtenir une courbe très légèrement ondulée, se rapprochant sensiblement d'une droite telle que pq, en augmentant suffisamment le nombre des conducteurs répartis sur chacune des demi-circonférences de l'induit.

Enroulement induit. — Indiquons maintenant la véritable disposition des conducteurs dans les dynamos industrielles et prenons pour exemple l'un des types les plus employés, l'induit du genre *Gramme*.

Cet induit est constitué par un manchon de fer doux, sur lequel on enroule les spires d'une bobine qui recouvrent entièrement la surface du noyau et forment un circuit sans fin, entièrement fermé sur lui-même (fig. 101). Les spires étant régulièrement juxtaposées et jointives, il est nécessaire que le fil soit isolé et il est recouvert à cet effet de plusieurs couches de coton.

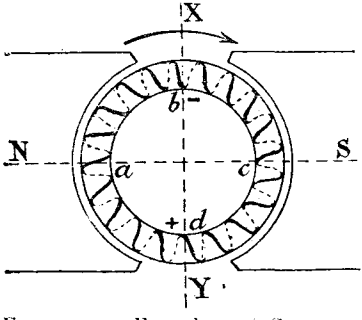


Fig. 101. — Enroulement Gramme.

Chacune des spires composant l'enroulement sera le siège d'une force électro-motrice variable, exactement comme les conducteurs considérés précédemment.

La spire a, dont le plan passe par l'axe polaire NS, n'est traversée par aucune ligne de force ; son flux est nul, mais sa force électro-motrice est maximum, car pour le moindre déplacement à partir de cette position, la variation du flux sera maximum. La spire b, au contraire, est traversée par un flux maximum, qui conserve théoriquement la même valeur pour un petit déplacement en deçà ou au delà de la ligne neutre, la variation est donc nulle et la force électro-motrice est nulle.

Il convient donc de noter qu'au flux minimum correspond la force électro-motrice maximum, et inversement, la force électro-motrice est minimum pour le flux maximum.

Au surplus, si nous considérons isolément une spire tournant entre les deux pôles inducteurs, nous remarquerons qu'elle se compose de deux brins (fig. 102) $a\,b$ et $c\,d$ disposés parallèlement à l'axe, le long des génératrices de l'anneau, et de deux fils de raccordement ou de connexion $a\,c$ et $b\,d$. Or la partie $a\,b$ seule est active, car elle coupe normalement les lignes de force qui traversent l'entrefer; celles-ci canalisées dans l'épaisseur de l'anneau ne traversent pas le vide intérieur et ne sont pas coupées par le fil $c\,d$; enfin, les fils de connexion $a\,c$ et $b\,d$ tournent dans des plans parallèles au champ et ne coupent non plus aucune ligne de force.

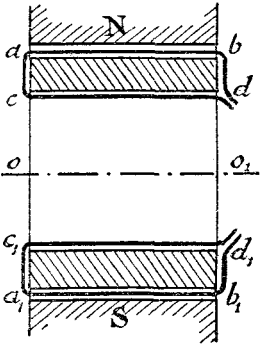


FIG. 102. — Spire de l'enroulement Gramme.

Le fil $a\,b$ est donc le seul dans lequel se développe la *force électro-motrice d'induction*, et il joue exactement le rôle des conducteurs primitivement considérés.

On peut donc assimiler de toutes manières à ces conducteurs les spires de l'anneau Gramme, et celles-ci sont individuellement le siège de forces électro-motrices variables, s'annulant deux fois par tour dans le plan de commutation, changeant deux fois de sens, en passant d'une moitié du champ dans l'autre.

Reportons-nous à la figure 101; d'après ce qui vient d'être dit, les forces électro-motrices sont égales et opposées dans chacune des moitiés de l'anneau, de part et d'autre de l'axe X Y. Les diverses spires sont le siège de forces électro-motrices individuelles qui s'ajoutent dans chaque moitié de l'enroulement, et l'on peut assimiler chaque spire à un élément de pile, et l'ensemble à une batterie (fig. 103) dont les deux moitiés seraient en opposition par leurs pôles de même nom, en b et d.

Dans ces conditions les forces électro-motrices se

contre-balancent et il ne se produit aucun courant, mais si l'on vient réunir par un circuit extérieur les deux points *b* et *d*, on offrira ainsi une issue aux courants des deux demi-piles, qui passeront dans le circuit extérieur en ajoutant leurs intensités. On aura :

$$I = 2i$$

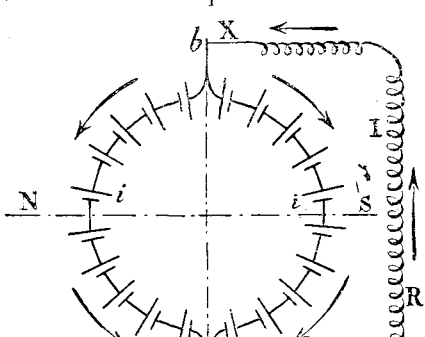


Fig. 103. — Assimilation à un couplage de deux batteries de piles.

D'autre part, la force électromotrice sera due uniquement à celle engendrée par l'une des demi-batteries et si *r* est la résistance intérieure de chacune d'elles, la résistance réduite de l'ensemble des deux batteries en dérivation sur les points *a* et *b*, sera $\frac{r}{2}$: soit enfin R la résistance du circuit extérieur, les lois d'Ohm et de Kirchhoff donneront :

$$E = I \times \left(\frac{r}{2} + R. \right)$$

Ainsi l'enroulement Gramme est assimilable à deux batteries de pile en dérivation, qui déterminent aux points de raccordement b *et* d *placés sur l'axe neutre, deux pôles, positif et négatif, entre lesquels existe une différence de potentiel développée par la moitié des spires de l'induit ; chacune des moitiés de l'enroulement est parcourue par la moitié du courant extérieur.*

113. **Collecteur sectionné.** — Pour recueillir le courant sur l'induit, il suffirait donc de placer en *b* et *d*, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de l'armature, deux frotteurs reliés d'autre part aux extrémités du circuit extérieur. Ce

procédé suppose que les spires sont nues, ce qui se présente d'ailleurs dans certaines machines récentes.

Mais, en général, les enroulements sont constitués par des fils isolés et les frotteurs ou balais ne peuvent être mis directement en contact avec les spires. On a alors recours au *collecteur sectionné*, ou *commutateur*.

Celui-ci, dont la construction détaillée sera expliquée ultérieurement, se compose de plusieurs lames métalliques, isolées l'une de l'autre et disposées de manière à former par leur ensemble un cylindre fixé sur l'arbre, en avant de la dynamo. Si nous supposons que chaque spire de l'induit est reliée par un fil à l'une des lames du collec-

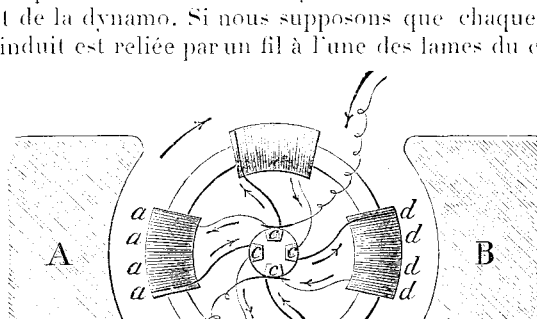


Fig. 104. — Connexions de l'anneau de Gramme.

teur *c*, ces lames seront entraînées dans le mouvement de rotation de l'induit et accompagneront pour ainsi dire les spires correspondantes dans leur révolution. On obtiendra donc le même résultat en faisant appuyer les frotteurs sur les lames que sur les spires dénudées (fig. 104).

En réalité, pour ne pas augmenter d'une manière exagérée le nombre de lames, on observe que les spires enroulées dans un espace angulaire restreint occupent dans le champ des positions très sensiblement équivalentes au point de vue magnétique, et sont soumises à très peu près à la même induction.

La région neutre, notamment, n'est pas réduite à la ligne de commutation et s'étend à une certaine distance de part et d'autre de cette ligne. On peut donc diviser l'enroulement en un certain nombre de *sections* ou *bobines*, composées de plusieurs spires en tension et considérer chacune de ces sections comme un seul élément dont la phase sera la même que celle de la spire médiane, nulle quand cette spire sera dans le plan de commutation, maximum quand la même spire sera placée suivant l'axe polaire.

Ces diverses bobines sont d'ailleurs reliées l'une à l'autre pour ne former qu'un seul circuit sans fin. Ce sont les points de connexion des deux bobines consécutives qui sont reliés aux diverses lames du collecteur.

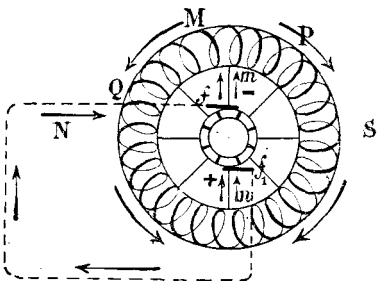


Fig. 103. — Explication du jeu du commutateur.

On comprend maintenant quel est le jeu du commutateur (fig. 103). Les courants des deux moitiés d'induit se déversent dans le circuit extérieur par les fils de connexion *m* et *n*. Un moment après, l'induit étant supposé tourner dans le sens des aiguilles d'une montre, ce sont les deux fils *f* et f_1 qui seront venus dans le plan de commutation et les lames correspondantes du collecteur auront remplacé les lames primitives dans leur contact avec les balais. De cette manière, ceux-ci dont les points de tangence sont par hypothèse sur la ligne neutre, sont constamment tenus en communication avec les points de raccordement des deux courants de l'induit, malgré la rotation de celui-ci,

En même temps que la bobine M placée à gauche du plan de commutation passe à droite en changeant de signe et prend la place de la bobine P, elle est remplacée

par la bobine Q qui la suit immédiatement dans l'ordre de l'enroulement. Les diverses bobines et les lames correspondantes se substituent ainsi les unes aux autres, sous les balais, au moment même où se produit la commutation des courants, de sorte que chaque bobine est éliminée successivement du compartiment de gauche, pour entrer dans celui de droite, dès que sa force électro-motrice change de signe.

La distribution des courants est donc immuable, dans les deux moitiés de l'induit situées de chaque côté de la ligne neutre et dans le circuit extérieur dont les pôles ne changent pas et qui reçoit un courant toujours de même sens et de force électro-motrice légèrement ondulatoire, mais qui peut être considérée comme pratiquement constante, si le nombre des bobines est suffisamment grand. On obtient ainsi, dans le circuit extérieur d'utilisation, un *courant continu*.

114. Variation des potentiels au collecteur. — De même que dans une batterie de piles, le potentiel va en croissant du pôle négatif au pôle positif, le potentiel croît du balai négatif au positif, puisqu'il s'augmente des potentiels respectifs de toutes les spires intercalées entre ces deux balais (fig. 106).

Pour se rendre compte des accroissements successifs du potentiel en passant d'une bobine à l'autre, ou, ce qui revient au même, d'une lame à l'autre, on imagine que l'un des pôles, le négatif par exemple, est maintenu au potentiel zéro par une liaison métallique à la terre. On porte alors sur le prolongement des rayons passant par les diverses lames du collecteur, des longueurs proportionnelles aux potentiels de celles-ci et qui, par le fait, représentent les différences de potentiel entre la première lame en contact avec le balai négatif et les lames successives.

Supposons, en effet, que le potentiel de la lame *a* soit de 10 volts, celle de la première lame *d* étant égale à zéro, par hypothèse, la différence entre *a* et *d* sera de 10 — 0 volts, soit exactement 10 volts.

De même, si le potentiel de b est de 12 volts, la différence $(b - d)$ sera également 12 volts.

Enfin, la différence de potentiel entre a et b sera de 12 — 10 ou 2 volts, et sera représentée par la différence entre les deux ordonnées de la courbe $a' a$ et $b' b$.

On peut représenter cette courbe autrement en coupant la circonférence du collecteur en d et développant cette circonférence suivant $d\,d_1$; les ordonnées représentées à une plus grande échelle détermineront la courbe $d\,a\,c\,d_1$, qui donne la variation du potentiel tout le long du collecteur, entre les deux balais.

On voit que la variation du potentiel, d'une lame à l'autre, ou d'une bobine à l'autre, est maximum sur la ligne

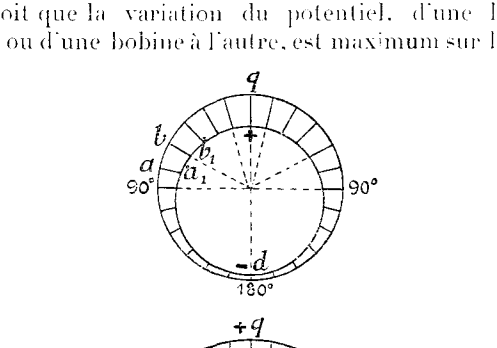


Fig. 106. — Représentation graphique de la variation du potentiel

des pôles, dans la région qui correspond aux points d'inflexion a et c de la courbe. Sur la ligne neutre, la variation est insensible, elle est théoriquement nulle et les ordonnées voisines du point q ou des points d et d_1 résultant du dédoublement du point d, ne diffèrent pas entre elles.

115. **Décalage des balais.** — La position que nous avons assignée aux balais et d'après laquelle les lignes de cou-

tact sur le collecteur sont situées dans le plan de commutation, résulte de la distribution des courants dans l'induit. Puisque cette distribution est telle que les deux moitiés d'enroulement sont parcourues par des courants inverses de part et d'autre de la ligne neutre, on ne peut mieux faire, *a priori*, pour recueillir ces courants, que de placer les deux balais en contact sur les extrémités du diamètre qui se confond avec la ligne neutre.

Supposons donc qu'il en soit ainsi et examinons ce qui va se passer dans ces conditions.

Remarquons que la bobine M située dans l'angle *a o e*, se trouvant placée entre les deux pièces polaires, symétriquement par rapport à la ligne neutre, n'est le siège d'aucune force électro-motrice appréciable.

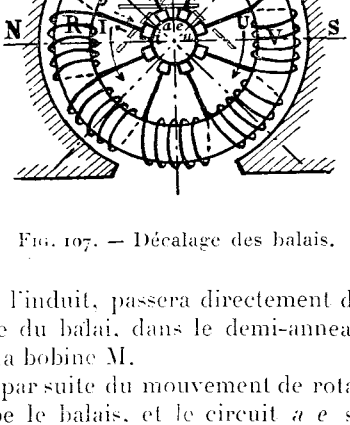


Fig. 107. — Décalage des balais.

A ce moment, le balai supérieur, pour ne parler que de celui-là, touche à la fois et réunit les deux lames *a* et *e* du collecteur ; la bobine M est alors en court circuit, c'est-à-dire que le courant venant de A et se divisant entre les deux moitiés de l'induit, passera directement de *a* en *e*, par l'intermédiaire du balai, dans le demi-anneau de droite, sans traverser la bobine M.

Immédiatement après, par suite du mouvement de rotation, la touche *e* échappe le balais, et le circuit *a e* se trouvant coupé, le demi-courant qui doit se déverser dans l'enroulement de droite, devra passer soit par *a* A et la bobine M, soit par l'espace d'air encore très petit qui sépare l'extrémité de sortie du balais de la lame *e*.

Ici intervient la self-induction de la bobine M. Le courant ne peut s'établir brusquement dans cette bobine,

puisqu'il donne naissance à un flux produisant une force électro-motrice opposée à la force électro-motrice principale qui détermine le courant général dans l'induit. Cette force électro-motrice antagoniste sera d'autant plus efficace que la bobine contiendra plus de fils et que le noyau magnétique sur lequel elle est enroulée sera plus perméable. Elle s'opposera donc au passage du courant qui continuera à passer par *a e*, malgré la rupture, sous forme d'étincelles plus ou moins intenses.

Il pourrait même arriver que la durée du court-circuit qui ne dépasse guère 0.001 de seconde, fût assez faible pour que le courant de régime qui traversait la bobine M avant qu'elle ait atteint la position moyenne du court-circuit, se prolonge en vertu de la self induction, dans cette position même. La bobine M sera donc traversée par un courant de sens inverse à celui de la nouvelle section dans laquelle elle doit pénétrer, au moment de la rupture, et le courant de cette section s'écoulera encore par le balai, avec production d'étincelles.

Tout ce qui précède s'appliquera également à la bobine mise en court-circuit par le balai inférieur.

Si maintenant on plaçait les balais en arrière du mouvement, sur le diamètre P' *o*, ce serait la bobine reliée aux touches *i* et *a* du commutateur qui serait mise en court-circuit. Mais, pour cette position, la bobine se trouvant sous la surface polaire, sera le siège d'une force électro-motrice d'induction qui, si faible soit-elle, développera dans l'enroulement relativement faible de cette bobine en court-circuit, un courant très intense.

Celui-ci, à la rupture, lorsque la touche *a* abandonnera le balai, développera une force électro-motrice de self-induction, par le flux variable qu'elle déterminera dans le fer de l'anneau et même dans les parties voisines de l'inducteur venant fermer ce circuit magnétique local. Cette force électro-motrice de self-induction sera, comme précédemment, opposée à la force électro-motrice générale de l'induit, qui s'exerce dans la section de droite, où la bobine est prête à pénétrer. La bobine présentera encore

par sa force électro-motrice de self-induction, une résistance plus grande au passage du courant que l'intervalle de rupture entre le balai et la lame *a*, qui sera franchi sous forme d'étincelle.

Enfin, en troisième lieu, supposons les balais calés suivant le diamètre *o Q*. La bobine en court-circuit sera, comme dans le premier cas, à l'état neutre, si le courant qui la traversait à gauche a pu s'annuler pendant le passage dans la région neutre, ou sera le siège d'une force électro-motrice de self-induction antagoniste par rapport au courant de droite.

Mais dans cette nouvelle position, la bobine en court-circuit se déplace dans le champ magnétique du pôle sud, qui développe une force électro-motrice d'induction inverse de celle développée par le pôle nord, et aussi, par conséquent, opposée à la force électro-motrice de self-induction, qui tend toujours à prolonger le courant de gauche. Ce dernier sera donc rapidement annulé et ensuite remplacé par un courant de droite, de même sens que celui de la section dans laquelle entre la bobine permutée.

Si donc, pendant la durée du court-circuit, le courant développé dans cette bobine atteint l'intensité normale du courant de la section de droite, elle entrera dans cette section toute prête pour assurer la continuité du courant, sans accroissement ni diminution, et n'opposera aucune force antagoniste au flux électrique. La commutation s'effectuera sans modification dans le régime du courant de la bobine permutée, sans réaction et sans étincelles.

Ainsi l'on voit que l'on met à profit l'induction de l'électro-aimant, pour combattre et annuler les effets de self-induction des bobines permutées.

Pour cela, il faut nécessairement caler les balais en avant du plan de commutation, de telle sorte que la bobine mise en court circuit soit induite par le pôle de la nouvelle section dans laquelle elle doit entrer.

Cette induction est évidemment opposée à celle du courant qui traversait la bobine au moment du court cir-

cuit, et aussi à la force électro-motrice de self-induction qui concorde avec ce courant de manière à le prolonger.

Il faut, de plus, que cette induction soit assez puissante pour développer dans la bobine permutée, pendant le temps de la mise en court-circuit, un courant d'une intensité égale à celle de la moitié de la section où pénètre la bobine. Cette intensité est égale à la moitié du débit de la dynamo, et elle doit être de même sens que celle de la section d'entrée.

La force électro-motrice inverse développée par le pôle placé en avant du mouvement, dépend de l'intensité du champ dans la région de commutation et de la vitesse de déplacement de la bobine dans ce champ. La force antagoniste de self-induction dépend du coefficient de la bobine, de l'intensité du courant qui la traverse et de la perméabilité du circuit magnétique dans lequel se développe le flux de force afférent à cette bobine.

Il en résulte qu'il faut d'autant plus décaler les balais en avant du diamètre de commutation, que le courant débité par l'induit est plus intense, puisque la force électro-motrice de self-induction augmente en proportion, et que pour annuler celle-ci il faut porter la bobine permutée plus en avant dans le champ inducteur, pendant la mise en court-circuit, pour y développer une force électro-motrice inverse, capable de faire équilibre à la self-induction de la bobine.

Ainsi le décalage des balais est nécessité par l'existence simultanée de la self-induction et du collecteur sectionné, dont les effets combinés ont pour résultat de déterminer la production d'étincelles, à chaque rupture du circuit normal, correspondant à la substitution successive des diverses lames du collecteur au contact des balais.

L'angle de calage étant variable avec le courant, les balais devront être portés sur un support mobile, comme nous le verrons ultérieurement.

Le décalage des balais est une nécessité inhérente au fonctionnement même des dynamos à courant continu et à l'emploi des collecteurs sectionnés que comporte la

construction de ces machines. Toutefois, il convient de remarquer que, dans les dynamos bien établies, ce décalage est relativement faible et surtout ne donne pas lieu à des variations très notables.

116. Réaction d'induit. — Angle vrai de décalage. — Les deux moitiés de l'anneau recouvertes de solénoïdes parcourus par les courants en sens inverse (fig. 108) peuvent être assimilées à deux électro-aimants en fer à cheval développant deux pôles conséquents ss, nn, sur leurs faces accolées, suivant la ligne neutre X Y.

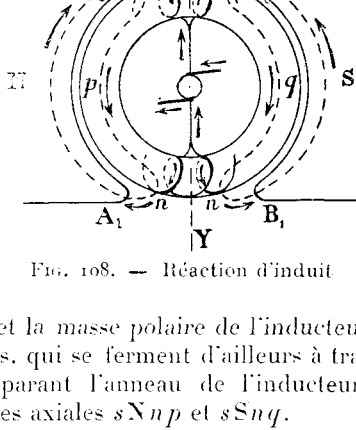


Fig. 108. — Réaction d'induit

Il se produit donc deux champs magnétiques dont les circuits sont constitués par *chaque moitié d'anneau et la masse polaire de l'inducteur voisine*. Ces deux circuits, qui se ferment d'ailleurs à travers les espaces d'air séparant l'anneau de l'inducteur, sont indiqués par les lignes axiales $sNnp$ et $sSnq$.

Si l'on désigne par N le nombre total de spires de l'induit et par $\frac{I}{2}$ le courant traversant chacune des moitiés de l'enroulement, la force magnéto-motrice qui détermine la propagation du flux dans chacun des circuits, sera d'après la formule générale :

$$0.4\,\pi\,\frac{N}{2}\times\frac{I}{2}=\frac{1.256\times N\times I}{4}$$

Il est facile de voir que ces flux d'induit s'ajoutent au flux inducteur principal vers les becs A et B_1 desquels les spires s'éloignent dans les espaces interpolaires, et sont au contraire de sens inverse à ce flux vers les becs B et A_1, dont elles s'approchent. Les deux catégories de flux s'ajou-

tent donc dans le premier cas et se retranchent dans le second.

Il en résulte une sorte de distorsion du champ magnétique, car le maximum de flux (fig. 109) se trouve reporté de la ligne moyenne XY sur le diamètre VZ qui fait un angle i avec le premier axe, dans le sens du mouvement.

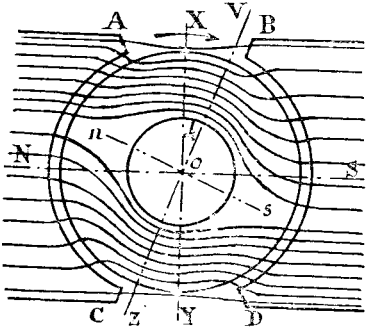


Fig. 109. — Distorsion du champ magnétique.

Ainsi la ligne neutre est reportée en avant suivant VZ, par suite du champ dû à l'induit. Le décalage des balais serait donc nécessaire, même si la selfinduction des bobines en court-circuit n'existait pas.

Remarquons que si le flux maximum à l'intérieur de l'induit est reporté en avant sur le diamètre VZ, il n'en sera pas de même du champ inducteur résultant, qui est au contraire affaibli dans les régions B et C des becs d'avant. Il en résulte un nouveau décalage des balais, qui doivent être reportés encore plus en avant dans le sens du mouvement, de manière à amener les bobines en court circuit dans un champ plus intense.

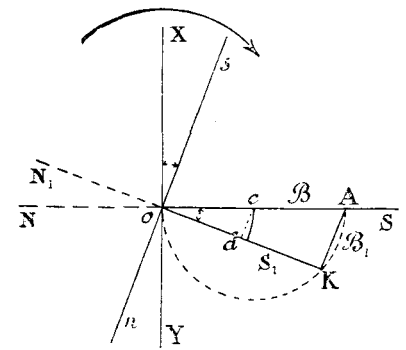


Fig. 110. — Détermination graphique de l'angle de calage.

Détermination géométrique. — A la nouvelle ligne

neutre correspond le nouveau champ résultant dirigé suivant N_1S_1 (fig. 110). Les deux champs composants ou plutôt les forces composantes des deux champs, ne sont autre chose que les intensités d'induction B et B_1 du champ inducteur et du champ d'induit. La première force B est dirigée suivant OS. Nous la représenterons à une échelle convenue par la longueur OA. La seconde force B_1 est dirigée suivant Os, diamètre de contact des balais décalés, que nous supposons connu par anticipation. Nous porterons cette seconde force à la suite de OA, dans la direction voulue AK, suivant la règle de la composition des forces.

La droite OK, qui joint les extrémités des deux forces, sera leur résultante.

Comme AK est parallèle à Os perpendiculaire elle-même sur le champ résultant OK, par hypothèse, l'angle en K est un angle droit et, en vertu des lois de la géométrie, la demi-circonférence construite sur OA comme diamètre passera par K.

Dès lors, pour déterminer la direction du diamètre décalé Os, on appliquera la règle suivante : tracer la circonférence sur B comme diamètre ; du point A avec B_1 pour rayon, tracer un arc de cercle qui coupe la circonférence en K ; mener OK, qui donne en grandeur et en direction le champ résultant, et, par O, mener la perpendiculaire Os à l'axe dudit champ ainsi déterminé.

L'angle XOs égal à l'angle AOK, comme ayant leurs côtés respectivement perpendiculaires deux à deux, est l'angle de décalage des balais, correspondant à la réaction du champ induit.

Il est évident que cet angle dépend du rapport de B_1 et de B ; si B_1 est petit vis-à-vis de B, l'angle sera presque nul et le décalage insignifiant : si B_1 était égal à $\frac{B}{2}$, l'angle atteindrait la valeur de 30 degrés.

Mais dans les machines bien construites, le décalage ne dépasse pas 20 degrés à la charge maxima et sa valeur moyenne est généralement comprise entre 8 et 15 degrés.

Dans ces conditions d'angles très petits, si nous prenons sur O A une longueur O $c = 1$ et abaissons la perpendiculaire cd, celle-ci se confondra approximativement avec l'arc de rayon 1 passant par c et pourra, comme cet arc, servir de mesure à l'angle de calage.

Or, les deux triangles semblables donnent :

$$\frac{B_1}{B} = \frac{cd}{1} = \text{arc } cd, \text{ par approximation.}$$

Soit par exemple, $\frac{B_1}{B} = 0{,}174$

L'angle correspondant à l'arc cd ayant cette valeur, serait :

$$\frac{180}{\pi} \times 0{,}174 = \frac{180 \times 0{,}174}{3{,}14} = 9{,}97$$

c'est-à-dire à très peu près 10°, ce qui serait la valeur exacte.

La construction précédente suppose que nous connaissons les intensités de champ B et B_1.

On connaît effectivement l'intensité moyenne du champ inducteur, étant donné le flux N nécessaire pour développer la force électro-motrice d'induction voulue, ou plutôt on se donne généralement la valeur de B, par la considération de la saturation du noyau induit. On a dans tous les cas :

$$B = \frac{N}{\text{surface de l'entrefer}}$$

En ce qui concerne l'induction B_1 du champ d'induit, nous connaissons la force magnéto-motrice maximum, mais il est difficile de déterminer la valeur du flux et sa répartition dans l'entrefer, par suite de la grande variété des circuits parcourus par les diverses lignes de force.

En effet, ainsi que l'indique le tracé ci-contre, ces lignes ne sortent pas par les faces polaires s et n, mais elles se dérivent tout le long de l'anneau, dans l'entrefer, en suivant des trajectoires très différentes les unes des autres.

Toutefois, si l'on se place dans l'hypothèse que le fer de l'induit et des pièces polaires est suffisamment éloigné de la saturation, on peut négliger, d'une manière approximative, la résistance des circuits métalliques, et ne tenir compte que de celle de l'air qui constitue l'entrefer.

D'autre part, les différents filets de flux magnétique sont soumis à des forces magnéto-motrices variant du maximum

déjà calculé pour le circuit extérieur $efgh$, à un minimum peu différent de o, dans le voisinage de l'axe NS. Ainsi, par exemple, le circuit ab est soumis à une différence de potentiel magnétique ou force magnéto-motrice due seulement aux spires comprises dans l'angle aob.

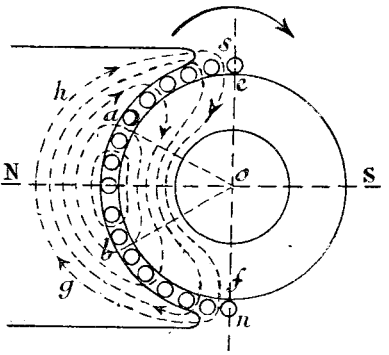


FIG. 111. — Lignes de forces de l'enroulement induit.

Ainsi, la force magnéto-motrice varie et diminue progressivement, depuis le filet extrême jusqu'à celui du centre où elle peut être considérée comme nulle; on admettra donc, à titre d'approximation, que tout se passe comme s'il régnait sur la totalité de l'entrefer une force magnéto-motrice moyenne égale à la moitié de la force magnéto-motrice maximum, soit :

$$F = \frac{1{,}256 \times N \times I}{4} \times \frac{1}{2} = \frac{1{,}256 \times N \times I}{8}$$

Si, d'ailleurs, dans l'hypothèse admise de la non saturation, nous ne tenons compte que de la réluctance de l'entrefer d'épaisseur e, le flux de force traversant deux fois l'entrefer ou $2e$, l'application de la formule du circuit magnétique :

$$F = \frac{l \times N_1}{S} = l \times B_1 \text{ ou } B_1 = \frac{F}{l}$$

donnera dans le cas actuel :

$$B_1 = \frac{1{,}256 \times N \times I}{8 \times 2e} = \frac{1{,}256 \times N \times I}{16 \times e}$$

Soit, par exemple, une machine donnant un débit I de 100 ampères, pour laquelle le nombre N des spires est de 120 et l'entrefer $e = 0{,}7$ centimètres. L'induction due à l'induit dans l'entrefer sera :

$$B_1 = \frac{1{,}256 \times 120 \times 100}{16 \times 0{,}7} = 1345$$

L'intensité du champ inducteur dans l'entrefer est généralement comprise entre 5000 et 6000 CGS ; supposons $B = 5380$, nous aurons :

$$\frac{B_1}{B} = \frac{1345}{5380} = 0{,}25$$

Et l'angle de calage correspondant serait approximativement :

$$\frac{180}{\pi} \times 0{,}25 = 14°20'$$

valeur approchée par défaut, puisque nous avons pris pour longueur de l'arc le rapport $\frac{B_1}{B}$, qui est inférieur à cet arc en réalité. Le décalage serait effectivement voisin de 15 degrés.

Mais dans les conditions ordinaires de la pratique, le décalage est en dessous de ce chiffre, car l'induit est plutôt voisin de la saturation magnétique, ce qui tend à réduire l'induction B_1 en regard de l'induction B, qui est au contraire élevée en vue d'amener l'armature à cet état de saturation.

Dans ces conditions, la perméabilité du noyau étant faible, les effets de self-induction sont très diminués dans les bobines permutées et les étincelles également atténuées.

Il résulte de ces considérations que le décalage primitivement considéré, relatif à la self-induction des bobines en court circuit, est augmenté de l'angle de déplacement de la ligne neutre résultant du champ propre à l'induit. *En définitive, l'angle total de décalage comprend l'angle d'avancement de la ligne neutre, plus l'angle d'avance sur la nouvelle ligne neutre nécessaire pour l'induction inverse des bobines permutées.*

117. Flux antagonistes et flux transversaux. — Si l'on considère les parties actives de l'enroulement induit, c'est-à-dire les brins de fils parallèles à l'axe et tendus suivant les génératrices de l'armature cylindrique (fig. 112), on remarque que dans tous les fils situés à gauche du diamètre de commutation AB et marqués d'une croix, le courant va d'avant en arrière ; il est dirigé en sens inverse dans tous les fils situés à droite.

La ligne de partage des deux enroulements parcourus par des courants de sens contraire était l'axe X Y, quand on faisait abstraction de la réaction d'induit : chaque couple de fils situés dans un même plan horizontal perpendiculaire à X Y et de part et d'autre de cet axe, pouvait alors être considéré comme formant un circuit électrique ou feuillet magnétique, produisant les *flux transversaux* dont nous nous sommes occupé ci-dessus.

Mais le déplacement de la ligne neutre de X Y en A B a notablement modifié cette situation. Les fils situés dans le double de l'angle de décalage *a o b* ne peuvent plus s'accoupler de la même façon, puisqu'ils appartiennent à une même moitié d'enroulement et sont parcourus par un courant de même sens.

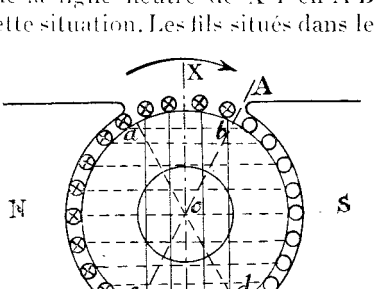


FIG. 112. — Flux antagonistes et transversaux.

Il en est de même des fils contenus dans l'angle inférieur opposé par le sommet *c o d*. Nous voyons d'ailleurs que ces deux catégories de fils forment des feuillets verticaux, les fils supérieurs correspondant aux fils inférieurs, deux à deux.

Ces feuillets détermineront un flux horizontal directement opposé à celui des pôles inducteurs et qui, se retranchant de ce flux, l'affaiblira d'autant ; c'est pourquoi l'on désigne les spires contenues dans le double de l'angle de décalage sous le nom de *spires antagonistes*.

Quant aux fils situés en dehors de cet angle, rien n'est changé à leur situation au point de vue magnétique ; ils continueront à produire les flux transversaux correspondant au décalage, et ces flux seront réduits en proportion des ampère-tours antagonistes enlevés aux ampère-tours transversaux par l'inclinaison du diamètre de commutation.

Valeur du flux antagoniste. — La formule du flux antagoniste est facile à établir ; N désignant comme précédemment le nombre total de brins qui couvrent l'armature et $\frac{I}{2}$ la moitié du courant total de l'induit, le nombre de spires contenu dans l'angle double de décalage 2 K sera :

$$\frac{N}{2\pi} \times 2K = \frac{N \times K}{\pi}$$

La force magnéto-motrice sera donc :

$$F = 0{,}4\pi \times \frac{N \times K}{\pi} \times \frac{I}{2} = \frac{1{,}256 \times N \times K \times I}{2\pi}$$

Et le flux antagoniste, en résultant :

$$N = \frac{F}{R}$$

Ce flux se retranchant du flux inducteur, on devra augmenter en conséquence l'excitation des électro-aimants, si l'on veut obtenir le flux d'induction nécessaire.

La force magnéto-motrice des flux transversaux est proportionnelle au nombre des brins compris dans l'angle *aoc* ; cet angle varie généralement entre 130 et 140 degrés, désignons-le par la lettre *m*. Nous aurons pour le nombre de brins compris dans cet angle :

$$\frac{N}{2\pi} \times m$$

et la force magnéto-motrice correspondante sera :

$$0{,}4\pi \times \frac{N \times m}{2\pi} \times \frac{I}{2} = \frac{1{,}256 \times N \times m \times I}{4\pi}$$

Tel est en réalité le flux qui, traversant les extrémités polaires, se retranche du flux inducteur au droit des balais, tandis qu'il s'ajoute sur les extrémités polaires opposées.

Or, au point de vue de la suppression des étincelles, nous savons que les bobines permutées, qui sont généralement sur le diamètre de contact des balais, doivent se trouver dans un champ inducteur assez intense pour renverser le courant qui les traverse à l'origine de la commutation. Il est donc de toute nécessité que le flux transversal inverse du flux inducteur, dans la région des balais, soit inférieur à celui-ci :

Pour assurer pratiquement un bon fonctionnement de la dynamo dans tous les cas, on a reconnu que le flux transver-

sal ne devait pas dépasser la moitié de la valeur du flux principal inducteur.

Il suffit pour cela que les forces magnéto-motrices ou les ampère-tours agissant aux extrémités polaires, du fait de l'inducteur et de l'induit, soient dans le rapport indiqué de $\frac{1}{2}$.

Si nous désignons par B l'induction moyenne dans l'entrefer, due au système inducteur, le nombre d'ampère-tours nécessité par le passage du flux dans cet espace d'air est donné par l'expression :

$$1{,}256 \times \text{ampère-tours} = 2\,l \times B$$

en désignant par $2\,l$ la longueur doublée de l'entrefer traversé deux fois par le flux inducteur, d'où l'on a ;

$$\text{Nombre d'ampères-tours} = \frac{2\,l \times B}{1{,}256} = 0{,}8 \times B \times 2\,l$$

Nous écrirons donc, comme condition nécessaire au fonctionnement de la commutation entre les ampère-tours transversaux d'induit et les ampère-tours d'inducteur :

$$\frac{N \times m \times I}{4\,\pi} \text{ inférieur ou au plus égal à } \frac{0{,}8 \times B \times 2\,l}{2}$$

On en déduit le nombre de spires que peut rationnellement porter l'induit, pour que le champ transversal inverse produit dans la région polaire de commutation, ne réduise pas le champ inducteur au point de lui laisser une intensité trop faible pour renverser le courant dans les sections permutées.

Nous tirerons en effet de l'expression précédente, par les opérations ordinaires de l'arithmétique, en multipliant par $\frac{2\,\pi}{m}$ les deux membres :

$$N \times \frac{I}{2} = \frac{0{,}8 \times B \times 2\,l}{2} \times \frac{2\,\pi}{m} = \frac{2{,}51 \times B \times 2\,l}{m}$$

Si l'angle m était exprimé en degrés, il faudrait remplacer $2\,\pi$ par 360 degrés et l'on aurait :

$$N \times \frac{I}{2} = \frac{0{,}8 \times B \times 2\,l \times 360}{2\,m} = \frac{144 \times B \times 2\,l}{m}$$

On remarquera que le diamètre de contact des balais étant généralement près d'être tangent aux becs polaires, ne diffère pas sensiblement de l'angle embrassé par les pôles et peut être pris approximativement pour cet angle.

Le produit $N \times \frac{I}{2}$ comprend le courant $\frac{I}{2}$ qui passe dans chaque fil induit : on voit donc que l'expression précédente a pour effet de limiter l'intensité du courant d'un induit de construction donné et que, par suite, cette condition relative à la suppression des étincelles restreint la puissance de la machine, de même que l'échauffement des enroulements induits par l'effet Joule.

Ces deux causes devront entrer également en considération dans l'étude de la construction des dynamos.

118. Expression de la force électro-motrice. — La force électromotrice induite dans les spires d'une dynamo-génératrice, est régie par les lois de l'induction, c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle, pour chaque spire, au nombre de lignes de force coupées par seconde, et par suite, à l'intensité du champ magnétisant et à la vitesse avec laquelle les lignes de force sont coupées par les fils induits de l'armature.

Si nous désignons par N le flux qui émane d'un pôle nord, nous remarquerons que dans tous les cas, que l'inducteur soit bipolaire ou multipolaire, les fils induits coupent ce flux deux fois par tour, soit à l'émergence du pôle nord, soit à son entrée dans le pôle sud.

Pour une machine bipolaire, chaque spire coupera donc $2N$ lignes de forces par tour ; pour une machine quadripolaire, $4N$ lignes de force et pour un nombre quelconque p de pôles, $p \times N$.

Si le nombre de tours par seconde est N, la force électromotrice induite dans chaque spire sera donc :

$$e = p \times N \times N$$

Ou en volts :

$$e = \frac{p \times N \times N}{10^8}$$

Pour une machine bipolaire en particulier, on aura :

$$e = \frac{2N \times N}{10^8}$$

Dans ce cas, nous avons vu que les spires sont divisées par le diamètre de commutation en deux groupes en quan-

tité, comprenant chacun la moitié des spires reliées en série. Les forces électro-motrices individuelles des diverses spires s'ajoutent dans chaque série. Désignons par n le nombre total des spires; sur ce nombre, $\frac{n}{2}$ concourent à établir la force électro-motrice de la machine, et l'on aura pour cette force électro-motrice totale :

$$E = \frac{2N \times N}{10^8} \times \frac{n}{2} = \frac{n \times N \times N}{10^8}$$

Nous verrons dans la suite qu'une machine multipolaire peut être assimilée, suivant les cas, soit à plusieurs machines bipolaires dont les induits couplés en quantité présenteraient autant de circuits en parallèles que de pôles, soit à une seule machine bipolaire dont le flux inducteur serait multiplié par le nombre des pôles nord ou le nombre égal des couples de pôles nord et sud.

Dans le premier cas, le nombre des spires en série est divisé par le nombre total p des pôles inducteurs, de même qu'il était divisé par 2 pour la machine bipolaire, et la force électro-motrice totale sera :

$$E = \frac{n}{p} \times e = \frac{n}{p} \times \frac{p \times N \times N}{10^8} = \left(\frac{n \times N \times N}{10^8} \right)$$

Nous retrouvons la même expression que pour la machine bipolaire, et la force électro-motrice aura la même valeur dans les deux cas, si le flux N, émané de chaque pôle de la machine multipolaire, est égal à celui du pôle nord unique de la bipolaire, si en même temps le nombre total des spires de l'armature et la vitesse de rotation sont les mêmes pour les deux machines.

Dans le second système de machines multipolaires, où l'enroulement induit est réparti sur deux circuits comprenant chacun la moitié des spires en série, comme dans la dynamo bipolaire, on aura pour expression de la force électro-motrice totale :

$$T = \frac{n}{2} \times e = \frac{n}{2} \times \frac{p \times N \times N}{10^8}$$

On peut encore dire que cette machine serait analogue à $\frac{p}{2}$ dynamos en tension, puisque la moitié de l'enroulement composé de spires en série est soumis à l'induction de la moitié des pôles, la force électro-motrice sera donc celle d'une machine bipolaire multipliée par $\frac{p}{2}$, soit :

$$E = \frac{n \times N \times N}{10^8} \times \frac{p}{2}$$

expression identique à la précédente.

119. **Hystérésis et courants de Foucault dans les dynamos.** — La présence des noyaux de fer doux dans l'induit donne lieu à des phénomènes d'hystérésis et à des courants de Foucault.

L'anneau de fer tournant à l'intérieur d'un champ magnétique dont le flux traverse deux fois l'entrefer en sens inverse, c'est-à-dire du pôle à l'armature et ensuite de l'armature au pôle, chacune des molécules de la masse magnétique se trouve, dans l'espace d'un tour, soumise à un cycle complet d'aimantation et de désaimantation, qui donne lieu au travail d'hystérésis tel que nous l'avons étudié précédemment.

C'est pourquoi l'on construit les armatures en fer doux, ce métal présentant, d'une part, une plus grande perméabilité que la fonte et l'acier, et, d'autre part, une force coercitive beaucoup moins grande et qui donne lieu, par conséquent, à une perte minimum d'énergie, par hystérésis magnétique.

Nous avons appris à calculer cette perte d'énergie, qui est proportionnelle à l'induction magnétique maximum, au volume du fer et au nombre de cycles par seconde, par conséquent à la vitesse de rotation de l'induit. Ce travail se transforme en chaleur et tend à élever la température de la pièce de fer et des fils enroulés sur le noyau.

On trouve en pratique que l'énergie dissipée n'est jamais très considérable, même pour des fréquences très élevées : néanmoins, il convient d'en tenir compte, au point de vue du rendement des dynamos et de l'échauffement qui pro-

vient de ce travail d'hystérésis. Cet échauffement est toujours nuisible, car il vient augmenter l'élévation de température due à l'effet Joule dans les fils induits et aux *courants de Foucault* dont il nous reste à parler.

Un noyau massif et suffisamment conducteur, tel que le fer doux constituant l'armature, devient le siège de forces électro-motrices d'induction qui développent des courants intérieurs dits de Foucault dans toute sa masse, ainsi qu'il a été expliqué antérieurement (§ 98).

Cela provient, dans le cas spécial qui nous occupe, de ce que le flux magnétique du système inducteur est fixe dans l'espace, tandis que les différents filets de molécules conductrices, constituant la masse de l'anneau mobile, sont entraînées dans son mouvement de rotation et coupent les lignes de force fixes du champ inducteur.

Il en serait de même évidemment si, l'induit étant fixe, l'inducteur était mobile et le champ tournant faisait couper son flux de force sur les lignes de molécules de l'armature.

Le sens d'impulsion de la force électro-motrice est perpendiculaire à la direction du flux et à celle du mouvement ; ces directions sont perpendiculaires à l'axe de rotation ; la force électro-motrice est donc parallèle à cet axe et détermine la production de courants sur toute la longueur de l'anneau.

On remédie à cette dépense inutile d'énergie en constituant le noyau non plus par un bloc massif, mais par *un corps feuilleté ou divisé*. Il faut évidemment que les surfaces de séparation soient convenablement isolées et surtout qu'elle soient dirigées de façon à couper normalement le circuit des courants parasites.

A cet effet les armatures sont constituées, soit par des disques de tôle mince, recouverts d'une couche légère d'un vernis isolant, ou par des faisceaux de fils de fer également isolés. Les plans des disques ou des spires de fils doivent être perpendiculaires à l'axe ou aux conducteurs actifs de l'induit, puisque les courants de Foucault ont nécesairement la même direction que celle de l'enroulement de cuivre.

Les armatures feuilletées en disques minces sont préférables aux anneaux de fils de fer: ceux-ci, à volume apparent égal, comportent un volume réel de fer moindre que dans le cas des disques, par suite des interstices qui séparent les spires: en outre, le circuit magnétique à travers ces spires est discontinu et présente une perméabilité plus faible que dans les disques dont les plans sont parallèles au flux inducteur.

Il faudra, dans tous les cas, pour le calcul de la reluctance des induits, déduire du volume apparent le volume occupé par les interstices et les corps isolants.

Par ces procédés de division du corps de l'armature, on arrive, sinon à supprimer totalement ces courants parasites, du moins à les atténuer considérablement.

Les courants de Foucault ne se développent pas seulement dans la masse de l'armature, ils apparaissent également dans les conducteurs en cuivre de l'induit. Ces conducteurs, notamment lorsqu'ils doivent débiter des courants de grande intensité et présentent par suite une large section, peuvent être considérés comme des faisceaux de fils minces, plus ou moins volumineux, qui occupent simultanément des régions du champ d'intensités différentes.

Ces divers filets coupant au même instant un nombre variable de lignes de force, sont le siège de force électromotrice inégales qui déterminent des courants fermés dans la masse du conducteur, ainsi que nous l'avons exposé précédemment avec tous les détails voulus.

Ces courants intérieurs se dissipent complètement en chaleur, sans effet utile, et viennent réduire encore le rendement de la machine. Pour y remédier, on emploie des câbles divisés, c'est-à-dire que le conducteur plein est remplacé par un faisceau de fils isolés et tordus de manière à mettre les différents éléments dans des situations semblables au point de vue magnétique et à développer une force électro-motrice moyenne égale dans tous les fils d'un même faisceau: en outre, la résistance des interstices existant entre les différents fils vient encore diminuer l'inten-

sité des courants parasites qui tendraient à se produire dans la masse du conducteur.

120. **Classification générale des dynamos.** — D'après ce que nous avons vu plus haut, les courants induits naissent toujours à l'état de courants alternatifs dans les spires de la dynamo, ils peuvent être recueillis tels quels dans le circuit extérieur d'utilisation, ou au contraire être redressés et régularisés de manière à fournir des courants continus dans le circuit extérieur.

De là, deux grandes classes de machines :

1° Les *dynamos à courant redressé* ou *continu*.

2° Les *dynamos à courant alternatif* ou *alternateurs*.

Dans la première catégorie, il y a encore à considérer les *dynamos à induits fermés* et celles à *induits ouverts*.

Dans la seconde, on distinguera également les *alternateurs ordinaires* à courant alternatif simple et les *alternateurs polyphasés*, à courants alternatifs multiples.

Nous étudierons successivement ces diverses classes de dynamos.

CHAPITRE VI

LES DYNAMOS A COURANT CONTINU

121. **Collecteurs.** — Les dynamos à courant continu sont caractérisées par la présence d'un collecteur commutateur à lames isolées, auxquelles sont reliées les extrémités communes des bobines formant les diverses sections de l'induit.

La construction de ces commutateurs est très variée. D'une manière générale, les lames qui les composent sont en bronze, à section trapézoïdale et disposées en avant de l'induit, de manière à constituer un cylindre concentrique à l'axe, dont les divers éléments sont appareillés à la façon des voussoirs d'une voûte cylindrique.

Ces lames sont séparées l'une de l'autre par des bandes de papier, de mica, d'amiante ou simplement par des lames d'air.

Dans le modèle choisi comme exemple (fig. 113), les lames se terminent par des plans inclinés qui forment par leur ensemble une surface conique en avant et en arrière du collecteur. Elles sont supportées par un manchon en bronze *a b* calé sur l'arbre à l'aide d'une clavette *c*; l'extrémité avant *a* de ce manchon est filetée, tandis que l'extrémité arrière *b* porte une embase dont la face antérieure est tournée suivant une surface conique.

Les lames sont engagées dans l'intérieur de cet évidement et sont maintenues d'autre part au moyen d'une bague *d* présentant également une surface conique inté-

rieure. Les choses étant ainsi disposées, on opère un coinçage énergique, à l'aide de l'écrou *e* qui se visse sur le manchon.

Dans le système indiqué, les touches du commutateur portent une aile *m*, se relevant d'équerre sur la lame et venue de fonte avec elle; ces appendices présentent à la partie supérieure une rainure dans laquelle sont soudés les fils entrant et sortant des couples de bobines voisines.

Dans d'autres cas, les lames ne présentent pas de retour d'équerre et l'appendice est remplacé par une petite lame de cuivre, soudée dans un trait de scie pratiqué à l'extrémité postérieure de chaque segment.

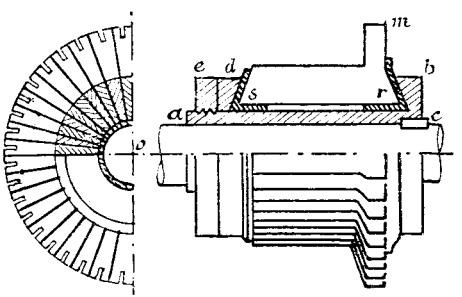


FIG. 113.— Collecteur-commutateur. Coupe A B.

Bien entendu, les lames doivent non seulement être isolées entre elles, mais encore par rapport au manchon, et aux autres pièces métalliques; c'est pourquoi elles en sont séparées par des bagues cylindriques et coniques, *r* et *s*, en ébonite, fibre ou toute autre matière isolante, dure et résistante.

122. **Balais et porte-balais.** — Les balais servent à recueillir le courant de la dynamo, en reliant l'induit au circuit extérieur par l'intermédiaire du collecteur. Ils sont donc reliés directement aux bornes de la machine où aboutissent également les extrémités du *circuit d'utilisation*.

Ces balais peuvent être de différentes sortes; ils étaient primitivement constitués par des paquets de fil de cuivre de 4 à 5 millimètres ou par des lames de cuivre fendues superposées. On emploie plus généralement aujourd'hui

des balais en toile métallique de cuivre, à tissu très fin, repliée plusieurs fois sur elle-même. Ce système donne un frottement très doux et très uniforme et n'a pas l'inconvénient de rayer et d'user rapidement le collecteur comme les modèles antérieurs.

On préconise aujourd'hui des balais en lames minces de laiton, d'un alliage particulier qui présente le frottement gras des métaux dits antifriction. Ces bandes de quelques centièmes de millimètre d'épaisseur forment un faisceau très flexible et très élastique qui donne un excellent contact sur le collecteur.

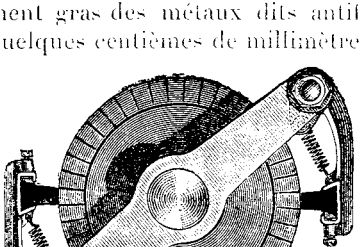


Fig. 114. — Balais en charbon.

Enfin, on emploie également, surtout pour les moteurs et les dynamos génératrices à débit très variable, des balais en charbon (fig. 114). La résistance supplémentaire de ces balais de charbon est insignifiante vis-à-vis de la résistance totale du circuit; d'autre part, elle est utilisée pour réduire le courant des bobines en court circuit, ce courant ne pouvant se fermer d'une lame à l'autre que par l'intermédiaire du balai de charbon.

Ces balais doivent être constitués par du charbon dur à grain fin, de manière à ne pas rayer le collecteur; dans ces conditions, l'usure se porte moins sur le collecteur que sur les balais, qui sont brûlés de préférence par les étincelles.

Les balais sont fixés sur des supports mobiles qui sont les *porte-balais*. Ceux-ci consistent généralement en un collier monté sur le palier voisin du collecteur et pouvant osciller autour de l'axe de la dynamo. Ce collier (fig. 115) est muni de deux bras portant chacun deux axes A et *a*. Sur les axes A sont pivotés les gaines dans

lesquelles sont maintenus les balais, à l'aide de vis de pression *c*.

Les balais, ordinairement taillés en biseau, doivent toucher le collecteur par toute leur surface oblique : la pression convenable du contact est réglée à l'aide des vis *a* commandant les ressorts *r* ; une trop grande pression absorbe inutilement du travail et tend à user davantage les balais et le collecteur, une pression insuffisante donne des contacts défectueux produisant des étincelles.

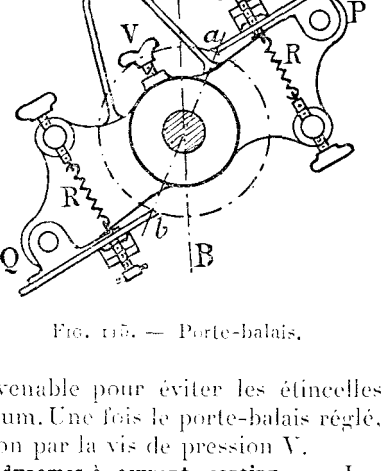


FIG. 115. — Porte-balais.

La manette M qui commande l'ensemble du porte-balais permet de donner aux balais le calage convenable pour éviter les étincelles ou les réduire au minimum. Une fois le porte-balais réglé, on le fixe dans la position par la vis de pression V.

123. **Classification des dynamos à courant continu.** — Les dynamos à courant continu peuvent être classées à trois points de vue différents, suivant que l'on considère *l'induit*, *l'inducteur*, ou le *mode d'excitation de l'inducteur*.

1° La forme de l'armature, et surtout le mode d'enroulement des fils induits, détermine les classes des dynamos *à anneau*, *à tambour* et *à disque*.

2° Pour l'inducteur, c'est le nombre des pôles qui qualifie les classes, et l'on a les *dynamos bipolaires* et *multipolaires*.

3° En ce qui concerne le mode d'excitation, les dynamos sont à *excitation indépendante*, *en série*, *en dérivation*, *compound* et *hypercompound*.

124. **Inducteurs.** — Les formes des inducteurs ou électro-

aimants varient suivant le type des machines. C'est, en effet, l'inducteur qui constitue la carcasse de la dynamo et qui lui donne son aspect caractéristique.

On distingue généralement trois parties dans l'inducteur : les *noyaux d'électros* sur lesquels s'enroulent les spires du circuit excitateur, la *culasse* qui réunit les noyaux, et les *pôles* ou *épanouissements polaires*.

Quand les pièces polaires sont seulement au nombre de deux, on dit que la dynamo est *bipolaire;* quand elles dépassent ce nombre, la dynamo est *multipolaire* et l'inducteur présente toujours un nombre pair de pôles alternativement de noms contraires.

Les inducteurs bipolaires se subdivisent en deux classes :

1° *Inducteurs à circuit magnétique unique;*

2° *Inducteurs à double circuit magnétique.*

Inducteur Edison. — L'un des premiers types industriels créés est l'inducteur Edison-Hopkinson. La forme générale est celle d'un électro en fer à cheval ou plutôt en U, dont les pièces polaires sont à la partie inférieure de la machine (fig. 116).

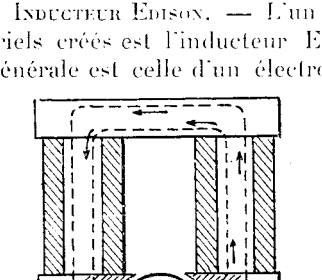


Fig. 116. — Inducteur Edison.

Cette disposition présente l'avantage d'avoir l'organe mobile à la partie inférieure, ce qui évite les trépidations des paliers élevés et donne une grande stabilité à la machine.

D'autre part, le circuit magnétique est sollicité à se fermer à travers le socle en fonte voisin des pièces polaires, et il est indispensable d'interposer une plaque de zinc ou tout autre métal non magnétique, afin de s'opposer à la dérivation du flux en dehors de l'armature.

Inducteur Gramme. — Pour remédier à ces inconvénients, Gramme a adopté la disposition inverse et créé le

type de dynamo dit *supérieur*, parce que l'induit est au sommet et la culasse à la partie inférieure (fig. 117). Cette pièce sert alors de bâti, ce qui simplifie la construction; en outre, les noyaux et les pièces polaires sont creux, de manière à réduire, autant que possible, le poids de la machine.

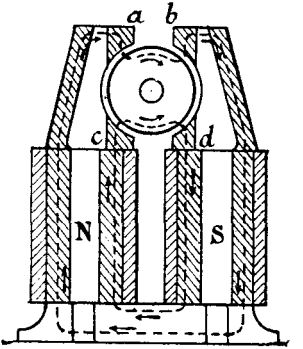


Fig. 117.— Inducteur Gramme.

Contrairement à ce qui se passe dans l'inducteur Edison, l'armature A est sollicitée de haut en bas par l'attraction magnétique des lignes de force, en vertu de la loi d'après laquelle celles-ci tendent à se raccourcir et à se condenser vers les becs polaires inférieurs *c* et *d*. La charge de l'arbre qui supporte le poids de l'induit se trouve donc augmentée de toute l'attraction, qui, dans des machines puissantes, peut atteindre plusieurs centaines de kilogrammes.

Pour égaliser les flux des deux moitiés supérieure et inférieure, et compenser l'attraction dont il s'agit, on prolonge les becs supérieurs de manière à augmenter la perméabilité de la moitié supérieure de l'anneau et le flux qui la traverse.

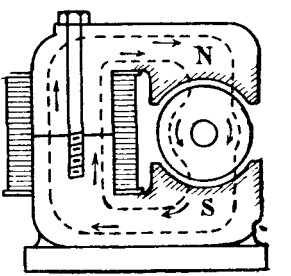


Fig. 118. — Inducteur sans culasse.

Inducteur sans culasse. — La forme la plus simple et la plus compacte que l'on puisse imaginer est celle du type ci-contre, dans lequel la culasse et le noyau ne forment plus qu'un seul élément (fig. 118).

Le circuit inducteur étant généralement enroulé sur une bobine en bois, zinc ou

laiton, qui est enfilée de toute pièce sur le noyau, la carcasse est faite en deux pièces réunies par un fort boulon vertical.

Ce système réalise, comme on le voit, le circuit magnétique de longueur minimum et la construction de l'inducteur est des plus simplifiées.

On peut encore construire la carcasse de trois pièces, en substituant au corps de l'inducteur un noyau droit en fer reliant les deux pièces polaires en fonte, ce qui réduit la reluctance du circuit et les ampère-tours d'excitation.

Inducteur Manchester. — Le défaut de symétrie du champ inducteur dans chaque moitié de l'induit, que nous avons signalé plus haut, disparaît dans les inducteurs bipolaires à circuits multiples.

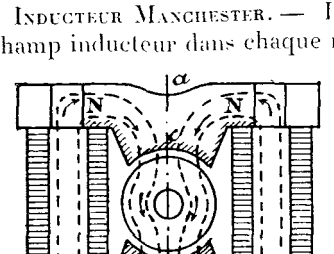


Fig. 119. — Inducteur Manchester.

Le type de ce genre d'inducteur est la machine Manchester (fig. 119). Deux noyaux verticaux d'électro sont reliés par deux pièces polaires très étendues, dont la supérieure sert de culasse et l'inférieure de socle. Les bobines excitatrices sont enroulées de manière à créer deux pôles adossés ou *conséquents* de même nom, dans la pièce polaire supérieure, et deux autres pôles conséquents, de nom contraire aux précédents, à la partie inférieure.

On développe ainsi deux circuits magnétiques distincts dans chacune des moitiés de l'anneau, et l'on obtient un champ parfaitement symétrique, de part et d'autre de l'armature.

Comme le flux inducteur ne se propage pas horizontalement à travers la section $a\,c$, il n'y a aucun inconvénient à pratiquer un étranglement pour réduire cette section, de même que la section $b\,d$, ce qui, d'autre part, a l'avan-

tage de s'opposer au passage des flux transversaux parasites.

Bien que dans ce système d'inducteurs le circuit magnétique soit doublé, le poids du fer est plutot inférieur à celui d'un inducteur à simple fer à cheval, car la section des branches dans le premier cas n'est pas sensiblement supérieure à la moitié de celles de l'inducteur simple. Mais en revanche le poids du cuivre de l'enroulement excitateur est plus grand dans le système à double circuit, car chacun des circuits exige pour un même flux, une excitation égale à celle du simple fer à cheval.

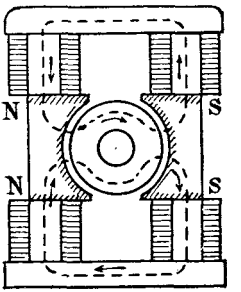


Fig. 120. — Inducteur Breguet.

Inducteur Breguet. — Une autre disposition de dynamo à pôles conséquents, est celle du type Breguet. Elle diffère de la précédente en ce que les culasses, dont l'une sert de socle, sont séparées des pièces polaires par les noyaux d'électro et que ceux-ci sont au nombre de quatre.

Ici les électros sont verticaux ; dans d'autres machines ils sont horizontaux et le tout est alors supporté par un socle supplémentaire.

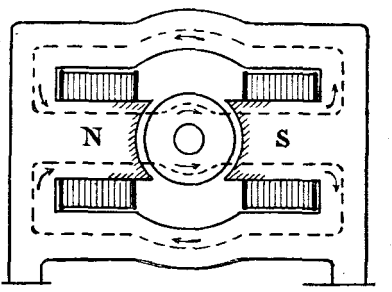


Fig. 121. — Inducteur Lahmeyer.

Inducteur Lahmeyer. — Pour réduire les dérivations de flux magnétiques, à travers l'air, d'une pièce polaire à l'autre, on a imaginé le type ci-joint du modèle Lahmeyer, connu sous le nom d'inducteur cuirassé ou blindé (fig. 121).

En effet, dans ce système, les noyaux jouent eux-mêmes le rôle de pièces polaires et sont complètement enveloppés et protégés par les culasses. Ici l'inducteur ne forme pas à proprement parler de pôles conséquents; c'est le circuit de chaque bobine qui se divise en deux pour passer dans chacune des moitiés de l'induit.

Le même inducteur peut être disposé verticalement, contrairement au modèle ci-contre dont l'axe des bobines est *horizontal*.

Inducteurs doubles symétriques. — Les induits à anneau plat comportent un système inducteur à double fer à cheval dont les pôles opposés sont de même nom (fig. 122). Dans certains modèles les pôles semblables

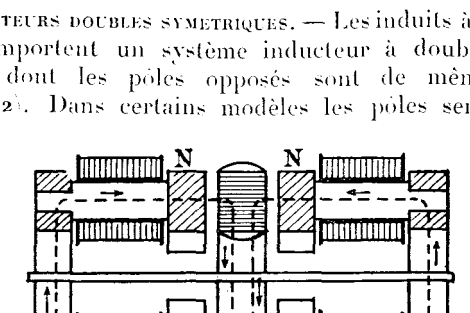


Fig. 122. — Inducteur double symétrique.

sont reliés entre eux par des pièces polaires embrassant une portion de l'anneau et ne constituent ainsi qu'une pièce polaire unique à pôles conséquents. Les deux circuits se bifurquent dans chacune des moitiés de l'épaisseur de l'induit.

Inducteurs multipolaires. — Les machines bipolaires ne se prêtent pas à l'obtention des grandes puissances; les champs parasites de l'induit prennent, en effet, une importance relativement considérable et produisent des déformations beaucoup plus importantes dans un champ unique que dans l'ensemble de champs multiples; le flux dans ceux-ci est réparti d'une façon plus symétrique, et les

perturbations sur les champs partiels sont notablement atténuées.

Dans le cas des dynamos à courants alternatifs, l'emploi des inducteurs multipolaires a encore l'avantage, en augmentant la fréquence par tour, de réduire la vitesse angulaire, car il est nécessaire, pour que les effets des courants alternatifs soient soutenus, comme dans l'application à l'éclairage, par exemple, que la fréquence atteigne, au moins, cinquante périodes par seconde.

Les inducteurs multipolaires présentent des formes également très variées : ils sont à pôles radiaux dans le cas d'induits à anneau ou à tambour, et à double série de pôles embrassant les deux faces de l'induit, s'il s'agit d'un induit plat ou à disque ; enfin l'inducteur peut être extérieur ou intérieur à l'armature.

Inducteur gramme multipolaire. — Au premier type appartient la machine gramme multipolaire. C'est, dans son ensemble, une carcasse octogonale ou circulaire, à l'intérieur de laquelle sont disposés des noyaux rayonnants, qui tantôt sont venus de fonte avec la culasse, tantôt sont constitués par des noyaux de fer boulonnés sur la face intérieure du cadre de fonte.

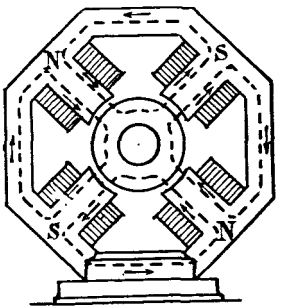


Fig. 123. — Inducteur Gramme multipolaire.

Ici, chaque noyau est commun à deux circuits magnétiques et joue lui-même le rôle de pièce polaire. Cette disposition a pour résultat de réduire le développement du circuit magnétique et, par conséquent, la dépense d'excitation, tout en diminuant les dérivations de flux entre les pièces polaires.

Inducteur Thury. — Dans l'inducteur du système Thury (fig. 124), il y a six pôles conséquents. Les noyaux, sous forme de plaques de fer, sont disposés suivant les

côtés d'un hexagone régulier. Chacun des angles de cette carcasse est occupé par une pièce polaire en forme de

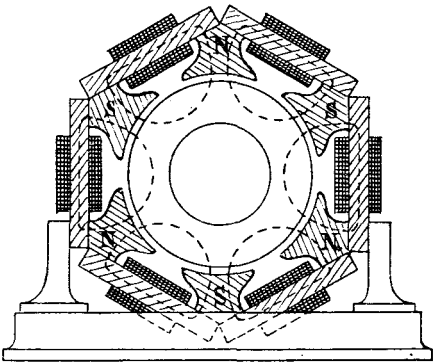


Fig. 124. — Inducteur Thury.

coin qui est boulonnée sur les extrémités en contact de deux électros voisins.

Contrairement à la disposition précédente, chacun des circuits est excité par une bobine unique, et les pièces polaires présentent des pôles conséquents.

Inducteurs en couronne. — Dans le cas des induits à

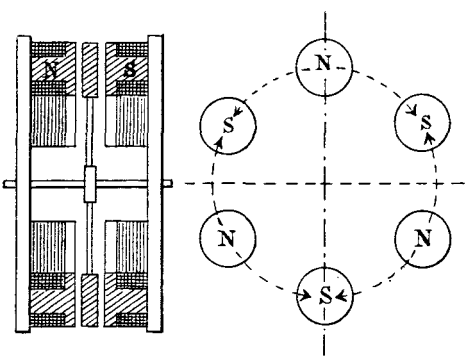


Fig 125. — Inducteur en couronne.

anneau plat ou à disque, l'inducteur est formé de deux

couronnes d'électro-aimants droits, montés sur deux flasques parallèles, entre lesquelles tourne l'induit (fig. 125).

Les pôles sont alternativement de nom contraire sur chaque couronne et les couples de pôle apposés sont constitués également par un pôle nord et un pôle sud.

Inducteur intérieur. — Pour les machines puissantes on a avantage à rendre l'inducteur mobile et à le placer à l'intérieur de l'induit. Le volume et le poids de l'inducteur se trouvent ainsi notablement réduits.

Dans ce cas, l'inducteur est généralement formé par un moyeu prismatique à quatre, six, huit pans et plus, sur lesquels sont plantés les noyaux venus de fonte, à section rectangulaire. Ces noyaux recouverts de bobines excitatrices se terminentpar des épanouissements polaires alésés à un diamètre très voisin de celui de l'anneau induit (fig. 126).

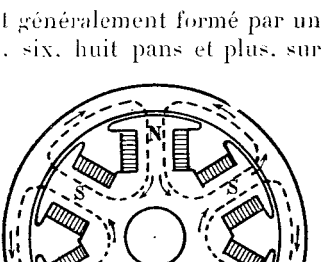


Fig. 126. — Inducteur intérieur.

Les circuits magnétiques sont très courts et très perméables, par suite notamment de la grande surface des pièces polaires; le flux est pour ainsi dire emprisonné à l'intérieur du système, et les dérivations magnétiques sont réduites au minimum.

Outre ces types généraux d'inducteurs, il en est de forme toute spéciale qui peuvent toutefois rentrer dans l'une des classes spécifiées ci-dessus.

Inducteur Thomson-Houston. — L'inducteur de la dynamo Thomson-Houston mérite une mention particulière. La forme générale de sa carcasse est la conséquence de la construction originale de l'induit, qui affecte la forme d'une sphère fig. 127).

La carcasse en fonte est composée de deux parties

symétriques, constituées chacune par un cylindre creux présentant une base concave hémisphérique du côté de l'induit et muni d'une bride sur la base extérieure.

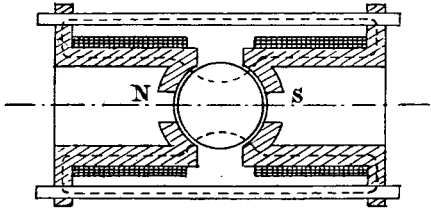


Fig. 127. — Inducteur Thomson-Houston.

Les deux parties sont reliées par des tiges de fer boulonnées sur les brides et jouant le rôle de culasse.

Construction des inducteurs. — En résumé, les inducteurs bipolaires conviennent aux machines de faible puissance ou de puissance moyenne ; les inducteurs multipolaires sont indispensables aux grandes puissances, par suite de l'importance que prend la réaction d'induit dès que le diamètre de cet organe dépasse une certaine limite.

A puissance égale, ces dynamos à inducteurs multipolaires sont plus légères et exigent moins de cuivre dans l'enroulement excitateur ; car on peut réduire l'entrefer, qui doit être augmenté dans les bipolaires pour opposer une reluctance plus grande aux flux transversaux, et les circuits magnétiques sont plus ramassés et plus perméables.

D'autre part, les pertes par hystérésis et courants de Foucault sont plus grandes et la construction est plus compliquée.

Comme métal, on emploie le plus généralement le fer doux dans la construction des inducteurs. Les carcasses des petites dynamos sont souvent fondues d'une seule pièce de fonte. On emploie aussi concurremment le fer et la fonte, le premier métal constituant les noyaux et l'autre les pôles et la culasse. On utilise également aujourd'hui l'acier doux moulé.

Dans certaines dynamos dont les pièces polaires sont le siège de flux magnétiques variables, susceptibles de déterminer dans leur masse des courants de Foucault, les

conducteurs sont feuilletés, c'est-à-dire composés de plaques minces en tôle de fer.

Les pièces polaires doivent embrasser la plus grande partie de l'induit, tout en laissant cependant entre elles un intervalle suffisant pour éviter les dérivations notables de flux d'un pôle à l'autre. L'arc polaire, dans les inducteurs à deux pôles, varie entre 120 et 140 degrés. Dans les machines multipolaires, la zone enveloppée par les pièces polaires est beaucoup moins importante.

Comme les lignes de force ont une tendance à se porter vers les arêtes des pièces polaires, on donne à celles-ci une section décroissante, pour répartir plus uniformément le flux qui passe des pôles à l'armature à travers l'entrefer.

D'une manière générale, on développe les surfaces polaires de telle sorte que la valeur moyenne du champ dans l'entrefer soit de 5000 C. G. S. pour les dynamos bipolaires et de 6 à 7000 pour les multipolaires.

On donne généralement aux noyaux d'inducteur une section circulaire, le cercle étant la figure qui, à égalité de surface, a le moindre périmètre. Les spires présenteront alors le plus petit développement possible et la moindre résistance également.

Toutefois, quand les noyaux jouent eux-mêmes le rôle de pièces polaires, il peut être plus avantageux de leur donner une section rectangulaire ; la section carrée a le moindre périmètre, et les autres formes rectangulaires sont d'autant moins économiques que le rapport entre les deux dimensions de la section est plus considérable.

La longueur des inducteurs dépend directement de la hauteur des noyaux. Celle-ci doit être suffisante pour recevoir les bobines d'excitation nécessaires. Cette longueur est également déterminée par la condition de correspondre à une surface extérieure des électros capable de laisser dissiper la chaleur développée par les watts de l'énergie électrique absorbée dans les spires conductrices.

Les autres pièces du circuit magnétique devront être aussi courtes que possible afin de réduire d'autant la lon-

gueur totale du circuit magnétique, et, par suite, la reluctance et la dépense de cuivre et d'excitation.

125. Induits. — Dynamos a anneau ou induit Gramme. — Nous avons déjà donné des renseignements sur la construction des armatures en fer divisé (§ 119).

L'armature de l'induit Gramme est constituée par un noyau de fil de fer doux enroulé de manière à constituer un manchon cylindrique.

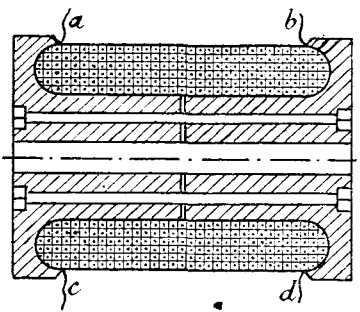


Fig. 128. — Construction d'une armature en fil de fer.

A cet effet, on se sert d'un mandrin en bois composé de deux pièces réunies par des boulons (fig. 128); le fil de fer étant enroulé, on relie les spires par des brins de fil de fer a, b, c, d, disposés préalablement dans la gorge du mandrin; puis l'on démonte celui-ci. C'est sur ce noyau que l'on disposera ensuite les bobines induites, en enroulant les fils suivant les génératrices du noyau cylindrique ainsi formé.

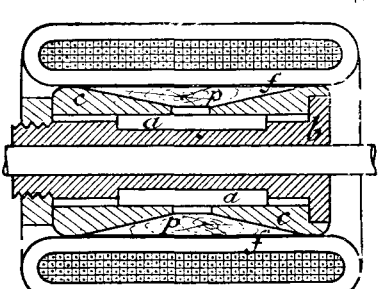


Fig. 129. — Enroulement des bobines.

On a représenté (fig. 129), le mode de fixage sur l'arbre d'un induit en anneau. Un premier cylindre en bronze b est calé sur l'arbre; des coins en bronze c disposés sur le pourtour effectuent le serrage de secteurs en bois p, recouverts d'une enveloppe de feutre f. Sur ce moyeu ainsi constitué est enfilée l'armature recouverte de l'enroulement induit.

Les coins sont serrés entre une collerette dont est munie l'extrémité de droite du manchon *b* et un anneau fileté *k*, remplissant le rôle d'écrou.

Lorsque le noyau, au lieu d'être construit en fils de fer, est constitué par des disques de tôle évidés de 4 à 6 millimètres d'épaisseur, comme il convient, ces disques sont supportés par deux croisillons *a* et *b* calés sur l'arbre. Le croisillon de gauche est buté contre une embase *d* et le

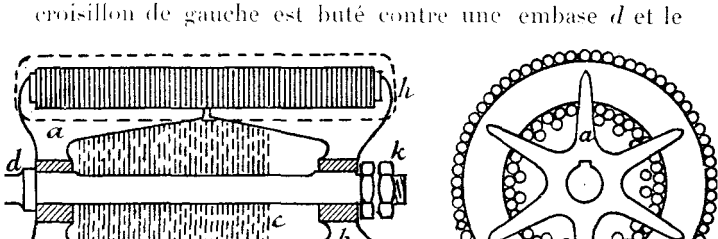


Fig. 130. — Construction d'une armature en disques de tôle.

croisillon de droite effectue le serrage des disques *c*, par le moyen de deux écrous *k* vissés sur la partie filetée de l'arbre. (fig. 130).

Les tôles formant le noyau sont comprises entre deux cercles de tôle plus épaisse, qui sont maintenus d'une manière invariable entre les ergots *h* que présentent les branches des croisillons.

Induits dentés. — Il est difficile, quel que soit le soin que l'on mette à enrouler les fils sur l'armature, d'obtenir un bobinage présentant une surface régulièrement cylindrique. Ce défaut de régularité parfaite oblige à augmenter, dans une certaine mesure, le jeu mécanique entre l'armature et les pièces polaires, afin d'éviter que les fils plus ou moins en saillie sur la surface de l'induit viennent frotter contre les surfaces polaires.

Pour éviter cet inconvénient, on a imaginé les *induits dentés*. Ils sont constitués par des disques de tôle mince

crénelés sur les bords et assemblés de façon à faire correspondre exactement les dents saillantes et à constituer un anneau dont la surface est sillonnée de profondes rainures parallèles à l'axe.

Les fils de l'induit sont alors logés dans ces rainures sans dépasser en aucun point la surface extérieure formée par les dentures; cette surface étant parfaitement tournée peut être alésée à un diamètre très voisin de celui des surfaces polaires, ce qui permet de réduire l'entrefer au minimum.

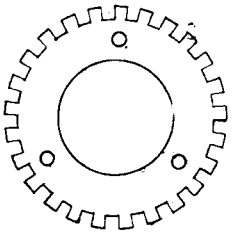


FIG 131.— Noyau denté.

Cette constitution de l'armature présente aussi le grand avantage de maintenir les fils encastrés d'une manière immuable, car les conducteurs sont soumis à l'attraction du champ magnétique qui tend à les arracher, en les faisant glisser sur la surface du noyau.

Dans les induits ordinaires non dentés, on est obligé de prendre des dispositions spéciales pour assurer l'entraînement des spires induites dans le champ magnétique, soit que l'on intercale de distance en distance des disques dentés, soit que l'on plante des coins saillants en bois ou métal sur la surface de l'induit, contre lesquels viennent s'appuyer les conducteurs ainsi encastrés.

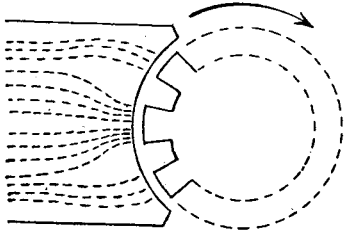


FIG. 132. — Répartition du flux dans l'entrefer.

Les induits dentés ont l'inconvénient de déterminer un milieu magnétique à reluctance variable dans l'entrefer. En effet, si nous considérons le flux qui passe au point *a* (fig. 132), au moment où la dent *b* est en face de ce point, l'entrefer correspondant est très court et

la reluctance offerte au flux est minimum ; mais un instant après le creux *c* s'est substitué à la dent *b*, en face de *a* et l'entrefer est augmenté de toute la hauteur de la dent, portant ainsi la reluctance au maximum.

Le flux passant en chaque point de la surface polaire varie donc constamment pendant la rotation de l'armature. Les différentes régions deviennent ainsi le siège de forces électro-motrices d'induction, et la masse polaire, dans le voisinage de la surface, est parcourue par des courants circulaires de Foucault.

Ces mêmes variations donnent lieu à des aimantations périodiques et, par suite, à des pertes par hystérésis.

Il convient donc de prendre des dispositions pour atténuer, autant que possible, les variations de reluctance qui sont la cause de ces défectuosités. On y parvient en multipliant le nombre des dents de manière à réduire les intervalles en proportion du jeu entre la pièce polaire et les dents ; le rapport ne doit pas dépasser 2,5 pour éviter le développement sensible de courants de Foucault et l'élévation de température qui en résulte.

Quoi qu'il en soit, on remédie d'une façon complète à ces inconvénients en constituant les masses polaires des inducteurs en fers feuilletés comme les induits.

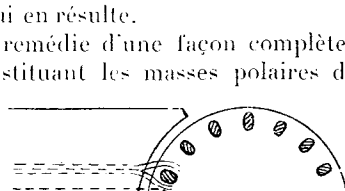


Fig. 133. — Cas de conducteurs noyés à la périphérie de l'armature.

Au lieu de pratiquer des rainures ouvertes, qui déterminent des interruptions dans la marche du flux, on loge, dans certains modèles (fig. 133), les barres de cuivre de l'induit dans des trous percés au voisinage immédiat de la périphérie du noyau ; de cette façon, il n'y a plus de solution de continuité dans le circuit magnétique et le flux est à peu près uniformément réparti dans l'entrefer.

Quel que soit le modèle d'induit adopté, les spires ou

barres induites devront être maintenues solidement à l'aide de frettes, pour combattre l'effet mécanique de la force centrifuge qui tend à arracher les conducteurs du noyau. Ces frettes, toutefois, sont inutiles dans le cas des barres maintenues dans les alvéoles perforées sur le pourtour de l'induit, comme il est appliqué ci-dessus.

Ce frettage se fait comme suit : on enroule sur l'armature un ruban d'étoffe de 2 centimètres de longueur environ que l'on recouvre de spires de fils de maillechort ou de bronze phosphoreux.

Ces bandes sont disposées tout le long de l'induit à des intervalles de 5 à 6 centimètres ; les fils très résistants au

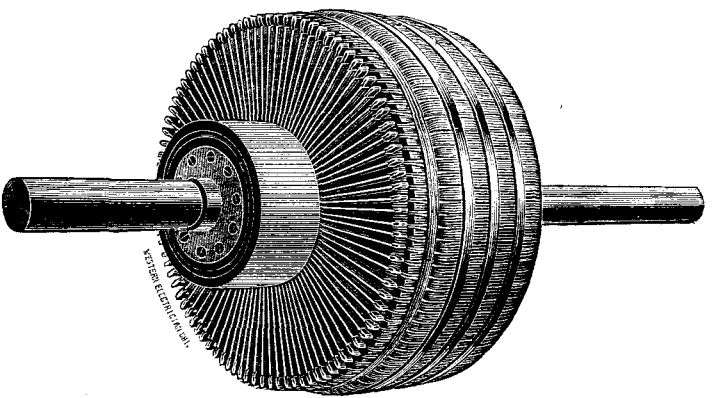


Fig. 134. — Anneau induit à rondelles minces, genre Gramme.

point de vue mécanique sont très fortement serrés sur toute la largeur des bandes et reliés entre eux de distance en distance par des nœuds de soudure fig. 134 .

126. Enroulement induit à anneau de Gramme. — Le type d'induit Gramme se distingue plutôt par le mode d'enroulement des fils que par la forme en anneau de son armature.

Quand la surface du noyau a été tournée exactement suivant un cylindre aussi parfait que possible, on la

recouvre d'un vernis à la gomme-laque et d'un papier isolant retenu par des rubans vernis.

Le bobinage du fil se fait par sections séparées que l'on réunit ensuite les unes aux autres, de manière à former un circuit sans fin qui recouvre toute la surface extérieure et intérieure de l'anneau, sans solution de continuité (fig. 135).

Les spires de chaque bobine sont enroulées, en effet, suivant deux génératrices, l'une intérieure, l'autre extérieure (fig. 136). Les fils d'une même section ou bobine sont disposés suivant une ou deux couches et de manière à permettre le remplacement de chaque section, sans dévider les spires des sections voisines.

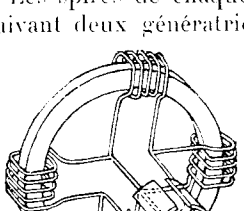


Fig. 135. — Enroulement des fils sur anneau Gramme.

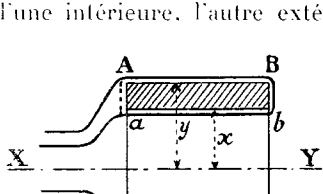


Fig. 136. — Spire de l'enroulement Gramme.

Il convient de remarquer que l'évidement intérieur présentant un diamètre et une circonférence moindres que le noyau extérieur, on est obligé de superposer les spires sur une plus grande épaisseur à l'intérieur de l'anneau.

Le fil a double guipage de coton est légèrement verni à la gomme-laque. Le nombre des sections est aussi grand que possible, car il convient de réduire le nombre des spires de chaque bobine en vue de la mise en court-circuit et des étincelles aux balais qui en résultent. On est limité dans cette voie par la question d'économie de construction et la nécessité d'employer un grand nombre de spires, dans le cas des machines à haute tension.

Les subdivisions de l'induit, correspondant à chaque bobine, sont généralement en nombre pair; de cette

manière les deux balais mettent en court-circuit, chacun l'une des deux touches diamétralement opposées au même instant ; la répartition des flux antagonistes et du champ magnétique résultant est, par suite, plus régulière et plus symétrique.

On remarquera que la spire de l'anneau Gramme, telle que A B *b a* se compose de deux fils A B, *a b* menés parallèlement à l'axe, et deux parties radiales B *b* et A *a*. De ces quatre parties, le fil A B est seul actif et utilisé pour l'obtention de la force électro-motrice d'induction, comme nous l'avons expliqué précédemment (§ 112).

La partie du circuit A *a b* B constitue le conducteur de connexion.

Dans les machines puissantes, du type à tambour notamment, où les fils induits sont remplacés par des barres de cuivre à section rectangulaire, les conducteurs de connexion sont distincts du circuit soumis à l'induction et constitués par des rubans de cuivre, montés séparément sur l'armature.

Les diverses spires étant directement reliées aux spires immédiatement voisines, le potentiel va croissant progressivement d'une spire à l'autre, et il n'existe jamais une grande différence de potentiel entre deux spires juxtaposées ou superposées, en contact. Nous verrons qu'il n'en est pas de même pour l'enroulement en tambour.

Cette circonstance fait que l'enroulement Gramme se prête à l'obtention des hautes tensions, car il n'y a pas à craindre la production de courants entre les spires voisines, à travers l'isolant, et les détériorations qui en résulteraient. Toutefois le même avantage ne subsiste pas dans tous les cas pour les machines multipolaires, qui exigent des connexions superposées de conducteurs à potentiels différents.

Le bobinage est des plus simples à effectuer et présente les plus grandes facilités d'entretien.

Le même mode d'enroulement permet de construire des anneaux à grand diamètre et, par suite, de réduire la

vitesse angulaire, c'est-à-dire le nombre de tours par minute.

L'inconvénient principal du système est que le développement des fils de connexion est très grand par rapport au fil induit réellement utilisé. D'autre part, il est plus difficile d'éviter les étincelles avec l'induit Gramme, par suite de la plus grande self-induction des bobines en court-circuit, ces bobines présentant deux fois plus de spires pour un même enroulement que le tambour, et occupant une zone plus large dans la région neutre qui n'est pas entièrement dépourvue de flux inducteur.

Divers modes d'enroulement. — *Enroulements d'induit bipolaire.* — Nous venons d'exposer le mode d'enroulement, les avantages et les inconvénients de l'induit Gramme ou à anneau. Il ne reste qu'une remarque à faire sur le sens d'enroulement des bobines, car il détermine le sens du courant et la polarité des balais pour un champ magnétique et une rotation de sens donné.

L'enroulement peut, en effet, être *dextrorsum* ou *sinistrorsum*.

Le dextrorsum est celui qui tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, le sinistrorsum en sens inverse.

Pour se rendre compte du sens de l'enroulement, nous considérerons les bouts de l'enroulement par lesquels pénètre le courant, en nous plaçant du côté de l'origine.

Dans le cas représenté (fig. 137) ces bouts sont ceux *a* et *b* qui se relient au balai négatif. Il faudra donc suivre le courant de *a* en *c*, dans le demi-

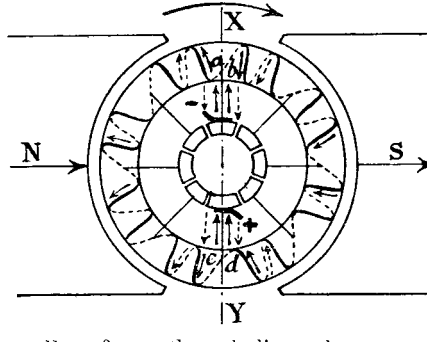


Fig. 137. — Sens de l'enroulement.

enroulement de gauche et de b en d pour la droite, ce qui, dans les deux cas, déterminera un mouvement de rotation dans le sens des aiguilles horaires et, par suite, indiquera un enroulement dextrorsum.

Dans l'enroulement inverse, la partie pleine de la spire serait en arrière de l'anneau et la partie pointillée viendrait en avant. Comme le sens du courant reste nécessairement le même dans la partie antérieure de la spire, il faudrait porter les mêmes flèches sur la partie pointillée ; ce qui imprimerait au courant général une direction de sens contraire, comme le montrent les flèches pointillées.

Les balais changeraient donc de signe, on aurait le positif en haut et le négatif en bas. On voit donc que pour une dynamo donnée, il faut avoir soin, en cas de rechange, de prendre des induits ayant des enroulements de même sens.

Les machines bipolaires présentent un inducteur à deux pôles et un induit dont l'enroulement se compose de deux solénoïdes en dérivation. La force électro-motrice de la dynamo est simplement égale à celle qui se développe dans l'une des moitiés de l'enroulement et le courant extérieur est la somme des courants égaux qui parcourent chaque moitié ou chacun des solénoïdes.

Enroulement d'induit multipolaire en quantité. — Une dynamo multipolaire peut être considérée comme la combinaison de deux ou d'un plus grand nombre de dynamos bipolaires. Son système inducteur comportera donc un certain nombre de couples de pôles, alternativement de noms contraires.

Si l'on désigne par c le nombre des couples, celui des pôles sera toujours égal à $2c$.

Par analogie avec l'induit bipolaire, l'induit multipolaire présentera autant de sections ou bobines en dérivation qu'il y a de pôles, soit encore $2c$, et le nombre total des bobines partielles et des touches du collecteur en sera un multiple quelconque K, ou $K \times 2c$. Soit pour une machine à quatre pôles :

$c = 2$ couples de pôles.

$2c = 4$ couples de pôles.

$K \times 2c = 5 \times 4 = 20$ bobines $= 20$ touches.

De même que dans la bipolaire il y a un diamètre de commutation et deux balais, dans la multipolaire, il y aura c diamètres de commutation et $2c$ balais.

Ainsi la machine tétrapolaire ou à quatre pôles, comportera $c = 2$ diamètres de commutation et $2c = 4$ balais (fig. 138).

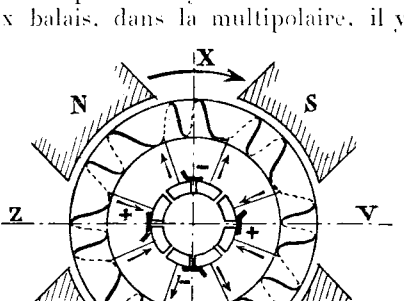


FIG. 138. — Enroulement tétrapolaire à quatre balais.

A la simple inspection de la figure, on voit que les deux balais sur le diamètre V Z sont positifs, les deux balais sur le diamètre X Y négatifs. Chacun des quartiers de l'enroulement induit peut donc être assimilé à une pile, avec ses pôles positif et négatif représentés ici par les balais respectifs.

En réunissant ensemble, d'une part les balais positifs, d'autre part les balais négatifs, on obtient le groupement de quatre bobines en dérivation, comme cela doit être.

L'assimilation à une batterie de piles conduit au schéma ci-contre (fig. 139) qui montre bien la circulation des courants dans toutes les parties du système.

On voit que les deux balais positifs a et b, ne servent qu'à relier en un même point c tous les pôles positifs ; de même les balais négatifs, tous les pôles négatifs en un point d ; les points c et d sont les pôles de l'ensemble.

On voit aussi que le résultat serait exactement le même, si l'on reliait par un fil de connexion direct les deux

touches a et b du collecteur, en ne laissant subsister qu'un seul des deux balais, celui b, par exemple. On pourra de même supprimer l'un des deux autres balais, en reliant les deux touches négatives.

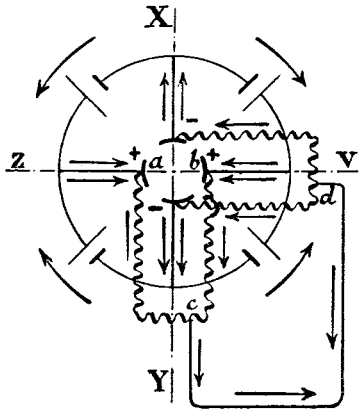


Fig. 139. — Connexion des bobines en quantité.

Cette observation conduit à ne conserver qu'une seule paire de balais calés à 90 degrés l'un de l'autre. Puisque les balais diamétralement opposés n'ont pour objet que de relier les deux touches correspondantes, on établira des connexions permanentes entre ces touches deux à deux. On remarquera, d'ailleurs, que les couples de touches et bobines diamétralement placés sont au même potentiel, étant semblablement situés dans le champ magnétique ; on peut donc les relier ensemble sans rien changer à leur état électrique (fig. 140).

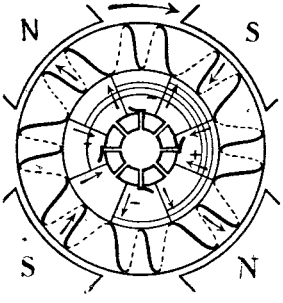


Fig. 140. — Connexion pour réduire à deux le nombre des balais.

On réalise ainsi la disposition ci-contre qui présente l'avantage de réduire les frottements et l'usure du collecteur, par la suppression de deux balais sur quatre.

Dans cette disposition, il faut nécessairement que le nombre des bobines soit pair, puisque les sections sont reliées deux par deux. Les quatre solénoïdes (fig. 140), étant connectés en quantité, il est

indispensable que les forces électro-motrices qui se développent dans chacun d'eux soient égales et, pour cela, qu'ils soient aussi semblables que possible et que les divers champs magnétiques soient de même intensité ; sans cela, il y aurait un échange de courants intérieurs entre les diverses sections et des pertes d'énergie consécutives.

Si, au lieu d'une machine à quatre pôles, il s'agissait de dynamos à 6, 8, 10 pôles, on pourrait toujours réduire le nombre des balais à deux seulement, mais l'angle de calage varierait de manière à ce que les balais se trouvent sur les deux lignes neutres les plus voisines. D'une manière générale, cet angle sera égal à $\frac{360^\circ}{2C}$.

Cette formule donne en effet 90 degrés pour quatre pôles, 60 degrés pour 6 pôles, et ainsi de suite.

Si nous comparons la dynamo à 4 pôles, par exemple, à la dynamo bipolaire, les deux machines présentant le même bobinage d'induit et le même champ magnétique total, la tétrapolaire équivaudra à deux dynamos bipolaires de force électro-motrice moitié moindre et d'intensité de courant double.

En effet, la force électro-motrice de la tétrapolaire est due seulement au quart de l'enroulement, tandis que la moitié dudit concourt à la produire dans la machine bipolaire. D'autre part, la demi-force électro-motrice produit le même courant dans le solénoïde de résistance moitié moindre, et les quatre solénoïdes en quantité donnent quatre courants au lieu de deux produits dans la bipolaire.

Finalement les deux dynamos considérées auront la même puissance.

La dynamo bipolaire donnera une force électro-motrice E et un courant $2i$, donc une puissance $2E \times i$; la tétrapolaire, une force électro-motrice $\frac{E}{2}$ et un courant $4i$, donc une puissance :

$$\frac{E}{2} \times 4i = 2Ei$$

Enroulements en série. — Au lieu de grouper les diverses sections de l'induit en autant de couples qu'il y a d'inducteurs bipolaires, on peut relier les bobines en deux groupes seulement, de manière à réaliser la disposition générale de l'induit bipolaire, d'après laquelle il doit y avoir le même nombre de spires groupées de chaque côté des points de contact des balais, sur le collecteur.

On obtient ainsi l'enroulement dit en série, dans lequel les bobines occupant les mêmes positions par rapport au champ magnétique sont reliées en tension. La dynamo donnera alors la même force électro-motrice E et le même courant $I = 2i$, les bobines étant réunies suivant deux séries associées en quantité.

Dans cet enroulement, les bobines de l'induit sont en nombre $(K \times C \pm 1)$; de plus, le nombre K doit être premier avec le nombre total $(K \times C \pm 1)$. On réunit alors les sections de K en K.

Soit, par exemple, une dynamo tétrapolaire : $c = 2$ et $K = 5$, on prendra un nombre de bobines égal à $(K \times 2 \pm 1) = 11$ ou 9.

Le nombre $K = 5$ est premier avec 11 ou 9, c'est-à-dire n'admet pas d'autre commun diviseur que l'unité.

Dans ce cas, on réunira les sections de 5 en 5 ou les intervalles de 4 en 4, de telle sorte que le circuit ne pourra pas se fermer d'un seul coup, comme il convient, mais se terminera seulement après un certain nombre de tours, et l'on obtiendra géométriquement un polygone étoilé.

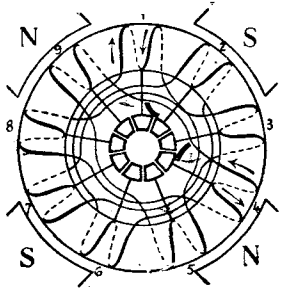


Fig. 141. — Connexion des bobines en série.

Prenons la combinaison des neuf bobines (fig. 141). Partant de la bobine 1 qui est actuellement en relation avec le balais supérieur, on la relie à la bobine 5, l'extrémité libre de celle-ci à la bobine 9 et ainsi de suite de 5 en 5, comme il a été dit.

Arrivé à la bobine 4, qui est en relation avec le balai latéral, on a relié la moitié des bobines, à une près, puisque leur nombre est impair. Continuant les connexions de la seconde moitié, on vient se refermer sur le bout libre de la bobine 1.

La disposition ci-dessus comprend des fils de jonction entre les diverses bobines et des conducteurs de connexion aux lames du collecteur dont le nombre est égal à celui des bobines.

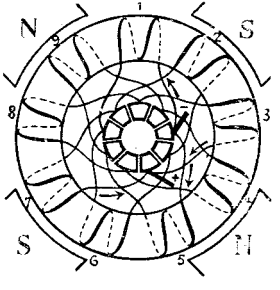


FIG. 142. — Connexion simplifiée.

On peut utiliser les fils de jonction pour les liaisons aux touches du collecteur (fig. 142). Ainsi le fil joignant 1 à 5 viendra se souder au passage à la lame 3 : le fil joignant 5 à 9, à la lame 7 et ainsi de suite.

En suivant l'enroulement à partir du balai négatif, par exemple, on arrive au balai positif après avoir parcouru la moitié des bobines, soit d'un côté, soit de l'autre du balai de départ.

Il n'est pas absolument nécessaire d'observer la formule d'enroulement donnée ci-dessus.

On peut, en effet (fig. 143), adopter un nombre pair de bobines. Cette disposition exige toutefois que le nombre choisi ne soit pas un multiple du nombre des pôles, car autrement le circuit se fermerait avant que toutes les bobines aient été englobées dans l'ensemble, ou se fermerait encore sur deux couples de bobines voisines.

Le principe de cet enroulement consiste à relier deux à deux les bobines voisines, qui forment autant de couples rattachés aux couples diamétralement opposés, ou, plus généralement, placés de même manière dans le champ magnétique.

Les points de jonction des couples de bobines sont connectés aux touches du collecteur, qui sont en nombre égal

à celui des bobines, soit en nombre double de celui des couples de bobines. Les connexions se font donc seulement de deux en deux touches. On utilise les touches

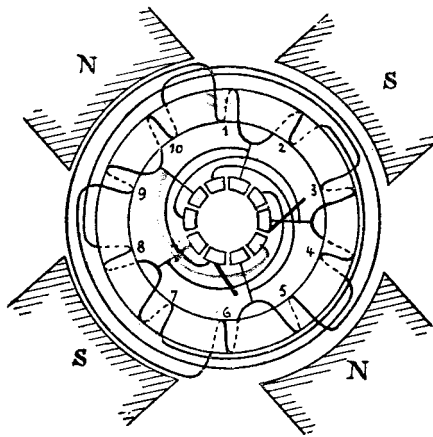


Fig. 143. — Connexion série par couples de deux bobines.

restées libres pour les relier aux lames déjà occupées, correspondantes.

On a toujours deux balais calés à 90 degrés pour la machine tétrapolaire.

L'avantage de cette disposition est de réduire de moitié le nombre des jonctions entre les bobines diamétralement opposées.

D'autres dispositions peuvent encore être employées, soit dans le cas où le nombre des bobines serait un multiple de celui des pôles, soit dans le cas d'un nombre quelconque de bobines ; mais les cas examinés sont ceux qui donnent lieu aux enroulements les plus simples et les plus symétriques, et leur description nous paraît suffisante pour le programme poursuivi.

127. **Induit à tambour ou Siemens.** — L'induit Siemens se présente sous la forme d'un cylindre allongé constitué

comme l'anneau Gramme, par des rondelles de tôle mince calées sur l'arbre.

Contrairement à la disposition adoptée dans l'anneau, *l'enroulement est complètement extérieur à l'armature* (fig. 144) : chaque spire se compose de deux brins A B et *a b* menés suivant les génératrices du cylindre et de deux conducteurs de connexion A *a* et B *b*.

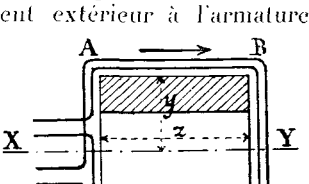


FIG. 144.— Spire de l'enroulement en tambour.

Ces derniers ne coupent pas de lignes de force et les parties A B et *a b* sont les seules actives ; comme elles se trouvent simultanément dans des champs opposés, elles sont le siège de force électro-motrice de sens contraire qui concordent et s'ajoutent dans l'ensemble de la spire, comme le montre la figure.

Si l'on compare cette disposition à celle de l'anneau, on voit que deux spires de celui-ci ne présentent que deux brins extérieurs actifs, tandis que les deux spires du tambour comportent quatre brins extérieurs efficaces (fig. 145).

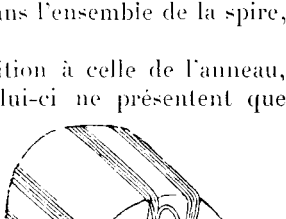


FIG. 145.— Induit en tambour.

Il en résulte : 1° que, toutes choses égales d'ailleurs, la spire du tambour développera une force électro-motrice double de celle de l'anneau ; 2° que pour un même nombre de spires, le nombre des fils extérieurs sera double dans le tambour par rapport à l'enroulement de l'anneau ; 3° que dans le tambour, chaque bobine étant reliée à l'une des lames du collecteur, et occupant, d'autre part, deux divisions diamétralement opposées de l'armature, le cylindre sera complètement recouvert alors que la moitié seulement

des lames sera employée, si l'on suppose que le nombre des touches du collecteur est égal au nombre des divisions ou au double des bobines. Il faudra donc compléter l'enroulement, soit en superposant une seconde couche de bobines à la première, soit en intercalant les bobines du second enroulement entre celles du premier, si l'on a eu soin de doubler le nombre des divisions de l'armature et d'enrouler les premières bobines sur les divisions de deux en deux. On enroule alors les secondes bobines dans les intervalles laissés libres, en les reliant respectivement à la seconde moitié des lames restée disponible.

Généralement le cylindre est complété, sur ses bases, par des disques dentés en bronze, dont les saillies servent à maintenir les fils des bobines. Les mêmes soins sont apportés à la construction de l'armature en tambour comme de l'armature en anneau. La surface est recouverte d'une toile isolante; les bobines enroulées sont maintenues à l'aide de frettes, qui doivent être établies avec un soin

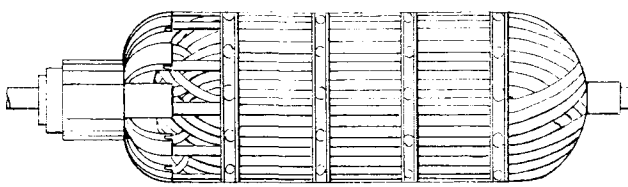


Fig. 146. — Aspect extérieur de l'induit en tambour.

particulier, pour résister à la force centrifuge dont l'effet est plus intense sur les fils très développés suivant les génératrices.

Les fils de connexion devant passer sur les abouts du tambour, forment par leur superposition deux calottes sphériques aux extrémités de l'induit (fig. 146).

L'armature étant généralement très allongée, les fils utiles placés suivant les génératrices ont un développement supérieur à celui des connexions menées sur les

bases du tambour. Le fil est donc mieux utilisé que sur l'anneau.

D'autre part, la self-induction d'une bobine à tambour est plus faible que celle d'une bobine à anneau, puisqu'elle contient deux fois moins de spires pour un même nombre de fils induits. La résistance d'une paire de spires d'anneau est aussi plus grande que celle d'une spire de tambour équivalente, au point de vue de l'induction utile. Par ces raisons, la self-induction des spires-tambour en court circuit est moindre que pour l'anneau, et peut être plus aisément contrebalancée par la force électro-motrice inverse de compensation nécessaire pour réduire les étincelles aux balais.

On peut dire aussi que l'induit Siemens n'exige pas un champ d'une symétrie aussi parfaite que l'anneau, puisque les deux fils actifs composant la spire se trouvent respectivement en même temps dans les champs contraires et que l'action magnétique est la moyenne des deux.

Par contre, la construction des induits à tambour, l'enroulement et la réparation des bobines sont beaucoup plus compliqués. La stabilité des fils sur la surface extérieure de l'armature est beaucoup plus difficile à assurer.

Le principal avantage du tambour résidant dans la bonne utilisation du fil, le diamètre doit être petit par rapport à la longueur, d'où l'obligation de grandes vitesses angulaires, soit d'un grand nombre de tours par minute, pour obtenir la vitesse phériphérique convenable de 15 à 20 mètres par seconde.

L'enchevêtrement des fils de connexion sur les bases du tambour met en contact des conducteurs à des potentiels très différents, ce qui peut occasionner des étincelles d'un fil à l'autre à travers les couches de coton isolantes. *L'induit à tambour ne convient donc pas à la production des courants à haute tension.*

120. **Divers modes d'enroulements à tambour.** — Dynamos bipolaires. — L'enroulement à tambour dans les dynamos bipolaires doit remplir les mêmes conditions que pour l'anneau, à savoir constituer un circuit continu et

fermé ou sans fin, dans lequel le courant se partage en deux parties égales et de sens contraire, sur l'une et l'autre moitié de l'induit.

Dans tous les cas, il faut que la succession des bobines connectées présente un enroulement parfaitement symétrique par rapport aux pôles inducteurs.

D'après ce que nous avons vu (§ 127), la périphérie du tambour devra être divisée en un nombre de sections double de celui des lames du collecteur, si les deux enroulements successifs doivent être juxtaposés.

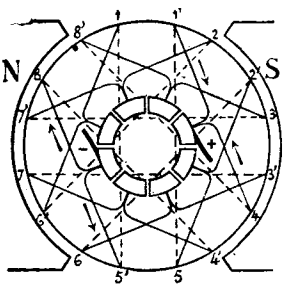


Fig. 147. — Enroulements bipolaires juxtaposés.

Soit, par exemple, une dynamo bipolaire (fig. 147) ayant 8 lames au collecteur. Nous divisons le cercle de l'armature en 8 sections doubles ou 16 parties.

On pourrait former une spire de bobine avec les deux génératrices 1 et 5', et relier les deux extrémités d'avant de ces fils aux deux lames consécutives du collecteur situées dans le voisinage du plan diamétral passant à droite de la bobine (1.5'). La disposition ainsi réalisée, serait analogue à celle usitée dans l'anneau, mais elle aurait l'inconvénient d'allonger beaucoup l'un des fils de jonction au collecteur.

On a donc l'habitude d'opérer autrement, et l'on réunit les deux extrémités de la spire ou plutôt du groupe de spires composant les sections telles que (1.5') aux lames du collecteur situées normalement au plan des spires.

Ainsi l'on dirigera les connexions de façon à relier les extrémités d'avant 1 et 5' aux lames situées de part et d'autre du plan perpendiculaire à la ligne 1.5'.

D'une manière générale, partant du point 1, par exemple, en avant du tableau, on tendra le fil suivant la génératrice, puis on le mènera sur la base d'arrière, suivant 1.5' et l'on

ramènera le second brin de la spire, d'arrière en avant ; on enroulera ainsi un certain nombre de spires destinées à former la première bobine. Le bout finissant de cette bobine sera connecté par une corde 5',8 à la section voisine de la section 1 et relié au passage à la lame du collecteur correspondant.

La seconde bobine sera menée de même suivant 8,4', avec jonction à la touche 4 du collecteur, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'on soit arrivé à la division 1'.

Il y a alors une division sur deux d'occupée par les fils induits, sur tout le pourtour de l'armature, et la moitié seulement des lames du collecteur sont utilisées ; il faut donc commencer un second enroulement dont les bobines seront intercalées entre les premières. Ce second enroulement est marqué en traits mixtes sur la figure. On voit que le circuit se ferme par 2,6 et 6,1.

Les balais, au lieu d'être placés dans le plan de commutation, sont, abstraction faite de l'angle d'avance, calés sur le diamètre perpendiculaire. Tout se passe comme si les connexions au collecteur ayant d'abord été conduites comme dans l'anneau Gramme, *on faisait exécuter au collecteur* une rotation de 90 degrés autour de son axe.

Généralement, on ne joint pas chaque division à celle diamétralement opposée, comme nous l'avons fait dans la combinaison précédente, mais à la division la plus voisine de celle-ci. Pour que l'enroulement puisse s'effectuer ainsi, il faut que les bobines soient en nombre impair, soit 9, par exemple, au lieu de 8, ce qui correspond à 18 divisions sur la circonférence de l'induit.

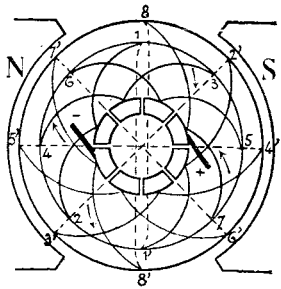


FIG. 148. — Enroulements bipolaires superposés.

Dans l'enroulement précédent, les deux sections sont juxtaposées. On peut également les superposer suivant le schéma ci-contre (fig. 148).

Le nombre de divisions de la circonférence est alors égal à celui des lames du collecteur. Ce nombre étant pair, comme précédemment, on joindra les divisions diamétralement opposées.

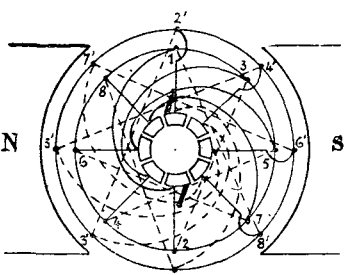


Fig. 149. — Enroulement diamétral.

Les connexions sont tout à fait analogues aux précédentes. L'enroulement, qu'il est facile de suivre sur la figure d'après la succession des numéros, se ferme par 1,8' et 1',8. Comme nous l'avons indiqué plus haut (§ 127), on peut relier les diverses sections directement aux lames situées dans le plan diamétral de chaque bobine, suivant les connexions indiquées dans le schéma ci-contre (fig. 149). Les balais sont alors placés comme pour l'induit à anneau, dans le plan neutre de commutation.

Il n'est pas indispensable de mener l'enroulement en reliant chaque fil à la division diamétralement opposée. Il suffit de faire les connexions, de sorte que la spire embrasse dans son ensemble un arc plus grand que celui qui correspond à la pièce polaire. S'il en était autrement, en effet, les deux brins de la spire arriveraient à se trouver en même temps sous le même pôle et seraient le siège de forces électro-motrices de même sens, c'est-à-dire opposées l'une à l'autre dans le circuit. On obtient ainsi une sorte d'enroulement enchaîné de spires chevauchant l'une sur l'autre (fig. 150).

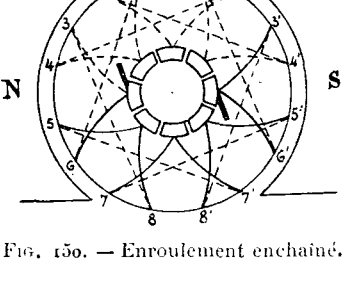


Fig. 150. — Enroulement enchaîné.

La division de la circonférence se fait comme pour les cas précédents. Afin que l'enroulement réussisse, il faut qu'une spire comprenne un nombre pair de divisions.

Ainsi, dans l'exemple ci-contre, on réunit les points de division de six en six pour former les spires, et chaque lame du collecteur est connectée au bout commençant et au bout finissant des spires ou bobines symétriquement placées par rapport à elle.

Les balais se trouvent ramenés sur le diamètre perpendiculaire au plan de commutation.

Ce mode d'enroulement est d'ailleurs peu employé, car il augmente considérablement la région neutre du champ inducteur, en réduisant l'arc embrassé par les pièces polaires.

Dynamos multipolaires. — De même que pour les induits à anneau, la machine multipolaire à tambour peut être assimilée à plusieurs dynamos bipolaires associées soit en série, soit en quantité.

La plupart des enroulements dérivent du principe appliqué dans la dernière disposition ci-dessus décrite. On forme les spires et bobines en reliant de deux en deux un nombre pair de divisions soutendant un arc plus grand que celui occupé par la pièce polaire. La disposition ci-contre (fig. 151) est tout à fait semblable à la précédente, bien que l'aspect des deux dessins diffère légèrement, les connexions entre les diverses spires et avec les touches se faisant par un conducteur en T, au lieu des deux arcs de la première figure.

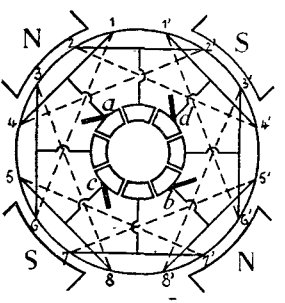


Fig. 151. — Enroulement tétrapolaire à quatre balais.

Les diamètres de contact des balais sont perpendiculaires, à chaque instant, aux bobines dont les deux directrices sont situées dans les régions neutres, de manière

à mettre en court-circuit chaque bobine au moment voulu.

Pour cela il convient que l'arc occupé par la spire ne soit pas sensiblement supérieur à celui du pas ou à 90 degrés, afin que les deux côtés de la bobine se trouvent à peu près en même temps dans les régions neutres correspondant à la position du court-circuit.

On relie ensemble les balais diamétralement opposés, qui sont, par suite, au même potentiel, et chaque couple de balais est relié à l'un des pôles de la machine. On peut, comme dans l'enroulement en anneau, connecter les touches opposées du commutateur, ce qui permet de supprimer un balai dans chaque couple, et il ne reste plus que deux balais à angle droit.

On réalise ainsi la combinaison des quatre cadrans de l'induit en dérivation, capable de donner, pour un champ inducteur égal, un courant d'intensité double et de force électro-motrice moitié moindre que dans le cas de la machine bipolaire.

Dans une dynamo à six pôles, les pôles de même nom étant situés à 120 degrés l'un de l'autre, les connexions se feront entre les touches situées à une distance angulaire de cette valeur, et les balais seront montés à 60 ou 180 degrés d'écartement angulaire.

D'une manière générale, les deux contacts des balais seront placés sur les diamètres neutres, dans des positions relatives, par rapport au champ inducteur, semblables à celles qu'ils occupent dans la dynamo bipolaire.

Dans une seconde disposition fig. 152, les conducteurs de jonction d'une spire ou d'une bobine à la suivante, embrassent des arcs égaux à ceux des spires.

La première bobine 1,6, par exemple, est reliée à la la lame 1 du collecteur et jointe à la bobine 11,16 par le conducteur 6,11. On voit que les cordes 1,6 ; 6,11 et 12,16 sont égales.

Comme toujours, le nombre des lames du collecteur est a moitié seulement de celui des divisions de l'induit.

Les deux bobines ci-dessus considérées sont reliées respectivement à deux touches qui, dans la figure, ne sont pas dia-

métralement opposées, mais qui se rapprocheraient d'autant plus de cette position que le nombre des lames serait plus considérable. Il en résulte d'ailleurs qu'il convient d'adopter un nombre impair pour les lames du collecteur, soit 9 au lieu de 8, par exemple : ce qui conduirait à 18 divisions sur l'induit. De cette façon, chaque touche, telle que 1, correspondrait à deux lames dont la cloison isolante lui serait exactement opposée. L'une ou l'autre de ces deux lames pourrait donc être considérée comme diamétralement opposée à la troisième.

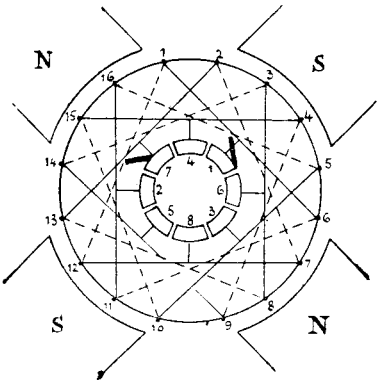


FIG. 152. — Connexion des bobines pour réduire à deux le nombre des balais.

Dans ces conditions, on voit que les couples de lames opposées sont reliés naturellement par le mode d'enroulement employé, sans qu'il soit nécessaire d'ajouter de nouveaux conducteurs de jonction. On n'emploiera donc encore que deux balais, à 90 degrés de distance angulaire.

Pour un champ à six pôles, les connexions se feront entre les touches disposées à 120 degrés l'une de l'autre, car c'est l'angle embrassé par un champ complet, pôle nord et pôle sud. Quant aux balais, ils seront établis suivant deux lignes neutres à 60 degrés, car toutes les touches à 120 degrés de part et d'autre de ces balais seront reliées par les connecteurs, et l'on pourra supprimer quatre balais sur six.

Par la même raison, on pourrait monter les dits balais à 180 degrés, les quatre balais intermédiaires se trouvant rattachés à ceux-ci et pouvant dès lors être supprimés.

D'une manière générale, les connecteurs transversaux doivent relier les touches écartées de $\frac{360^{\circ}}{C}$, en désignant par C le nombre de couples de pôles, et les balais seront disposés suivant un angle de $\frac{180^{\circ}}{C}$.

Enroulements en série. — Les divers champs inducteurs forment avec l'induit autant de dynamos partielles qui peuvent être reliées également en série.

Dans ce cas, l'enroulement est combiné de manière à ce que les deux moitiés de l'induit soient seules en parallèle, comme dans les dynamos bipolaires : la moitié des fils induits est donc en série sur chaque demi-tambour, et détermine la valeur de la force électro-motrice de la dynamo.

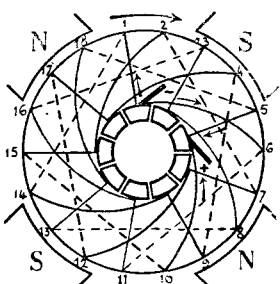


Fig. 153. — Enroulement tétrapolaire en série.

Dans cet enroulement spécial et d'ailleurs peu usité, les fils disposés suivant les génératrices sont reliés en zigzag, d'une façon continue, et de manière à former un circuit sans fin (fig. 153). Pour que l'enroulement se ferme de lui-même, il faut que le nombre des fils induits soit égal à

$$2\,C \times K \pm 2$$

K étant d'ailleurs un nombre impair.

Ainsi, pour la dynamo à quatre pôles, le nombre des divisions de l'induit pourra être :

$$2 \times 2 \times 5 - 2 = 18.$$

Le nombre des touches sera toujours égal à la moitié des divisions, soit ici égal à 9.

On joindra les divisions de manière à ce que l'arc embrassé par deux génératrices consécutives comprenne K intervalles ou $(K + 1)$ divisions.

Ainsi, dans l'exemple ci-contre, l'extrémité d'avant de

la génératrice 1 étant reliée à la touche correspondante du collecteur, est en même temps reliée par un conducteur à la génératrice K + 1 = 6. Celle-ci est reliée par un connecteur passant sur la base postérieure du tambour à la génératrice 11 et ainsi de suite. L'enroulement se forme entre les divisions 14 et 1.

Le nombre des balais est toujours réduit à deux, quel que soit le nombre des pôles, mais les contacts seront à 90 degrés lorsque le nombre de paires de pôles est pair, et sur les extrémités d'un même diamètre, lorsque ce nombre est impair.

Nous voyons, en effet, dans l'exemple ci-contre d'une machine tétrapolaire, que les deux moitiés de l'enroulement sont limitées par la division 1 près du balai négatif, et par la division 5 près du balai positif.

Partant de la division 1, en contact avec le balai négatif, on parcourt neuf génératrices, c'est-à-dire la moitié des fils induits, pour arriver à la génératrice 5 en contact avec le balai positif. Les deux balais ainsi disposés partagent donc l'enroulement en deux sections comportant un nombre égal de génératrices en série.

On verrait de même que pour un inducteur à six pôles, il faudrait placer les contacts suivant un même diamètre, soit à 180 degrés, pour réaliser cette répartition des fils induits en deux sections égales, reliées en quantité par les balais.

129. **Induit à disque** — Dans ce système d'induit, le fil actif est dirigé perpendiculairement à l'axe de rotation et engendre le plan d'un disque. Par contre, les lignes de force du champ inducteur sont parallèles à l'axe de rotation. Ces dispositions sont donc inverses de celles réalisées dans les deux autres types à anneau et à tambour.

L'enroulement induit est donc constitué par des fils fixés sur un disque rigide et dirigés suivant les rayons de celui-ci.

Le circuit induit ne peut être constitué pratiquement que par une série de boucles aplaties disposées en couronne sur le plan du disque, et composées de deux ou plusieurs

parties radiales, reliées par des connecteurs en arc de cercle. Ces boucles peuvent être assimilées aux spires d'un induit à tambour de dynamo multipolaire. C'est pourquoi les induits à disque comportent toujours un inducteur comprenant plus de deux pôles.

Le disque induit tourne donc entre deux couronnes de pôles portées par deux flasques parallèles, et qui sont alternativement de nom contraire sur chaque flasque, et en même temps de nom contraire pour les pôles placés en regard, de part et d'autre de l'induit.

L'entrefer est ici formé par la simple épaisseur du disque recouvert du circuit induit. On peut donc supprimer le noyau magnétique : aussi le disque est-il généralement constitué par du carton comprimé, ou un métal peu conducteur, tel que le maillechort, à l'exclusion du fer. On évite ainsi les courants de Foucault et les phénomènes d'hystérésis.

Comme pour les autres systèmes d'induit, les conducteurs peuvent être disposés en quantité ou en série.

La disposition réalisée dans l'exemple ci-contre d'une dynamo à quatre pôles, est tout à fait analogue à celle de l'induit en tambour de la figure 151.

Les quatre pièces polaires situées en arrière du disque sont représentées par des secteurs hachurés, quatre pôles de nom contraire sont placés en avant, vis-à-vis des premiers.

Comme dans l'enroulement en tambour, le nombre des touches du collecteur est seulement la moitié de celui des divisions du disque ou du nombre des fils radiaux.

Il faut nécessairement que le secteur embrassé par une spire soit plus grand que le secteur polaire et ne dépasse pas sensiblement le double de ce secteur (fig. 154).

Partant de la division 1, on formera une spire avec le fil 1 et le fil 6, par exemple, en reliant extérieurement ces deux fils par un conducteur circulaire. Le fil 6, soudé à la touche correspondante du collecteur, sera relié par un conducteur intérieur à la spire 3,8 dont le fil 8 est rattaché au collecteur, et ainsi de suite.

On voit que les fils radiaux sont réunis seulement de deux en deux au collecteur, soit un fil relié pour chaque spire.

Les balais, au nombre de quatre, sont disposés dans le voisinage des plans de séparation des pièces polaires et des régions neutres, et dans une position telle que les spires en court-circuit aient leurs deux fils radiaux à peu près dans ces régions, et que, d'autre part, chaque balai recueille ou rejette deux courants concordants, comme aux points *a*, *b* et *c*, *d*.

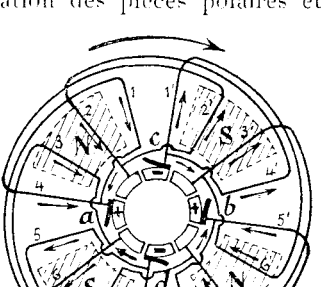


Fig. 154. — Enroulement à disque.

En reliant les pôles opposés de même nom, deux à deux, on obtient la combinaison analogue à celle de deux dynamos bipolaires reliées en quantité, donnant un courant d'intensité double avec la force électromotrice égale ou moitié moindre.

Induit Desroziers. — L'enroulement en série, qui ne comporte que deux sections en quantité reliées par une seule paire de balais, est le plus usité ; nous décrirons le type classique de l'induit Desroziers à six pôles inducteurs.

L'enroulement de ce système est dit en zigzag. Partant d'un fil radial situé dans le plan moyen de permutation, il progressera en effet, par arcs de connexion alternativement extérieur et intérieur, joignant d'abord tous les fils radiaux les plus voisins de l'axe neutre, puis ceux qui suivent ou précèdent immédiatement ceux-là, et ainsi de suite.

On formera ainsi deux sections de fils radiaux en série, reliées en parallèle.

Cet enroulement est comparable à celui de l'induit en tambour, enroulé en série, de la figure 153.

Le nombre des divisions de la circonférence et par suite des conducteurs radiaux, sera donc fixé par la même formule :

$$2c \times K \pm 2.$$

Pour l'exemple choisi (fig. 155), $c = 3$, $2c = 6$: si nous faisons $K = 3$, nombre impair peu élevé, pour simplifier le schéma, nous aurons :

$$6 \times 3 + 2 = 20$$

Pour tracer convenablement l'enroulement, on décrira les deux couples de circonférences intérieures et extérieures, représentées ci-contre en pointillé, et l'on tracera, suivant les points de division, des rayons alternativement longs et courts, arrêtés successivement aux circonférences moyennes et extrêmes. Ces rayons marqueront l'emplacement et la longueur des fils radiaux. On réunira ensuite ces rayons, en zigzag, de quatre en quatre par exemple, de telle sorte que la boucle formée telle que a, b, c, d, e, embrasse un secteur plutôt inférieur au sixième de la circonférence.

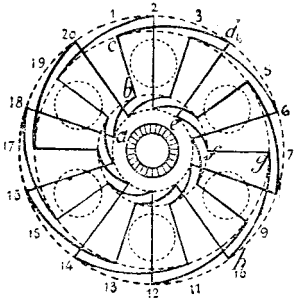


Fig. 155. — Enroulement Desroziers.

L'enroulement commencé à la division 1 en marchant vers la droite, se termine par les fils 18,1.

En pratique, les fils radiaux sont tendus sur l'une des faces d'un disque de carton comprimé et les conducteurs de connexion courbes sur l'autre face : le passage se fait par des orifices percés d'avance aux extrémités des fils radiaux.

L'enroulement se trouve ainsi naturellement fixé sur le carton, et l'on évite le chevauchement et le contact des fils induits et des connexions.

Il y a même en réalité deux disques de carton qui por-

tent chacun la moitié de l'enroulement, et les diverses boucles sont montées alternativement sur l'un et l'autre de ces disques ; les boucles en traits forts seraient placées par exemple, sur le plateau d'avant et les autres sur le plateau d'arrière.

Les deux disques de carton sont appliqués de part et d'autre d'un plateau métallique rigide calé sur l'arbre ; on réunit ensuite le bout finissant de chaque boucle au bout commençant de la suivante, d'un disque à l'autre, de manière à former un enroulement continu et sans fin. Chaque boucle peut d'ailleurs être formée par plusieurs fils radiaux, comme il est indiqué en V, afin d'augmenter la longueur du circuit induit.

Les extrémités de chaque boucle, telles que *a m n p*, etc., sont reliées respectivement aux lames correspondantes du collecteur (fig. 156).

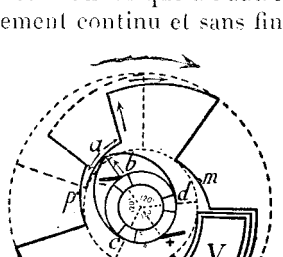


FIG. 156. — Mode de liaison des bobines au collecteur.

Il y a lieu de remarquer, d'autre part, que trois lames quelconques placées à 120 degrés l'une de l'autre occupent en même temps une position semblable par rapport aux pôles de même nom.

Or, considérons le point *a* qui est relié au balai négatif par la lame *b* ; il est l'origine du courant qui pénètre dans l'induit, et les fils radiaux situés de part et d'autre dans le voisinage de ce point sont à l'état de force électro-motrice nulle ; puis la force électro-motrice va en croissant de 0 à partir de chaque balai, dans les deux sens.

Quand l'induit aura tourné d'un tiers de circonférence, le point *a* sera venu en face de *d* et la touche *c* aura remplacé la touche *b* sous le balai. Le point *a* se trouvera dans la même situation, au point de vue magnétique, que précédemment : il sera encore le point d'origine du courant et devra être relié au balai par l'arc *a c*. Après un second

tiers de tour, *a* viendra vis-à-vis de *c* et *d* sera sous le balai ; le point *a* devra donc encore être relié au balai par l'arc *a d*, afin de constituer le commencement des demi-enroulements en série, dans chacune de ces trois positions.

Il en sera de même pour tous les points de connexion des diverses boucles du collecteur ; chacun d'eux devra être relié à trois lames à 120 degrés. Il en résulte que le nombre des touches sera triple de celui des boucles réunies au collecteur, soit, ici, égal à 30, le nombre des divisions étant égal à 20, c'est-à-dire au double du nombre des boucles.

Les fils de connexion qui réunissent les lames trois par trois sont disposés sur un plateau circulaire, dit *connecteur*, monté sur l'arbre et interposé entre l'induit et le collecteur. Les fils qui réunissent directement les sections de l'induit au collecteur, tels que *a b*, traversent simplement le plateau ; ceux qui établissent les liaisons avec les touches à 120 degrés s'étalent en arc de cercle sur les faces du plateau, ceux qui se développent en arc dextrorsum sur la face avant, par exemple, ceux en arc sinistrorsum sur la face arrière. On évite ainsi les croisements de conducteurs et le moulage se fait avec plus de facilité et de régularité.

Au point de vue de la construction, les induits à disque sont plus compliqués que les systèmes à tambour et à anneau ; ils présentent surtout des difficultés dans le montage des fils et les dispositions voulues pour assurer la rigidité de la carcasse.

La multiplicité des pôles, en augmentant le développement des circuits magnétiques et les pertes de flux dérivés dans l'air, exige une dépense d'excitation plus grande. Celle-ci est encore accrue par la suppression du noyau de fer de l'induit et l'épaisseur relativement grande de l'entrefer.

Par contre, l'absence de fer dans l'induit a l'avantage d'éviter les pertes d'énergie par hystérésis et par courants de Foucault.

Enfin, la forme en disque permet d'adopter de grands diamètres et, par suite, d'obtenir la vitesse linéaire néces-

saire au développement de la force électro-motrice, avec des vitesses angulaires modérées, c'est-à-dire avec un nombre de tours par seconde relativement faible.

130. **Induits ouverts**. — Les induits que nous avons considérés précédemment présentent un enroulement sans fin, ou fermé sur lui-même. Il existe encore une autre catégorie de dynamos à courants continus dont les diverses bobines forment des groupes indépendants les uns des autres, sans connexions permanentes entre eux et constituent des circuits interrompus, quand ils ne sont pas reliés par les balais. De pareils induits ont reçu le nom d'*induits ouverts*.

Ce genre de dynamos est représenté à peu près exclusivement par deux types classiques qui sont la machine *Brusch* et la machine *Thomson-Houston*, à intensité constante.

Ces deux machines présentent chacune des dispositions spéciales et diffèrent notablement entre elles; nous les décrirons, dès à présent, pour mieux en expliquer la théorie.

Machine Brusch. — Voyons d'abord le principe sur lequel est basé le système Brusch.

Supposons que l'enroulement d'un anneau Gramme soit réduit à deux bobines diamétralement opposées et n'occupant qu'une faible fraction de la circonférence de l'anneau. Le nombre des lames du collecteur sera également réduit à deux, et à chacune des touches seront soudés l'un des bouts finissant et l'un des bouts commençant de chaque bobine. Cela suppose, d'ailleurs, que les deux bobines sont reliées en dérivation comme dans les dynamos ordinaires.

Mais on peut également disposer ces bobines en série et obtenir la disposition ci-contre, dans laquelle chacune des touches reçoit uniquement l'une des deux extrémités du circuit en série (fig. 157).

Cette disposition simple constitue un induit ouvert, car le courant partant de la touche de droite en *b* parcourt la bobine B, la bobine A, et aboutit à la touche de gauche en *a*; les deux extrémités *a* et *b* sont séparées par les inter-

valles isolants c et d et le circuit est ouvert si l'on soulève les balais.

On remarquera ici que les deux segments de bague fendue qui constituent le collecteur, sont disposés de telle sorte que leur corde cd est perpendiculaire à l'axe AB des bobines. Il en résulte que la ligne de contact des balais doit être placée suivant l'axe polaire NS, car dans cette position les balais recueilleront le courant des bobines au moment où leur force électro-motrice sera maximum, tandis que ces mêmes bobines seront dans la région neutre PV, lorsque les espaces isolants cd passeront sous les balais, c'est-à-dire au moment où, les bobines étant inactives, l'ouverture du circuit sera sans inconvénient.

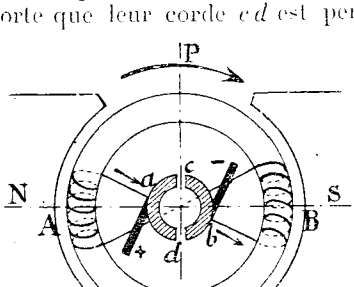


Fig. 157. — Induit à enroulement ouvert.

Ainsi, par suite de la circonstance spécifiée plus haut, on constatera, que contrairement à ce qui se passe le plus généralement dans les dynamos des types précédents, les balais au lieu d'être calés suivant la ligne neutre, sont placés sur la ligne de champ maximum, dans les dynamos à induits ouverts.

La même disposition de deux bobines diamétrales, reliées en série, pourrait être aussi bien réalisée sur une armature à disque ou à tambour.

Si nous supposons que les bobines A et B occupent environ un arc de 90 degrés sur la circonférence, et si nous réduisons les segments du commutateur dans le même rapport, il arrivera, d'une part, que le courant ne sera recueilli que pendant la moitié d'un tour ; d'autre part, qu'il sera recueilli justement pendant le temps que

la force électro-motrice est la plus active et conserve à peu près son intensité maxima.

Mais avec cette disposition, le courant serait interrompu pendant la moitié de chaque révolution et la moitié seulement de la surface de l'armature serait utilisée.

On dispose alors deux groupes de bobines à angle droit, en faisant aboutir les extrémités de chaque couple à deux secteurs, de sorte que l'ensemble du commutateur est formé de quatre secteurs ayant une largeur angulaire légèrement inférieure à 90 degrés, en tenant compte des vides qui les séparent.

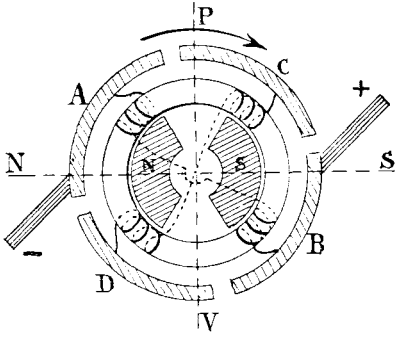


Fig. 158. — Enroulement à quatre bobines.

On obtiendrait donc la disposition représentée par le schéma (fig. 158), dans lequel, pour plus de clarté, on a agrandi démesurément le collecteur, en le représentant comme enveloppant l'armature et les pièces polaires supposées à l'intérieur de l'induit.

Chacune des paires de bobines A B, C D agit comme précédemment ; mais lorsque la paire C D est hors circuit, la paire A B est active et réciproquement.

On remarquera, toutefois, que le courant est encore interrompu quatre fois par tour, lorsque les espaces isolants passent devant les balais. Ces intervalles sont, en effet, supérieurs à la surface de contact des balais, car ce système de dynamos est spécialement destiné à l'obtention des courants à haute tension, et il convient d'écarter suffisamment les touches du commutateur pour éviter les traînées d'étincelles qui franchiraient, à ces hauts potentiels, les intervalles restreints des collecteurs ordinaires.

On retrouve, d'ailleurs, l'inconvénient précédent de laisser inutilisés les couples de bobines, successivement, pendant la mise en court-circuit, c'est-à-dire pendant la demi-durée de la révolution.

Ces défauts seraient supprimés si les segments du collecteur occupaient chacun environ la moitié de la circonférence, mais pour qu'il en soit ainsi il faut nécessairement que chaque paire de segment chevauche sur l'autre. Dans cet ordre d'idées, on pourra diviser la circonférence du commutateur en huit parties égales et donner à chaque segment une longueur d'arc comprenant trois de ces parties. L'arc de recouvrement d'un segment sur l'autre sera alors de 45 degrés, et l'intervalle entre les deux segments d'un même groupe sera de 45 degrés également.

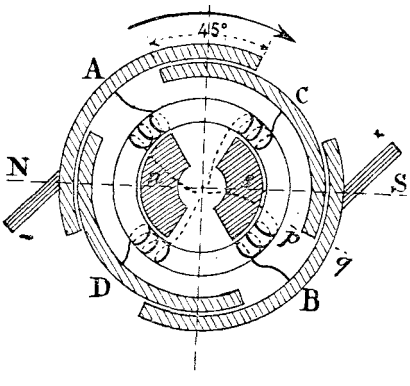


FIG. 159. — Chevauchement des segments du collecteur.

Les choses seront disposées conformément au schéma ci-contre, dans lequel on a supposé différents les diamètres de chacun des couples de secteurs, pour la plus grande clarté du dessin (fig. 159).

Dans la position du dessin, il faut se représenter que le balai N appuie à la fois sur les segments A et D et de même le balai S sur les segments C et B. Il en résulte que les deux couples de bobines sont alors en parallèle ou quantité et cela pendant un déplacement angulaire de 45 degrés, soit un huitième de tour ; ensuite, les sections A, B vont se trouver hors circuit pendant un huitième de tour encore, puisque chaque secteur n'embrasse que trois huitièmes de la circonférence : pendant ce temps,

les sections C. D. seront seules en circuit et fourniront de la force électro-motrice.

Le tableau suivant rend compte de la succession des phases du fonctionnement, pendant les diverses fractions d'un demi-tour.

Premier huitième de tour :	A B et C D en parallèle.
Deuxième	C D seul en circuit. A B hors circuit.
Troisième	A B et C D en parallèle.
Quatrième	A B seul en circuit. C D hors circuit.

Les mêmes phases se renouvellent pendant le second demi-tour et ainsi de suite.

Le couple A B, C D, par exemple, entre en parallèle au moment où la génératrice de la bague collectrice commune aux points p et q passe sous le balai S. A cet instant la paire de bobines C D quitte la région neutre pour se rapprocher du champ maximum et sa force électro-motrice

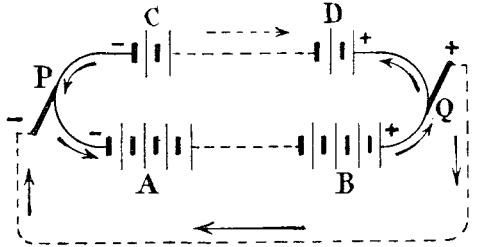


Fig. 160. — Mise en parallèle des deux forces électro-motrices inégales.

va en croissant ; au contraire, les bobines A B s'éloignent de l'axe N S et leur force électro-motrice diminue.

La situation est analogue à celle de deux piles en quantité dont les forces électro-motrices seraient inégales.

Dans ces conditions (fig. 160), on peut se demander quelle sera la différence de potentiel aux points P et Q.

La force électro-motrice de la pile AB étant supposée supérieure à celle de CD, refoulera celle-ci et tendra à faire passer en CD un courant de sens inverse. En définitive, le courant déversé par AB dans le circuit extérieur d'utilisation et dans le circuit intérieur de la pile CD, devra être assez intense pour déterminer une chute de potentiel égale à l'excédent de force électro motrice de AB sur CD. A ce moment, la différence de potentiel aux pôles de la pile AB sera descendue au niveau de la force électro-motrice de CD.

Finalement, il s'établira aux pôles communs P et Q une différence de potentiel correspondant à celle fournie par la pile la plus faible.

Si les choses se passaient exactement de même dans l'induit de la dynamo, il en résulterait: 1° une absorption inutile d'énergie, correspondant au courant inverse lancé dans la pile à force électro-motrice inférieure: 2° une réduction de la force électro-motrice moyenne de l'induit, puisque la mise en parallèle tend à réduire la force électro-motrice de l'ensemble au-dessous de celle de la section la plus active.

Mais la self-induction des bobines remédie en grande partie à ces inconvénients. Elle s'oppose d'abord à l'établissement du courant inverse dans CD, d'autant plus que la force électro-motrice induite dans ce couple va en croissant; puis, lorsque la force de AB qui décroît est devenue inférieure à CD, elle s'oppose encore au renversement du courant dans le premier couple en augmentant la force électro-motrice induite dans ce couple.

Ainsi la self-induction offre un certain obstacle à la production des courants inverses intérieurs et elle tend à égaliser les forces électro-motrices dans les deux couples de bobines.

D'autre part, cette inégalité de tension n'est pas inutile, car elle prépare la section qui s'approche de la région neutre à se mettre en court-circuit, en arrêtant le courant qui la traverse, de manière à ce qu'au moment de la rupture, ce courant soit assez réduit pour ne pas occasionner des étincelles trop considérables aux balais.

On voit, en résumé, quelle est l'économie du fonctionnement de cet induit. Les couples de bobines étant à angle droit, entrent successivement dans leurs phases d'induction nulle et d'induction maximum, le minimum de l'un correspondant au maximum de l'autre et inversement. Les forces électro-motrices des deux sections sont pour ainsi dire complémentaires et se compensent dans une certaine mesure à chaque instant ; d'où une plus grande uniformité de la force électro-motrice de l'induit.

Le jeu du commutateur a pour effet de mettre les deux couples en dérivation ou quantité, lorsque leurs bobines sont dans la région d'induction moyenne ; puis chaque couple reste seul actif pendant sa période d'induction maximum, et devient inactif, étant mis hors circuit lorsqu'il passe dans la région neutre.

Cette mise hors circuit est nécessaire, car si l'une des sections était mise en parallèle avec la section d'induction maximum, à son passage dans la région neutre, alors qu'elle ne développe aucune force électro-motrice, elle absorberait en pure perte une partie du courant engendré par la seconde paire de bobines.

On peut répéter plusieurs fois la combinaison précédente de deux couples de bobines à angle droit, sur le même induit. La disposition ci-contre fig. 161 montre un induit à quatre couples, deux à deux à angle droit. Les bobines du deuxième groupe A_1 B_1 C_1 D_1 sont intercalées entre celles du premier A B C D, et sont, par conséquent, en avance d'un huitième de circonférence ou de 45 degrés sur ces dernières.

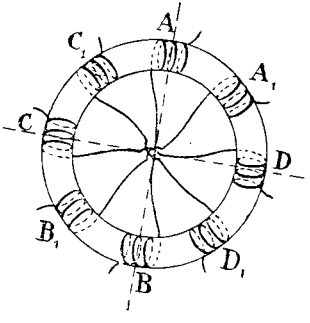


Fig. 161. — Induit à quatre couples de bobines.

Chacun des groupes comporte un commutateur distinct, à deux secteurs, avec ses deux balais. Les secteurs

des différents commutateurs occupent, les uns par rapport aux autres, les mêmes positions relatives, de sorte que leurs éléments présentent entre eux la même différence de phase de 45 degrés.

Les balais sont reliés en série, comme les pôles de deux piles, et l'ensemble équivaut à deux induits accouplés en tension.

Ces dispositions ont pour effet d'atténuer encore davantage les ondulations de la force électro-motrice et du courant, tout en permettant d'obtenir des courants à haut potentiel.

En pratique, chaque commutateur est constitué par quatre segments métalliques, montés sur des bagues isolantes calées sur l'arbre et découpés en forme de T, de telle sorte que les projections de chacun des couples s'intercale dans l'intervalle qui sépare les secteurs de l'autre couple. Ces divers secteurs sont, d'ailleurs, séparés et isolés les uns des autres par des intervalles d'air suffisant pour obvier à la production d'étincelles permanentes sous l'action des hautes tensions inhérentes à ce genre d'induit.

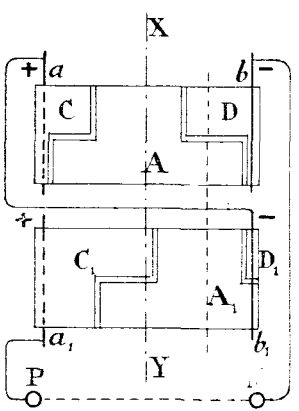


FIG. 162. — Collecteur de la machine Brusch.

Les deux commutateurs représentés ici en projection horizontale (fig. 162), sont disposés sur l'arbre dans la position relative qu'ils occupent sur le dessin. Les barres $a\ b$, $a\ b_1$, représentant les lignes de contact des balais, on voit que le balai positif a, du premier commutateur, est relié au négatif b du second; les balais $a_1\ b$ sont connectés directement aux pôles de la dynamo.

Dans cette situation, les secteurs A et B, qui se recouvrent en projection, sont hors circuit : les secteurs C et D

sont seuls en contact avec les balais et fournissent leur force électro-motrice au circuit ; les deux couples de secteurs $A_1 B_1$ et $C_1 D_1$ sont réunis en dérivation par les balais *a b*.

Finalement l'ensemble présente une section hors circuit, deux en parallèle, et la quatrième en série avec celle-ci. Cette combinaison se perpétue pendant la rotation, et chacune des sections est mise successivement hors circuit d'un groupe à l'autre, tandis qu'il y a toujours un couple en série avec deux couples dérivés, alternativement dans le premier et le second groupe.

Si l'on porte à 6 le nombre des couples, on aura trois groupes de quatre bobines, exigeant trois commutateurs et six balais, et présentant entre eux une différence de phases d'un douzième de tour ou de 30 degrés ; c'est ainsi qu'est établi l'induit de la *machine Brusch*, que nous décrirons en peu de mots.

L'induit se présente sous la forme d'un anneau plat formé par une bande de feuillard de 1,5 millimètres d'épaisseur, enroulée d'une façon continue sur elle-même ; les diverses spires sont maintenues par des rivets, puis l'on creuse à la fraise, sur les faces de l'armature, des rainures *b* séparées par des projections triangulaires *a*, entre lesquelles on enroule les bobines induites formées d'un très grand nombre de spires *c* (fig. 163). Il faut prendre des dispositions toutes spéciales pour isoler les bobines du fer de l'armature et même les différentes couches de spires de chaque bobine entre elles, en interposant des pièces de calicot imprégnées de gomme laque, vu la grande différence de potentiel, qui peut atteindre 3000 volts entre les différentes parties de l'induit.

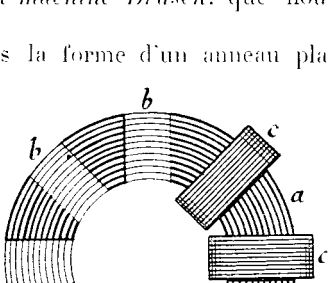


Fig. 163. — Induit Brusch.

Le champ magnétique est constitué par deux électro-aimants en fer à cheval, dont les pièces polaires se développent sous forme de segments courbes qui embrassent chacun les 3/8 de la surface latérale de l'induit.

L'inducteur présente d'ailleurs en projection horizontale et en élévation la disposition ci-contre (fig. 164). L'anneau plat tourne entre les quatre pièces polaires ; les pôles qui se font face de part et d'autre de l'induit sont de même nom. Le flux magnétique se divise donc en deux circuits pénétrant chacun la moitié de l'épaisseur de l'armature.

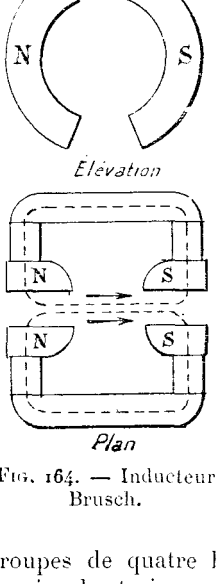


Fig. 164. — Inducteur Brusch.

La réaction magnétique de l'induit est très considérable dans cette machine, aussi le flux d'induction maximum est-il reporté vers les becs des pièces polaires laissées en arrière du mouvement ; c'est donc dans cette direction que doit passer le diamètre de contact des balais et ceux-ci se trouvent reportés en avant du mouvement par rapport au diamètre horizontal.

La machine Brusch comporte douze bobines induites ou trois groupes de quatre bobines à angle droit, elle est donc munie de trois commutateurs doubles reliés en série. Par suite du jeu de ces commutateurs, il y a toujours dans l'un ou l'autre des groupes, un couple de bobines hors circuit, tandis que dans les deux autres groupes les deux couples sont en dérivation. L'ensemble comporte donc à chaque instant, deux groupes de deux couples dérivés, en série avec le couple du troisième groupe qui n'est pas hors circuit (fig. 165).

Ces dynamos étant construites pour donner de hautes tensions, sont généralement utilisées à l'alimentation de

lampes à arc en série, c'est-à-dire parcourues par le même courant. Cette disposition exige un courant constant malgré la variation de la résistance du circuit.

La constance de l'intensité du courant est obtenue au moyen d'un régulateur automatique qui consiste en une résistance variable montée en dérivation sur le circuit

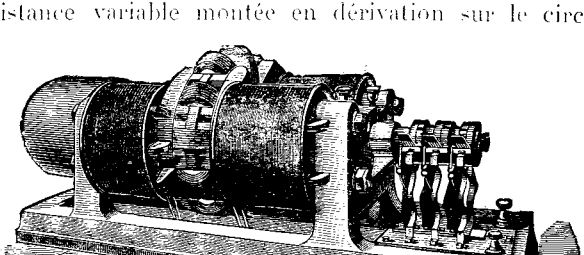


Fig. 165. — Machine Brusch.

inducteur. Cette résistance est constituée par des pastilles de charbon de cornue superposées et soumises à la pression d'un levier solidaire de l'armature d'un électro-aimant. Le solenoïde excitateur de ce dernier est traversé par le courant principal.

Quand l'intensité de ce courant augmente ou diminue, la pression exercée par le levier sur les pastilles de charbon varie dans le même sens, et la résistance électrique en sens inverse : si donc le courant augmente, la pile de charbon devenant plus conductrice se laisse traverser par une dérivation plus intense, ce qui diminue d'autant le courant d'excitation des inducteurs et par cela même la force électro-motrice de l'induit : finalement le courant tend également à diminuer dans les conditions de résistance actuelle du circuit et reprend son intensité normale.

La régulation se ferait de même, en sens inverse, dans le cas de diminution d'intensité du courant principal.

Machine Thomson-Houston. — Examinons maintenant

le principe du second type de dynamo à circuit ouvert, c'est-à-dire du système Thomson-Houston.

L'induit comporte trois bobines dont les axes sont à 120 degrés l'un de l'autre. Ces trois bobines sont reliées ensemble, en un point commun, par l'une de leurs extrémités ; les extrémités restées libres aboutissent respectivement à chacun des trois secteurs dont se compose le commutateur (fig. 166).

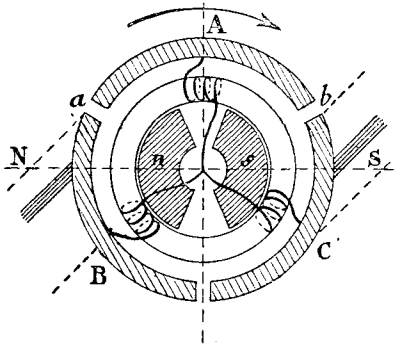


FIG. 166.— Enroulement Thomson-Houston.

Comme précédemment, la ligne de contact des balais se confond avec l'axe du champ maximum, ou plutôt elle se trouve reportée en avant de cet axe, dans le sens du mouvement, par suite de la réaction d'induit et de la distorsion des lignes du champ qui en résulte.

Si nous supposons que l'épaisseur du contact de chaque balai soit inférieure à la largeur de l'intervalle isolant du collecteur, le circuit sera interrompu à chaque passage de ces intervalles sous les balais, soit six fois par tour. En outre, chaque secteur ou chaque bobine sera hors circuit pendant une période de rotation de 60 degrés environ, puisque lorsque l'extrémité *a* du secteur supérieur quitte le balai N, son autre extrémité *b* se trouve à (180 — 120) = 60 degrés du balai S, abstraction faite de l'intervalle isolant.

En dehors des périodes relativement courtes d'interruption, l'induit fonctionnera, comme le représente le dessin, avec une bobine A hors circuit et deux bobines B et C en série.

Pour remédier aux interruptions multipliées qui donne-

raient une force électro-motrice et un courant très irréguliers, il faut augmenter l'étendue de la surface de contact des balais, de telle sorte que ceux-ci placés à cheval sur les extrémités de deux secteurs voisins ne quittent pas l'un d'eux avant d'avoir atteint le contact avec l'autre.

De cette manière, il n'y aura plus de coupure ou d'interruption de circuit, et la durée très courte d'interruption sera remplacée par une période de mise en parallèle des deux secteurs reliés par l'un ou l'autre des balais.

Donnons, par exemple, au contact des balais une largeur angulaire de 60 degrés, telle que celle indiquée par les lignes pointillées de la figure.

Nous voyons alors que chaque bobine ou secteur restera en contact avec le balai correspondant pendant un demi-tour, car pour que le secteur C, supposé d'abord en A, par exemple, vienne dans la situation actuelle sur le dessin, il a fallu qu'il glisse d'abord de 60 degrés au contact du balai S, puis ayant encore glissé du même angle, sa seconde moitié sera venue en contact avec le balai, enfin après un troisième glissement égal, il échappera le balai: il y aura donc contact pendant trois fois 60 ou 180 degrés, c'est-à-dire pendant un demi-tour.

Dans la première de ces trois périodes, la bobine C est en parallèle avec A; pendant la seconde, elle est en série avec A et B en parallèle; pendant la troisième, elle est en parallèle avec B; les mêmes périodes se renouvellent dans le second demi-tour et ainsi de suite, indéfiniment.

La mise en parallèle de deux bobines donne lieu aux mêmes phénomènes de réduction de force électro-motrice moyenne et de renversement de courant intérieur signalés dans le cas précédent. Ces phénomènes sont également atténués par la self-induction des bobines, qui tend à équilibrer les forces électro-motrices des sections en dérivation et à annuler le courant des bobines commutées, au moment de leur passage d'un balai à l'autre.

L'augmentation d'épaisseur des balais a, par contre, l'inconvénient de ne laisser la bobine seule en série que

pendant un sixième de tour et de la mettre en dérivation avec une bobine moins active pendant une fraction plus grande de la révolution.

Imaginons maintenant que l'épaisseur de contact des balais soit supérieure à 60 degrés. En pratique, on réalise cette condition *en remplaçant chaque balai par un couple* de frotteurs espacés de l'angle voulu et reliés extérieurement de manière à constituer électriquement un seul balai embrassant un arc relativement considérable.

Supposons que l'arc compris entre les branches des doubles balais soit de 80 degrés, par exemple: l'arc mesurant la distance entre les frotteurs les plus rapprochés de chaque couple, sera de (180-80) = 100 degrés, et comme l'arc d'un secteur mesure 120 degrés, le secteur A, dans la position du dessin (fig. 167), débordera de 10 degrés sous chacun des couples de frotteurs. Autrement dit, le secteur et la bobine A seront à la fois en contact et cela pendant une rotation de 20 degrés, avec les balais positif et négatif. Il s'ensuit que les extrémités des bobines B et C sont reliées directement par le secteur A, dont la résistance est négligeable par rapport à celle du circuit extérieur. La machine est en court-circuit sur elle-même et le courant se ferme intérieurement dans les bobines de l'induit, sans qu'il reste de différence de potentiel sensible aux balais et aux bornes du circuit extérieur.

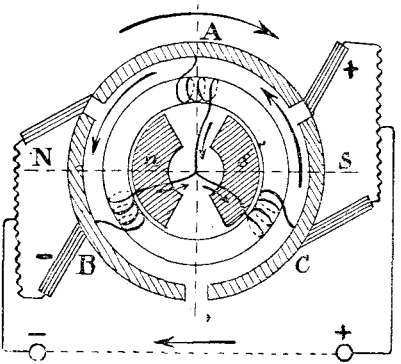


Fig. 167. — Jeu du collecteur Thomson-Houston.

Il résulte de cette conbinaison : 1° Que chaque bobine se trouve dans sa position d'action maximum, seule et en série.

pendant une période d'autant plus courte que l'arc des deux frotteurs de chaque balai-couplé est plus étendu ; 2° que la mise en court-circuit de chaque bobine et, par cela même, la période d'action nulle de l'induit augmente en même temps que cet arc.

De là un moyen de faire varier à volonté la différence de potentiel aux bornes d'un pareil induit, car la force électro-motrice maximum est réduite par la mise en parallèle de deux bobines différemment actives, et les six périodes de court-circuit diminuent d'autant la force électro-motrice moyenne.

C'est sur ce principe qu'est basée la machine Thomson-Houston à courant constant.

Nous avons déjà décrit l'inducteur (fig. 127) de ce système, qui est caractérisé par des pièces polaires hémisphériques.

L'induit est constitué par une carcasse creuse, en fer et fonte, recouverte de trois bobines dont les spires média-

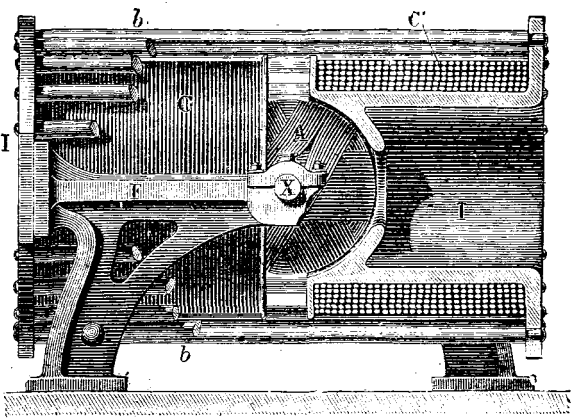


FIG. 168. — Machine Thomson-Houston (coupe).

nes sont inclinées de 120 degrés l'une sur l'autre. Ces bobines sont maintenues sur l'armature au moyen de

taquets en bois fixés dans des trous convenablement disposés.

Les spires sont enroulées successivement par moitié, de manière à ce que le circuit de chaque bobine ait le même développement. Quand l'enroulement est terminé, l'induit affecte la forme générale d'une sphère légèrement aplatie aux pôles traversés par l'arbre moteur. L'enroulement est ensuite fretté à l'aide de bandes formées de fils de laiton fortement serrés pour maintenir en place les spires induites. Les extrémités des bobines sont reliées comme il est indiqué ci-dessus.

La machine est pourvue de deux balais-couplés dont les frotteurs font entre eux, normalement, un angle de 60 degrés (fig. 168).

On a vu que, dans ces conditions, l'arrangement des bobines présente généralement deux sections couplées en quantité et disposées en tension avec la troisième. D'autre part, chaque bobine est mise hors circuit à son passage dans la région neutre.

Les balais sont portés par un système de leviers dont le jeu a pour effet de faire varier l'angle que font entre eux les deux frotteurs de chaque balai-couplé. On fait ainsi varier la force électro-motrice de l'induit, ainsi qu'il a été expliqué plus haut, afin de maintenir constante l'intensité du courant.

Ce réglage se fait automatiquement par l'action d'un électro-aimant A, placé en dérivation sur le circuit extérieur et qui commande le porte-balais par la tringle articulée *a b* (fig. 169).

Un second électro B a son enroulement en série sur le circuit principal.

Pour un courant normal, le noyau mobile de l'électro B repose sur le plot métallique *c*, et le courant issu des balais positifs *b*, traverse le solénoïde inducteur P, passe du plot *c*, par le noyau de l'armature dans l'enroulement de B, à la borne *p* dans le circuit extérieur, dans le second solénoïde, et rentre par les balais négatifs *d*.

La bobine A, de faible résistance, est alors en court-circuit, et le courant passe de préférence en dehors d'elle.

Si maintenant l'intensité en courant s'élève au-dessus de la valeur normale, par suite d'une diminution de résistance survenue dans le circuit extérieur, le noyau de B sera aspiré par le solénoïde de bas en haut, et le circuit suivi précédemment sera coupé en c; le courant sera donc obligé de changer de direction à partir du point K et de traver-

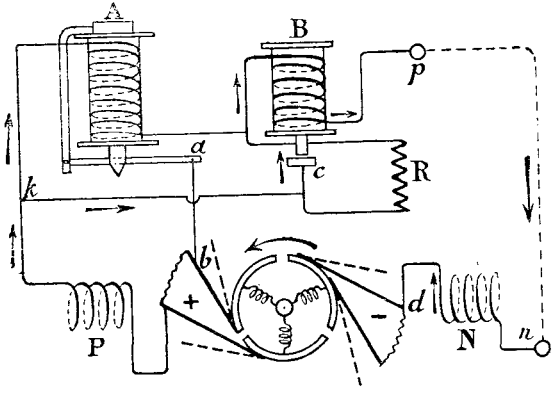


Fig. 169. — Réglage automatique.

ser le solénoïde A. La tige ab est alors soulevée et, par l'effet du système de leviers articulés mis en jeu, les frotteurs de chaque couple s'écartent l'un de l'autre, en roulant sur l'anneau du commutateur et se rapprochant des lignes pointillées.

La force électro-motrice et le courant sont ainsi ramenés à leur taux normal: l'action de B diminue, le noyau tombe et referme le circuit en C, remettant A en court-circuit.

Enfin R est une résistance en dérivation de part et d'autre du point c, et par laquelle peut se dériver le courant à la rupture pour éviter les étincelles en ce point. On voit que les circuits inducteurs sont en série avec l'induit;

grâce à cette disposition, le courant se trouve régularisé par la self-induction de ces bobines, qui joue le rôle de volant compensateur.

Par suite de la haute tension de ces dynamos, il se produit une grande quantité d'étincelles entre les frotteurs d'avant et l'extrémité de sortie des secteurs. Pour y remédier, M. Thomson emploie un ventilateur rotatif qui

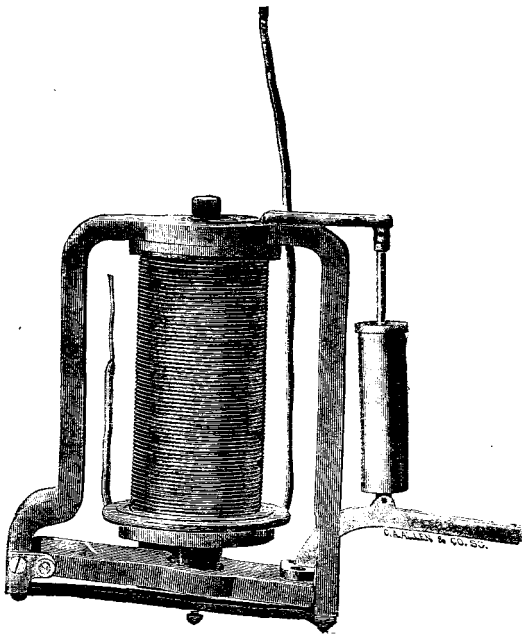


FIG. 170. — Régulateur Thomson Houston.

souffle les étincelles au moment de leur formation par deux tuyères disposées dans le voisinage de ces frotteurs.

La figure 170 montre le détail de construction de l'électro-régulateur A, monté sur un cadre pourvu d'une pompe à glycérine, dont le cylindre articulé au levier *a*, sert à amortir le mouvement brusque du système.

Par suite de la théorie exposée, on conçoit que le rendement de la dynamo à induit ouvert soit inférieur à celui de la dynamo à induit fermé ; les mises hors circuit ou en court-circuit, les couplages en parallèle des bobines, et la production des courants parasites, absorbent une partie importante de l'énergie.

Par contre, ce système est très favorable à la production des hautes tensions et permet d'obtenir aisément un courant d'intensité constante. Aussi ces machines sont-elles presque exclusivement utilisées à l'éclairage des lampes à arc disposées en série, ce qui exige une tension élevée et un courant constant.

CHAPITRE VII

FONCTIONNEMENT DES DYNAMOS

Nous avons étudié en détail la construction des principaux organes des dynamos, et exposé le mode de génération des courants dans l'induit.

D'autre part, le fonctionnement des dynamos exige la présence d'un champ magnétique inducteur, et l'utilisation de l'énergie engendrée soulève diverses questions de variations relatives des trois éléments du courant, de régulation, de rendement et de couplage, que nous examinerons également dans ce chapitre.

131. **Modes d'excitation.** — Pour obtenir un champ magnétique, on peut avoir recours soit à un aimant permanent en acier, soit à un électro-aimant.

Le premier procédé a été employé dès l'origine, dans les machines désignées pour cette raison sous le nom de *magnétos*, et c'est ainsi qu'était établie la machine de Meritens qui fut longtemps employée pour l'éclairage des phares.

Le champ inducteur des aimants permanents est entièrement gratuit, mais son intensité, comme nous l'avons vu dans l'étude de l'aimantation et de l'induction magnétique, est bien inférieure à celle des champs galvaniques des électro-aimants, qui est théoriquement indéfinie puisqu'elle ne dépend que du courant excitateur qui parcourt le solénoïde. Pratiquement, l'induction galvanique d'un électro est deux fois plus grande que le magnétisme rémanent d'un barreau d'acier.

Il en résulte que la dépense d'énergie nécessaire pour exciter l'électro est amplement compensée par les avantages et l'économie que procure un pareil système. On ne pourrait, en effet, obtenir les champs puissants qu'on utilise aujourd'hui, au moyen des aimants, qu'en donnant à ceux-ci des dimensions énormes, aussi encombrantes que coûteuses.

Les magnétos sont donc à peu près abandonnées aujourd'hui et nous ne nous occuperons ici que des *dynamos*, c'est-à-dire des machines dont le champ inducteur est fourni par des électro-aimants.

Les solénoïdes enroulés autour des noyaux inducteurs peuvent être alimentés ou *excités* de deux manières, soit par le courant emprunté à une source auxiliaire ou machine *excitatrice*, soit par le courant même issu de l'induit de la dynamo.

Le premier procédé constitue l'*excitation séparée*, le second l'*auto-excitation* ou *excitation propre*.

Quel que soit le mode d'excitation adopté, le courant excitateur doit être continu, c'est-à-dire toujours de même sens, de manière à ne pas changer la polarité des électros.

Ces divers procédés comportent chacun un agencement particulier des circuits excitateurs, et pour éviter toute confusion à ce sujet, il convient dès le début de bien distinguer, dans la machine, les points de connexion soit *aux balais*, soit *aux bornes*. On notera donc que *les bornes* sont les points où viennent se rattacher les extrémités de circuit extérieur d'utilisation. Les balais et les bornes, en effet, peuvent différer très notablement au point de vue électrique.

132. **Excitation séparée**. La source extérieure peut être constituée par une petite dynamo distincte, une batterie de piles ou d'accumulateurs.

Le plus généralement on emploie une dynamo ou excitatrice, dont le champ inducteur appartient au premier système d'auto-excitation décrit plus loin.

Dans le schéma (fig. 171), I est l'induit, C l'inducteur

et S l'excitatrice, pile ou dynamo, R le circuit extérieur, *l* les récepteurs en dérivation ; *a* et *b* sont les balais, A et B les bornes de la dynamo.

L'enroulement induit qui aboutit aux balais *a* et *b* est en série et ne forme qu'un seul et unique circuit avec le circuit extérieur d'utilisation. Celui-ci est complètement distinct et isolé du circuit des inducteurs.

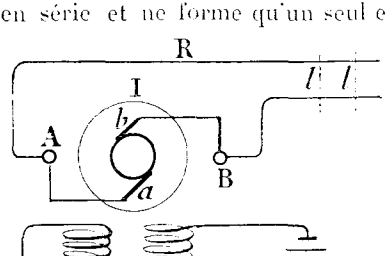


FIG. 171. — Excitation séparée.

Dans ces conditions, l'excitation est entièrement indépendante des variations possibles du courant I de l'induit; le champ inducteur serait donc constant, ainsi que la force électro-motrice, pour une vitesse constante, si la réaction de l'induit, croissant avec l'intensité du courant n'affaiblissait pas le champ principal.

D'autre part, la force électro-motrice E n'est pas l'élément le plus important du courant; ce qu'il importe généralement de maintenir constant, c'est la différence de potentiel aux bornes *e*, or d'après le § 32, nous avons :

$$e = E - r \times I$$

r désignant la résistance intérieure de l'enroulement induit. On voit que le terme soustractif augmente avec le courant I et que *e* diminue par conséquent.

Comme d'autre part :

$$I = \frac{e}{R}$$

R étant la résistance du circuit extérieur, la diminution de *e* entraîne celle de I, et les récepteurs, lampes ou moteurs, ne reçoivent plus la quantité d'électricité nécessaire à leur fonctionnement de régime.

On compense ces variations par un accroissement d'excitation des inducteurs, qui élève la force électromotrice de la machine suivant le débit.

133. **Auto-excitation.** — Ce procédé semble basé sur un cercle vicieux, puisqu'il consiste à emprunter au courant induit le courant excitateur nécessaire à la production de ce même courant.

L'auto-excitation serait donc irréalisable sans le magnétisme résiduel qui maintient un champ magnétique de faible intensité dans la carcasse de la dynamo.

Dès la mise en marche, le petit nombre de lignes de force coupé par les spires de l'armature, induit une force électro-motrice et un courant qui, si faible soit-il, produit un premier flux qui vient augmenter l'aimantation des électros. A cette augmentation de flux, correspond un accroissement de la force électro-motrice, du courant et de l'excitation, et le champ inducteur augmente ainsi progressivement, mais en tendant vers un maximum qui correspond pratiquement à l'état de saturation de la carcasse magnétique. En moins d'une minute, la dynamo atteint son excitation et sa force électro-motrice normales, correspondant à la vitesse adoptée.

Dans le cas exceptionnel où le magnétisme rémanent ne serait pas suffisant pour *amorcer* la dynamo au début, le constructeur a soin de communiquer l'aimantation nécessaire aux inducteurs avant leur sortie des ateliers.

On compte quatre systèmes différents d'auto-excitation, suivant le mode de montage des circuits inducteurs, savoir : l'*excitation série*, l'*excitation shunt ou en dérivation*, l'*excitation compound et hypercompound*.

134. **Excitation série.** — Dans ce système, les bobines inductrices sont montées en série sur le circuit extérieur.

Par suite, l'armature, l'inducteur et le circuit d'utilisation ne font qu'un seul et même circuit dont toutes les parties sont traversées par la totalité du courant induit, I.

Ici, la différence de potentiel aux balais est bien différente de la différence aux bornes, car celle-ci est réduite de la valeur de la chute de tension qui se produit dans les

bobines inductrices, depuis le balai *a* jusqu'a la borne A (fig. 172).

Désignant par e_1 la différence de potentiel aux balais et par e_2 celle aux bornes; par r_1 la résistance des bobines inductrices, on a la relation :

$$e^2 = e_1 - r_1 \times I$$

Quant à la force électro-motrice totale de la dynamo E, elle doit être telle qu'elle puisse subvenir à la somme des chutes de tension dans l'enroulement induit, dans les solénoïdes inducteurs et dans le circuit extérieur; on doit donc avoir :

$$E = r \times I + r_1 \times I + R \times I$$

Ce qui peut s'écrire plus simplement :

$$E = (r + r_1 + R) \times I$$

L'expression ci-dessus de e_2 montre que le voltage aux bornes sera d'autant plus petit, pour une résistance r_1 donnée, que I sera plus grand. Comme d'ailleurs le courant total de l'induit traverse les électros, il convient, pour diminuer la perte $(r_1 \times I)$, de réduire autant que possible la résistance r_1 des bobines magnétisantes. C'est pourquoi l'inducteur des dynamos excitées en série se reconnaît au gros diamètre des fils dont il est enroulé.

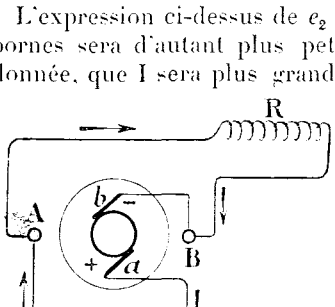


Fig. 172.— Excitation série.

On peut remarquer, en effet, que l'on obtiendra le même nombre d'ampère-tours nécessaire à l'excitation des inducteurs, soit par un courant intense traversant un petit nombre de spires à gros fils, soit par un faible courant circulant dans des spires multipliées à fil fin.

Le flux magnétique inducteur ne peut se développer, et la machine s'amorcer par conséquent, que pour une intensité suffisante du courant.

Ainsi l'amorcement ne se produira ni pour une résistance extérieure trop grande, ni à circuit ouvert, ce qui correspond à une résistance infinie du circuit extérieur.

Le principe même de l'auto-excitation montre qu'il est nécessaire, afin de pouvoir amorcer la machine, de faire tourner l'induit dans le sens convenable, qui est généralement indiqué par l'orientation des balais. Si nous admettons, en effet, que le magnétisme résiduel détermine la présence d'un pôle nord à gauche et d'un pôle sud à droite, il faudra nécessairement que la dynamo tourne de manière à lancer dans les bobines inductrices un courant capable de renforcer le magnétisme rémanent, en développant les mêmes pôles. Un courant de sens contraire intervertirait les pôles et annulerait le magnétisme résiduel d'amorcement.

La même considération fait que la dynamo-série ne convient pas pour alimenter des récepteurs doués de force contre électro-motrice, tels que les cuves électrolytiques ou les accumulateurs.

Ainsi que nous l'avons vu (§ 42), les récepteurs chimiques, les accumulateurs notamment, développent une force électro-motrice e qui se retranche de la force électro-motrice E du générateur d'électricité qui doit les alimenter, et l'on a :

$$E - e = R \times I$$

Comme au démarrage de l'induit E est nul, la force contre électro-motrice e est naturellement prépondérante et fait circuler dans la résistance R du circuit, c'est-à-dire dans la dynamo elle-même, un courant de sens contraire au courant normal; l'amorcement serait donc impossible ou plutôt le courant du récepteur électrolytique, agissant comme générateur, renverserait les pôles naturels de la dynamo, dont la force électro-motrice inversée viendrait s'ajouter en série à la force e.

Dans ces conditions, l'intensité du courant :

$$I = \frac{E + e}{R}$$

pourrait prendre une valeur dangereuse pour la conservation de la dynamo et du récepteur, sous l'action combinée des deux forces électro-motrices qui s'ajoutent.

On pourrait, toutefois, alimenter un récepteur chimique avec une dynamo série, en prenant la précaution d'amorcer la machine sur un circuit distinct de résistance appropriée, et de ne la relier au récepteur que lorsque sa force électro-motrice est supérieure à celle de ce dernier. Il convient également d'intercaler sur le circuit d'alimentation des interrupteurs ou disjoncteurs-automatiques qui interrompent toute communication entre les deux appareils, si, par suite d'un ralentissement de vitesse de la dynamo ou pour toute autre cause, la force électro-motrice du récepteur devenait prépondérante.

L'aimantation des inducteurs exige une certaine dépense d'énergie empruntée au courant excitateur employé (§ 54) ; cette aimantation acquise, le courant ne sert plus qu'à la maintenir, sans l'augmenter, et toute son énergie se transforme en chaleur dans les spires inductrices. Mais, dès que le courant excitateur est interrompu, la carcasse magnétique se désaimante, la variation de flux qui en résulte fait naître une force électro-motrice de self-induction dans le solénoïde inducteur et l'énergie électrique développée est équivalente à l'énergie magnétique ainsi restituée.

La force électro-motrice de self-induction dépend pour un même champ inducteur du nombre des spires de l'électro. Dans le cas des machines série, les spires sont peu nombreuses, aussi la force électro-motrice de self-induction est-elle relativement faible. Toutefois, il convient de ne pas couper brusquement le circuit d'une pareille machine, car l'étincelle au point de rupture pourrait prendre une intensité dangereuse, tant pour la conservation des organes de la machine que pour la sécurité de l'expé-

rimentateur soumis ainsi à une différence de potentiel fortement multipliée par la self-induction.

135. **Excitation schunt ou en dérivation.** — Ici, contrairement à la disposition précédente, l'enroulement inducteur est relié par ses deux extrémités aux bornes de la dynamo où aboutissent également les extrémités du circuit extérieur.

Le courant de l'induit, amené par les balais à ces bornes, se bifurque en deux courants dont l'un I se dépense dans le circuit d'utilisation et l'autre i_1 se dérive dans les bobines excitatrices. Les flèches du dessin (fig. 173) montrent la marche et la répartition des courants qui se fait d'ailleurs en raison inverse des résistances des deux circuits dérivés.

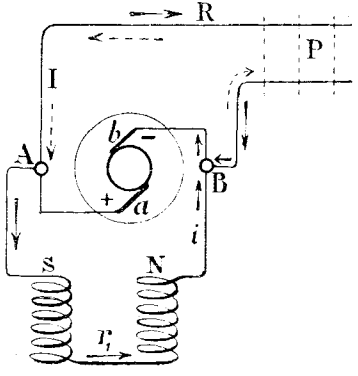


FIG. 173. — Excitation schunt.

La différence de potentiel e, aux extrémités des bobines magnétisantes, est exactement celle qui commande le circuit extérieur, puisque les extrémités des deux circuits se rattachent aux bornes communes A et B.

Si nous désignons par J le courant total de l'induit, nous aurons l'égalité :

$$J = I + i_1$$

et d'après la loi des courants dérivés :

$$\frac{i_1}{I} = \frac{R}{r_1}$$

La même loi nous donne la valeur de i_1 en fonction du courant total I de l'induit :

$$i_1 = \frac{R}{R + r_1} \times J$$

On aurait de même :

$$I = \frac{r_1}{R + r_1} \times J$$

Il est facile de voir qu'en faisant la somme $(i_1 + I)$ on retrouverait J.

Pour obtenir la valeur elle-même de J, on remarquera que les deux circuits dérivés extérieur et magnétisant peuvent être considérés comme formant un ensemble en série sur l'enroulement induit. Soit r la résistance intérieure de celui-ci ; la résistance réduite (§ 34) des deux circuits dérivés sera :

$$\frac{R \times r_1}{R + r_1}$$

Et la résistance totale de l'ensemble des deux résistances, en série qui s'ajoutent :

$$r + \frac{R \times r_1}{R + r_1}$$

Aussi le courant total sera donné par l'expression :

$$J = \frac{E}{r + \dfrac{R \times r_1}{R + r_1}}$$

Enfin l'on a toujours

$$e = E - r \times J$$

ou :

$$E = e + r \times J$$

et encore :

$$e = R \times I = r_1 \times i_1$$

Toutes ces formules sont des conséquences des lois d'Ohm et de Kirchhoff.

La dernière expression montre que, pour une différence de potentiel e donnée, i_1 sera d'autant plus petit que r_1 sera plus grand ; or, comme l'absorption d'énergie $r_1 \times i_1$ dépend en première ligne du carré de i_1, il importe de rendre ce terme aussi faible que possible et d'augmenter au contraire r_1. C'est pourquoi l'enroulement du *shunt* est constitué par un grand nombre de spires de fil fin.

La dynamo schunt ou à excitation dérivée, s'amorcera à circuit ouvert, ou à circuit fermé même sur une résis-

tance considérable. Au contraire, elle ne s'amorcerait pas en court-circuit, c'est-à-dire sur un circuit extérieur de résistance pratiquement nulle.

Si l'on coupe, en effet, le circuit extérieur au point B, par exemple, le circuit inducteur des électros reste complet et la machine fonctionne comme une dynamo série. Si, au contraire, la résistance R du circuit extérieur est nulle, tout le courant passera là et rien ne sera dérivé dans les bobines excitatrices.

Il y a lieu de remarquer, d'ailleurs, que, si le courant de l'induit fermé par le court-circuit extérieur pouvait prendre une intensité considérable, la perte de tension intérieure serait telle que la différence de potentiel aux bornes :

$$e = \mathrm{E} - r \times \mathrm{J}$$

deviendrait nulle, dès que $r \times \mathrm{J}$ atteindrait la valeur E; il ne pourrait donc passer aucun courant dans le circuit des électros et la dynamo ne s'amorcerait pas, ou cesserait d'être excitée.

Ces considérations montrent que l'on peut sans danger mettre une dynamo schunt en court-circuit, car l'intensité tombe à zéro, faute d'excitation, dès que la résistance du circuit extérieur est annulée.

Comme pour la dynamo série, l'amorcement ne sera possible que pour un sens déterminé de rotation donnant une excitation concordante avec le sens du magnétisme rémanent des électros.

La dynamo schunt se prête aisément à toutes les applications industrielles et notamment à la charge des accumulateurs et de tous autres récepteurs à force contre électro-motrice.

Il n'y a plus à craindre, dans le cas où celle-ci deviendrait prépondérante, le renversement de polarité des inducteurs; il suffit de remarquer, en effet, que, si les accumulateurs placés en P, par exemple, venaient à se décharger dans l'induit de la dynamo, le courant de décharge dirigé suivant les flèches pointillées, entrerait par la borne A et pénétrerait dans les bobines inductrices, dans le même sens que s'il venait de l'induit de la dynamo.

L'induit peut néanmoins recevoir un courant de décharge très intense et capable de détériorer les bobines de l'armature ; il conviendra donc de placer un disjoncteur sur le circuit comme dans le cas de la dynamo série. Quoi qu'il en soit, grâce à la fixité des pôles qui ne peuvent être renversés, la force électro-motrice de la dynamo reste toujours opposée à celle du récepteur et tend à réduire le courant de décharge ; elle refoule, d'ailleurs, ce dernier, dès que, par un accroissement de vitesse ou autrement, elle reprend sa valeur normale et peut surmonter la force contre électro-motrice du récepteur.

On peut couper brusquement le circuit extérieur d'une dynamo schunt sans grand dommage, puisque les bobines à self-induction de l'inducteur sont en dehors de ce circuit. Il en résultera, néanmoins, un accroissement notable du potentiel agissant dans le circuit des bobines, par suite de la réduction du courant due à l'accroissement de la résistance réduite, ensuite de la suppression de l'un des circuits dérivés. Mais la décharge en provenant passera dans le circuit fermé de l'induit et des inducteurs.

Toutefois, si l'on soulève les balais, supprimant ainsi la totalité du courant dans les électros, la tension peut prendre une valeur énorme et déterminer un flux électrique d'une intensité considérable dans les enroulements de la dynamo. Si en même temps le circuit extérieur était ouvert ne donnant ainsi aucune issue au courant en dehors de la dynamo, l'expérimentateur pourrait subir un choc des plus dangereux, en recevant la plus grande partie de la décharge.

136. Excitation compound. — Comme son nom l'indique, ce système d'excitation est composé et présente la réunion des deux dispositions précédentes. Il comprend un circuit inducteur à gros fil S en série sur le circuit extérieur, et un circuit à fil fin D en dérivation sur les pôles *a* et *b* de l'induit (fig. 179).

Le courant partant du balai positif *b* se bifurque en *c*, une fraction passe par le schunt D et l'autre alimente le circuit extérieur en traversant la bobine série S.

Ainsi cette dernière n'est pas traversée par la totalité du

courant J : c'est pourquoi cette disposition a reçu le nom d'*excitation compound en courte dérivation ;* elle est caractérisée, par ce fait, que la dérivation du schunt est prise directement aux balais, avant l'origine de la bobine série.

Si la dérivation est branchée après cette bobine, on réalise la disposition dite *à longue dérivation*. Dans celle-ci, le courant total de l'induit excite l'enroulement série.

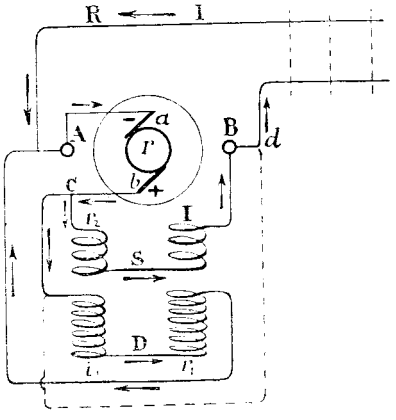


FIG. 174. — Excitation compound.

Le premier mode est le plus employé des deux montages ; leur différence, au point de vue pratique, n'a pas grande importance. On peut remarquer, toutefois, que, dans la disposition en courte dérivation, la bobine schunt produit une excitation plus indépendante, n'étant pas influencée par la chute de tension variable avec le courant qui se produit après elle, dans la bobine en série.

On réaliserait la longue dérivation en reportant la connexion *c* du circuit D en *d* suivant la ligne pointillée.

Dans le premier cas, la différence de potentiel entre les deux extrémités de la bobine schunt, sera :

$$e_1 = e + \mathrm{I} \times r_2$$

en désignant par e la différence de potentiel aux bornes A, B et r_2 la résistance de la bobine série.

Dans le second cas, on a simplement

$$e_1 = e$$

Nous aurons encore dans le premier cas :

$$e_1 = \frac{R + r_2}{R + r_2 + r_1} \times J$$

et :

$$I = \frac{r_1}{R + r_2 + r_1} \times J$$

J désignant le courant total de l'induit.

Enfin ce dernier courant J aura pour valeur :

$$J = \frac{E}{r + \dfrac{(R + r_2) \times r_1}{R + r_2 + r_1}}$$

Les machines compound présenteront, au point de vue électrique, des propriétés mixtes, procédant à la fois de celles des dynamos série et des dynamos schunt.

Enfin, l'*excitation hypercompound* ne diffère de la précédente, qu'en ce que la part d'excitation due à l'enroulement série est prépondérante et supérieure à celle due à la dérivation.

137. **Caractéristiques.** — Nous avons vu (§ 78) comment l'on construisait les courbes magnétiques donnant l'induction B ou le flux $N = B \times S$, développé dans le champ magnétisant d'un solénoïde d'intensité :

$$H = 0{,}4\,\pi \frac{N}{l} \times I = 0{,}4\,\pi\, n \times I$$

On a, d'ailleurs, la relation relative au circuit magnétique :

$$0{,}4\,\pi\, N \times I = N \times R$$

H est le champ magnétisant qui ne diffère de la force magnéto-motrice $F = 0{,}4\,\pi N \times I$ que par le facteur $\frac{N}{l} = n$.

A chaque valeur du courant I correspond une valeur déterminée de H et de F.

De même, à toute valeur de H et de F correspond un flux N dans le circuit magnétique, lequel dépend, d'ailleurs, de la reluctance R.

Cette reluctance n'est pas constante puisqu'elle varie avec l'état de saturation du fer, mais elle est connue d'après les tables de perméabilité et les dimensions des pièces qui constituent le circuit magnétique.

Si donc on porte en abcisses, sur un axe horizontal, soit les valeurs de I, soit celles de $N \times I$ ou de $0.4\pi N \times I$, on pourra tracer les ordonnées correspondantes représentant les valeurs résultantes de N, calculées d'après la relation ci-dessus : ou plutôt on calculera les trois premières quantités pour les valeurs successives attribuées à N.

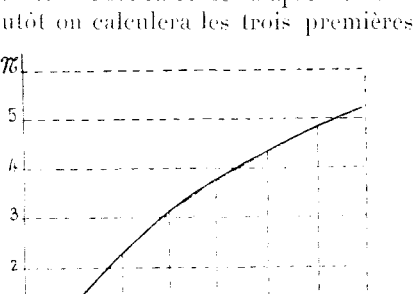


FIG. 175. — Courbes caractéristiques.

On voit que les abcisses pourront représenter indifféremment les ampères, les ampère-tours ou la force magnéto-motrice, en changeant convenablement d'échelle fig. 175).

Supposons, par exemple, que l'on ait choisi pour abcisses les ampères et que N soit égal à 100 : l'abcisse oa représentant 4 ampères à une échelle déterminée, la même abcisse représentera les ampère-tours correspondants, soit 400 ampère-tours, à une échelle 100 fois plus petite. Enfin, les abcisses de ce même diagramme représenteront également les forces magnétomotrices, soit :

$$F = 0.4\pi N \times I = 1.25 \times 100 \times I$$

à une échelle 125 fois plus petite.

Ces courbes s'appliquent évidemment au circuit magnétique d'une dynamo, dans lequel N représenterait le flux à l'intérieur de l'armature, et I le courant d'excitation des inducteurs.

Il faut toutefois remarquer que dans le cas de la dynamo, une partie du circuit magnétique, l'armature, est mobile ; et cette circonstance crée dans le fer du noyau un état magnétique variable, qui détermine des phénomènes d'hystérésis et des courants de Foucault qui tendent à modifier le flux dans le circuit magnétique.

Ces circonstances peuvent donc influer sur la courbe du flux, mais on peut relever cette même courbe sur la machine en mouvement, c'est-à-dire déterminer expérimentalement la grandeur du flux N pour chaque valeur de I, pendant que la dynamo tourne à une vitesse constante.

Quoi qu'il en soit, la courbe ainsi tracée s'applique uniquement à un circuit magnétique soumis au seul champ magnétisant H des inducteurs. On admet donc implicitement que l'induit n'est le siège d'aucun courant, autrement dit que tout se passe à circuit ouvert.

Si le circuit de l'induit était fermé en effet, son courant développerait lui-même un champ magnétique antagoniste qui se superpose au champ inducteur principal et dont l'effet constitue justement ce qu'on appelle la réaction d'induit.

On pourrait donc désigner les courbes tracées comme nous l'avons spécifié ci-dessus, sous le nom de *courbe magnétique à circuit ouvert* ou à courant nul de l'induit.

Rappelons maintenant que la force électro-motrice de la dynamo a pour expression :

$$E = \frac{n \times N}{10^8} \times N$$

Ce qui montre que E n'est pas autre chose que le flux N multiplié par la quantité constante $\frac{n\,N}{10^8}$. Il s'ensuit que la courbe précédente pourra représenter également les variations de la force électro-motrice correspondant à celles du courant d'excitation des inducteurs, en changeant l'échelle des ordonnées.

Si, d'autre part, le courant d'excitation est le même que

celui de l'induit, nous obtiendrons ainsi la courbe des variations des forces électro-motrices en fonction des variations de l'intensité du courant : une pareille courbe prend le nom de *caractéristique*.

1° *Machine excitée en série.* — Les conditions spécifiées sont réalisées dans la dynamo série, dont le courant d'induit est égal au courant d'excitation. Aussi la caractéristique à circuit ouvert d'une pareille machine sera tout à fait semblable à la courbe de magnétisme définie plus haut. Dans ce cas, les inducteurs sont excités nécessairement par un courant extérieur, soit en excitation indépendante.

Il n'est pas nécessaire d'ailleurs de passer par la courbe magnétique, et l'on peut relever directement la caractéristique à circuit ouvert, en fonction de la force électromotrice et de l'intensité du courant d'excitation.

Il y a lieu de remarquer encore que la courbe du magnétisme est indépendante de la vitesse de rotation de l'induit, abstraction faite des phénomènes d'hystérésis et de Foucault qui, d'ailleurs, n'ont pas une influence bien notable. Il n'en est pas de même de la force électromotrice, qui dépend essentiellement du nombre de tours N. Il y aura donc pour chaque vitesse de rotation une courbe caractéristique à circuit ouvert. La même courbe toutefois pourra représenter les caractéristiques à n'importe quelle vitesse, en faisant varier proportionnellement l'échelle du diagramme.

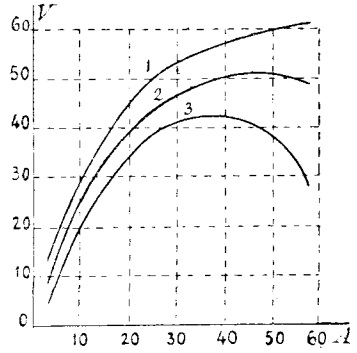


FIG. 176. — Caractéristique d'une machine série.

La courbe (1) (fig. 176) est une *caractéristique à circuit ouvert*. La première partie, presque recti-

ligne, correspond à la période initiale où le circuit magnétique n'est pas encore saturé ; l'augmentation de l'induction est alors à peu près proportionnelle à celle du courant d'excitation ; puis la courbe fait un coude et s'élève moins rapidement par suite de l'influence de la saturation, le flux augmentant dès lors moins rapidement que l'excitation.

Cette courbe donnera donc des renseignements précieux sur la construction de la carcasse magnétique, en indiquant les défectuosités, qui se manifesteraient par des irrégularités et des abaissements excessifs de la caractéristique, dans la région du fonctionnement normal de la dynamo. On pourra ainsi apporter les modifications et améliorations reconnues nécessaires dans les dimensions longitudinales et transversales des diverses parties du circuit magnétique.

La courbe (3) constitue la *caractéristique externe*, qui donne la différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur, en fonction du courant total. Pour tracer cette courbe, la machine tournant à une vitesse déterminée, on fera varier le courant à l'aide de rhéostats, ou résistances réglables, intercalés dans le circuit, et on relèvera à l'aide d'un volt-mètre la différence de potentiel aux bornes, pour chaque valeur de I mesurée à l'ampèremètre.

On voit que la caractéristique externe atteint un maximum, pour s'infléchir ensuite vers l'axe des abcisses. Les différences entre les ordonnées des courbes (1) et (3) représentent les chutes de potentiel en volts dues aux résistances des enroulements induits et inducteurs, d'une part ; à la réaction d'induit, d'autre part.

Cette inflexion de la courbe provient de ce que les chutes de potentiel dues à ces deux causes vont en croissant au fur et à mesure de l'augmentation du courant, tandis que, par suite de la saturation, l'induction magnétique augmente moins rapidement que l'excitation.

Représentation géométrique de la résistance. — La relation $e = R \times I$ entre la différence de potentiel aux bornes, le

courant et la résistance R du circuit extérieur, peut encore s'écrire :

$$R = \frac{e}{I}$$

Prenons sur l'axe des I (fig. 177) une longueur oc représentant à l'échelle choisie 1 ampère; élevons l'ordonnée cv, divisée en longueurs figuratives d'un volt. Soit maintenant le vecteur ob ou droite joignant le point o au point b de la caractéristique ; soit i le point d'intersection sur l'ordonnée cv.

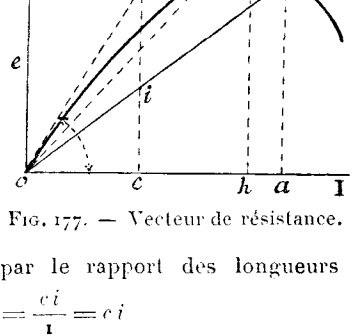


FIG. 177. — Vecteur de résistance.

L'inclinaison ou la pente du vecteur sur l'horizontale est donnée par le rapport des longueurs :

$$\frac{ci}{oc} = \frac{ci}{1} = ci$$

Maintenant, les deux triangles semblables bao, ico donnent la relation :

$$\frac{ci}{1} = \frac{ba}{oa} = \frac{e}{I} = R$$

Par suite, le nombre de divisions intercepté sur ci par le vecteur ob, représente la résistance correspondant aux valeurs choisies de e et I.

Le rapport des longueurs $\frac{ba}{oa}$ représenterait également la résistance, si l'on avait adopté la même échelle pour les volts et les ampères, mais s'il en est autrement, ce rapport serait différent de $\frac{e}{I}$ et il faudra faire la construction indiquée pour trouver la résistance ci, qui n'est autre que la pente ou l'inclinaison du vecteur.

Si cette inclinaison augmente, la résistance extérieure s'accroît en même temps, et il arrive un moment pour lequel le vecteur est tangent à l'origine; à ce moment, le point b se confond avec l'origine o et le point i est venu en m. La résis-

tance extérieure est alors représentée par cm, mais les ordonnées correspondantes sur la courbe sont nulles, et il n'y a plus ni courant, ni force électro-motrice; la machine est dite *désamorcée*.

Cette valeur particulière de la résistance s'appelle la *résistance critique*. La machine ne peut s'amorcer que pour une résistance inférieure, ou pour un vecteur situé en dessous de la tangente. Mais même pour une position telle que od voisine de om, la machine fonctionnerait d'une manière très instable, car pour une faible oscillation de la vitesse, élevant ou abaissant la courbe, de même que pour une faible variation de la résistance extérieure, l'intensité et la force électromotrice présenteraient des variations inadmissibles en pratique.

Au contraire, pour une position du vecteur, telle que ob, voisine du sommet de la caractéristique, à de grandes variations de vitesse ou de résistance ne correspondraient que de légères modifications des constantes du courant, et la machine présentera la *stabilité de fonctionnement* voulue. C'est donc dans cette région de la courbe, c'est-à-dire dans les conditions de résistance et d'intensité correspondantes que l'on devra faire fonctionner la dynamo.

Les machines excitées en série, sont généralement consacrées à l'alimentation de récepteurs également en série, tels que les lampes à arc. Or, une pareille distribution comporte des variations considérables, soit ordinaires, soit accidentelles, dans la résistance des circuits extérieurs. Une diminution notable de cette résistance pourrait déterminer la production d'un courant dangereux, mais on voit qu'à partir d'une certaine intensité oh, correspondant au sommet k de la courbe, celle-ci plonge rapidement vers l'axe des abcisses, et la diminution de force électromotrice qui en résulte tend à réduire et limiter l'intensité du courant.

Cette circonstance est donc plutôt favorable, en ce qu'elle produit une sorte de régulation automatique de l'intensité, malgré les variations très étendues de la résistance extérieure; et c'est une raison de plus pour faire fonctionner la dynamo dans la région du coude de la caractéristique.

Considérons maintenant la courbe intermédiaire n° 2, (fig. 176). C'est la *caractéristique totale*, dont les ordonnées représentent le potentiel total ou force électro-motrice de la dynamo, et les abcisses le courant I.

On peut établir cette courbe, en utilisant l'expression

$$E = \frac{n \times N \times N}{10^8}$$

si l'on connait le flux N afférent à l'excitation donnée par les diverses valeurs de I ; mais on peut la déduire directement de la courbe précédente, en ajoutant la chute de potentiel $I \times (r + r_1)$ dans l'induit et l'inducteur, c'est-à-dire en augmentant chaque ordonnée de la longueur correspondante.

La différence des ordonnées entre cette caractéristique et la courbe n° 1 à circuit ouvert, représente la chute de potentiel due à la réaction d'induit, tandis que la différence entre les courbes extrêmes (1) et (3) comprend la chute totale jusqu'aux bornes de la dynamo.

Les points où les vecteurs menés par l'origine coupent la caractéristique totale, déterminent la résistance totale du circuit, puisque l'on a :

$$I = \frac{E}{r + r_1 + R} = \frac{E}{R_t}$$

C'est donc ici la résistance totale qui est en jeu.

La résistance critique correspond au vecteur tangent à l'origine. Celui-ci diffère nécessairement du vecteur tangent à la caractéristique externe. On admettra donc que la résistance critique totale comprend une résistance extérieure qui correspond à la tangente à la caractéristique externe, car ces deux résistances diffèrent entre elles de $(r + r_1)$.

En réalité, par suite du magnétisme rémanent, la caractéristique coupe l'axe des volts au-dessus de l'origine ; c'est-à-dire que la dynamo produit une certaine force électro-motrice sans aucune excitation, et si ce magnétisme est suffisant, la machine s'amorcera pour une valeur quelconque de la résistance extérieure.

Machines excitées en dérivation. — Pour étudier comme il convient les caractéristiques des dynamos en dérivation, il faudra bien remarquer que le courant inducteur est ici différent du courant induit et du courant extérieur ; on a, entre ces trois courants, la relation :

$$i = i_1 + i_2$$

Si le circuit extérieur est ouvert, il ne passe aucun courant dans ledit circuit et l'on a simplement

$$i = i_1$$

Ce courant étant toujours très faible, vu la grande résistance du schunt d'excitation, on peut négliger la réaction d'induit et considérer la courbe (1) obtenue en fonction de E et de $i = i_1$ comme représentant, avec une exactitude suffisante, la caractéristique à courant nul. Rien n'empêche d'ailleurs de relever la courbe, sans aucun courant induit, en excitant les électros par une source extérieure.

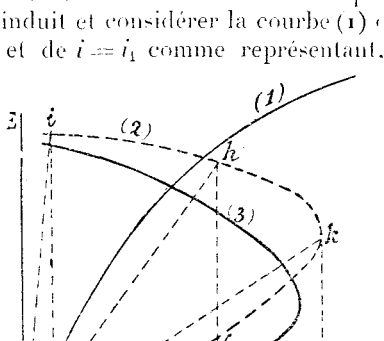


Fig. 178. — Caractéristique d'une machine schunt.

On obtiendra ainsi une courbe dont l'allure sera analogue à celle de la dynamo en série, puisque, dans le cas de l'auto-excitation notamment, le circuit extérieur étant coupé, l'inducteur et l'induit sont en série sur un seul et unique circuit.

La caractéristique totale donnera la force électro-motrice en fonction du courant total induit. Supposons d'abord un courant très petit (fig. 178) tel que oa, correspondant à une résistance totale très grande donnée par un vecteur voisin de la verticale tel que oi ; alors le courant passera presque

en totalité dans le schunt excitateur et la dynamo fonctionnera, pour ainsi dire, comme à circuit ouvert ; la force électro-motrice pourra donc atteindre, du premier coup, la valeur voisine de celle qui serait donnée à circuit ouvert, à la vitesse de rotation admise.

Puis au fur et à mesure que la pente du vecteur diminue, c'est-à-dire que la résistance totale décroît, le courant augmente et se partage entre le circuit extérieur et le circuit inducteur ; mais il n'augmente pas dans celui-ci de façon à compenser par un accroissement d'excitation suffisant, les pertes dues à la réaction d'induit et à la chute de potentiel dans le circuit de l'armature, de sorte que la courbe s'infléchit vers l'axe des abcisses.

Pour une certaine valeur de $i = o\,m$, la résistance donnée par le vecteur $o\,k$ est telle que le courant d'excitation diminue plus rapidement et entraine la réduction du courant total ; la courbe redescend par suite en se dirigeant vers l'origine.

On approche donc de la résistance critique qui se produit lorsque le vecteur devient tangent à la branche inférieure de la courbe ; *la dynamo est alors désamorcée.*

Ainsi la dynamo en dérivation ne s'amorce pas pour une valeur trop faible de la résistance totale et notamment de la résistance extérieure, car alors tout le courant passe en dehors de l'inducteur et l'excitation devient nulle. Il en résulte que l'on peut mettre sans inconvénient, en court-circuit, les bornes d'une machine schunt.

Si nous considérons un courant tel que $o\,d$, à ce courant correspondent deux ordonnées $d\,f$ et $d\,h$, ces deux forces électro-motrices dépendent de la résistance sur laquelle on fait fonctionner la machine : au vecteur $o\,h$ correspond la force électro-motrice $d\,h$; au vecteur $o\,f$ la force électro-motrice $d\,f$.

Dans le premier cas on obtiendra les meilleures conditions possibles, car non seulement la puissance fournie sera supérieure, mais encore la stabilité sera assurée ; il n'en sera pas de même dans le second cas, où la machine travaillant sur la résistance critique, aura un fonctionne-

ment très instable et se désamorcera pour la moindre oscillation de la résistance.

On voit également, à l'inspection de la caractéristique qu'il convient d'adopter un vecteur de résistance situé au-dessus du vecteur d'intensité maximum, celui-ci étant toujours très voisin du vecteur à résistance critique.

La courbe (3) représente la caractéristique extérieure, qui est construite en fonction de la différence de potentiel aux bornes et de l'intensité du courant extérieur :

$$i_2 = i - i_1$$

Cette courbe a la même allure que la précédente, et elle peut d'ailleurs s'en déduire, en prenant pour abcisses les différences des courants simultanés de l'induit et de l'inducteur, et pour ordonnées les valeurs de la force électromotrice correspondante diminuée de la chute de potentiel simultanée dans l'induit :

$$V = r \times i$$

On l'obtiendra, d'ailleurs, directement, en relevant sur la dynamo, fonctionnant à auto-excitation, les valeurs concourantes de la différence de potentiel aux bornes, et du courant extérieur. Les vecteurs représenteront pour cette caractéristique les résistances extérieures, et le vecteur tangent, en particulier, la résistance critique extérieure.

Si la réaction d'induit et surtout si la résistance de l'enroulement de l'armature sont de faible valeur, la branche des caractéristiques (2) et (3) qui se rapporte au fonctionnement pratique de la dynamo, différera peu d'une droite et sera peu inclinée sur l'horizontale : il en résultera que la différence de potentiel sera sensiblement constante, dans des limites de variations assez étendues de l'intensité du courant.

La dynamo schunt serait donc jusqu'à un certain point auto-régulatrice au point de vue du potentiel, ou à potentiel constant, mais seulement dans les conditions particulières ci-dessus spécifiées.

138. **Détermination des deux enroulements d'une dynamo compound.** — Les dynamos à enroulement compound permettent de *résoudre plus efficacement* le problème de l'autorégulation, soit à potentiel, soit à courant constant.

Examinons d'abord la régulation à potentiel constant.

Les courbes étudiées précédemment permettent de déterminer aisément les conditions des enroulements en série et en dérivation. Disons tout de suite qu'il ne s'agit pas d'obtenir une différence de tension constante aux bornes de la dynamo pour tous les régimes de courants possibles. On se contente d'établir l'enroulement en dérivation pour donner la force électro-motrice voulue, en fonctionnement à vide, et l'enroulement en série pour *fournir à pleine charge* le supplément d'excitation nécessaire en vue de compenser les chutes de tension dans le circuit induit et le circuit inducteur lui-même, d'une part, et la réaction d'induit d'autre part.

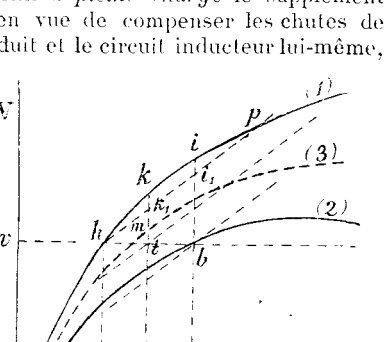


Fig. 179. — Détermination des enroulements compound.

Reproduisons ci-contre les caractéristiques à circuit ouvert et extérieur de la figure 176, avec cette condition que les abcisses représentent les ampère-tours d'excitation et les ordonnées, les différences de potentiel aux balais (fig. 179).

Ces courbes pourront être relevées sur la machine même, en plaçant sur les inducteurs des bobines provisoires et en faisant varier l'excitation, d'abord à circuit ouvert pour la courbe (1), puis à circuit fermé, l'induit débitant le courant maximum, pour la courbe (2).

Soit, par exemple, ov, la différence de potentiel imposée ; cette tension correspond aux ampère-tours oa pour la caractéristique (2) et aux ampère-tours oc pour la caractéristique (1).

La différence de potentiel ab, correspond à la force électromotrice ai en circuit ouvert et, bi représente la perte de tension en pleine marche, du fait de la réaction d'induit et des chutes de tension dans les résistances de l'induit et de l'enroulement série. De même, ca correspond au nombre d'ampère-tours supplémentaires utiles pour la compensation de cette perte.

Si donc nous constituons un enroulement en dérivation comprenant $oc = N_1 \times i_1$ ampère-tours, ce schunt fournira une excitation qui, d'une part, donnera à circuit ouvert la tension voulue, et, d'autre part, conservera la même valeur à tous les régimes de courant, puisque les choses doivent être disposées de façon à maintenir aux bornes la différence de potentiel constante.

Maintenant, pour que cette tension reste effectivement la même au régime de courant maximum, il faut un nombre d'ampère-tours supplémentaire égal à $ca = N_2 \times i_2$; mais l'excitation du schunt est invariable, nous demanderons donc ce complément d'excitation à une bobine inductrice en série; les deux enroulements sont ainsi déterminés.

En définitive, la somme des ampère-tours, série et schunt, à pleine charge, devra être égale à :

$$oa = N_1 \times i_1 + N_2 \times i_2 = M \times i$$

Ce nombre total d'ampère-tours $M \times i$ est justement celui qui est nécessaire pour faire passer un flux N dans l'armature, capable de produire la force électro-motrice totale ai à pleine charge. Cette force électro-motrice comprend, outre la différence de potentiel voulue aux bornes, les chutes de tension dans l'induit et dans l'inducteur en série. Le flux N est déterminé par la relation :

$$E = \frac{n \times N \times N}{10^8}$$

Connaissant N, on déterminera le nombre d'ampère-tours correspondant $M \times i$, en observant qu'il faut tenir compte des ampère-tours antagonistes de l'induit qui se retranchent de l'excitation des inducteurs; ces ampère-tours ont pour expression (§ 117) :

$$0{,}4\,\pi \times \frac{n \times k}{\pi} \times \frac{I}{2}$$

de sorte que la formule des ampère-tours deviendra, en sup-

posant que le flux N soit constant dans tout le circuit magnétique :

$$0{,}4\,\pi\,\mathrm{M}\times i - 0{,}4\,\pi\times n\times\frac{\mathrm{K}}{\pi}\times\frac{\mathrm{I}}{2} = 0{,}4\,\pi \times\left(\mathrm{M}\times i - n\times\frac{\mathrm{K}}{\pi}\times\frac{\mathrm{I}}{2}\right)$$

et l'on pourra écrire :

$$0{,}4\,\pi\times\left(\mathrm{M}\times i - n\times\frac{\mathrm{K}}{\pi}\times\frac{\mathrm{I}}{2}\right) = N\times R$$

R étant la reluctance connue du circuit magnétique. Cette formule nous permet de déterminer par le calcul le nombre d'ampères-tours total nécessaire $\mathrm{M}\times i$.

D'autre part, nous pouvons évaluer directement les ampères-tours de l'excitation en dérivation, qui doivent fournir la différence de potentiel convenue, à circuit ouvert; celle-ci a pour expression :

$$e' = n\times\mathrm{N}\times N_1$$

Le flux est différent de N puisque e' est inférieur à E; de même la reluctance R_1 sera différente de R, l'induction dans le circuit étant moindre; enfin, il n'y aura plus de flux antagoniste d'induit et l'on pourra écrire :

$$0{,}4\,\pi\times\mathrm{N}_1\times i_1 = N_1\times R_1$$

Ce qui, étant connu N_1 par l'égalité précédente, permet de calculer $\mathrm{N}_1 i_1$; on en déduira par suite, le nombre d'ampères-tours en série :

$$\mathrm{N}_2\times i_2 = \mathrm{M}\times i - \mathrm{N}_1\times i_1$$

Le courant $i_2 = \mathrm{I} - i_1$ ou simplement I suivant qu'il s'agit d'un enroulement compound en courte ou longue dérivation; le nombre des spires de la bobine en série sera donc :

$$\mathrm{N}_2 = \frac{\mathrm{M}\times i - \mathrm{N}_1\times i_1}{i_2}$$

Cette méthode de calcul permet de déterminer les enroulements *a priori*, mais la première, dite graphique, qui est basée sur l'emploi des caractéristiques relevées directement sur la machine, donne des résultats plus exacts.

On voit, en se reportant aux courbes susdites, que le potentiel voulu ne se réalise qu'à charge nulle et à pleine charge, tandis que dans l'intervalle les variations ne sont pas exactement compensées.

Représentons en effet la caractéristique à demi-charge en traits pointillés; cette courbe se rapprochera plutôt de la caractéristique à circuit ouvert que de celle à pleine charge, car la réaction d'induit non seulement est moindre, mais détermine encore une moins grande perte de flux par dérivation magnétique, de telle sorte que, pour une même tension, il faut relativement moins d'ampère-tours.

Supposons que l'enroulement compound ait été calculé pour la machine fonctionnant dans la partie coudée de la courbe (1); le nombre total d'ampères-tours donnant la force électro-motrice en pleine charge est $o\,a$, correspondant au point b; mais pour la demi-charge, l'excitation supplémentaire sera $\frac{c\,a}{2} = c\,d$, tandis que la tension aux bornes sera $d\,m$, supérieure de $t\,m$ à la différence de potentiel imposée.

Si la force électro-motrice croissait proportionnellement aux ampère-tours série à partir de h, par exemple, la courbe (1) prendrait l'allure d'une droite telle que $h\,p$, pour laquelle les ordonnées seraient proportionnelles aux abcisses; de même si les pertes de potentiel étaient exactement proportionnelles au courant de l'armature, égal au courant inducteur ou peu différent de celui-ci, la chute étant $b\,i_1$ à pleine charge, ne serait plus que la moitié ou $t\,k_1$ à demi-charge, de telle sorte que t milieu de $h\,b$ serait le point de passage de la courbe (3); les courbes (2) et (3) prendraient d'ailleurs l'allure de droites parallèles à $h\,p$.

Dans ces conditions, la compensation se ferait exactement pour tous les régimes de charge. On se rapprochera de cette régulation complète en faisant fonctionner la machine dans la partie supérieure de la courbe, telle que Kp, qui se rapproche le plus d'une droite et en choisissant d'ailleurs une carcasse magnétique donnant une caractéristique dont la branche supérieure soit le plus rectifiée possible.

Puisque l'enroulement est déterminé à l'aide de caractéristiques tracées pour une vitesse donnée, il est évident que la régulation ne se fera plus exactement pour des vitesses différentes.

D'autre part, l'enroulement inducteur étant calculé pour régler à chaud, donnera à vide une différence de potentiel trop élevée, et, d'une manière générale, toute variation de température occasionnera une perturbation dans le réglage.

Aussi prend-on la précaution de munir les dynamos

compound d'un rhéostat inséré dans le circuit inducteur en dérivation, pour parfaire la régulation et compenser les écarts dus aux variations accidentelles de vitesse et aux différences de température.

Dynamo hypercompoundée. — Les machines compound réalisent dans les limites indiquées l'auto-régulation du potentiel, aux bornes du circuit extérieur. Toutefois, il y a lieu de remarquer qu'en pratique, ce qu'il importe de maintenir constant, ce n'est pas tant cette différence de potentiel au départ du circuit, mais bien en deux points plus ou moins éloignés de la région occupée par les récepteurs électriques.

Si la résistance du circuit extérieur entre les bornes de la machine et les deux points considérés est égale à R, la chute de potentiel dans l'intervalle sera égale à $R \times I$, et par conséquent proportionnelle à l'intensité du courant ou à la charge de la distribution.

Ainsi, au lieu de maintenir la différence de potentiel constante aux bornes, faut-il au contraire la faire croître avec le courant.

Les dynamos qui remplissent ces conditions sont dites *hypercompound*. On obtiendra le résultat cherché, en calculant le nombre total d'ampère-tours, pour la force électromotrice normale augmentée de la perte de tension sur la ligne de transport.

Supposons, pour fixer les idées, que la différence de potentiel à maintenir au point d'utilisation soit de 100 volts, et que la perte sur la ligne intermédiaire soit égale à 5 volts. On prendra sur la caractéristique à pleine charge l'ordonnée correspondant à 105 volts, ce qui déterminera le nombre d'ampère-tours total; on lira en même temps sur la caractéristique à circuit ouvert la force électro-motrice E correspondante.

Celle-ci, qui figure d'ailleurs dans l'une des formules ci-dessus, sera égale à 105 augmenté de la somme des chutes de tension dans l'induit et l'inducteur, soit 111 par exemple, d'où l'on aurait :

$$E = 111 = \frac{n \times N \times N}{10^8}$$

L'enroulement en dérivation sera donné par la courbe en circuit ouvert, pour la tension de 100 volts, que la bobine schunt doit fournir à charge nulle.

Il y a lieu de remarquer toutefois, qu'à pleine charge, régime pour lequel la bobine en série doit être calculée, la

différence de potentiel aux bornes de la bobine schunt sera de 107 volts par exemple, si la chute de tension est de 2 volts dans la série, intercalée après le schunt dans le circuit extérieur.

Le courant et par suite les ampères-tours du schunt augmenteront proportionnellement et nous aurons, si $N_1 I_1$ est le nombre d'ampères-tours à vide, c'est-à-dire pour 100 volts :

$$N_1 I_p = N_1 I_1 \times \frac{107}{100}$$

I_p étant le courant excitateur du schunt pour la différence de potentiel à pleine charge, $N_1 I_p$ sera donc aussi augmenté de 7 pour 100 et le nombre d'ampères-tours en série :

$$N_2 \times I_2 = M \times I - N_1 I_p$$

en sera diminué d'autant.

En définitive, on voit que l'hypercompoundage s'obtient en augmentant le nombre total d'ampère-tours et spécialement le nombre de tours de l'enroulement série, puisque, pour un même courant, on doit avoir une force électro-motrice et une différence de tension aux bornes, plus élevées que dans le simple compoundage.

Il y aura lieu de tenir compte aussi, dans un calcul plus rigoureux, des variations de vitesse de la machine; à pleine charge, en effet, le moteur qui actionne la dynamo, peut se ralentir. C'est à cette vitesse réduite qu'il faudra établir les caractéristiques donnant l'enroulement total. C'est également le nombre de tours N correspondant que l'on portera dans la formule de E, tandis que dans la formule de e' devra figurer le *nombre de tours maximum, sans charge*.

On pourrait également combiner les enroulements schunt et série, en vue de maintenir le courant constant au lieu du potentiel. Les enroulements schunt et en série devraient remplir les mêmes conditions que précédemment, mais les spires en série seraient disposées de manière à réduire l'excitation à mesure que le courant tend à augmenter.

Toutefois, cette régulation automatique ne peut être réalisée que dans des limites très restreintes et elle n'est pas utilisée dans la pratique. On a plutôt recours à l'un des procédés que nous avons indiqués, à propos des dynamos à circuit ouvert et à courant constant.

Les machines compound présentent surtout des avantages dans les cas où le débit du courant est susceptible de varier

brusquement dans de grandes proportions, notamment quand il s'agit de la traction électrique des tramways: le potentiel sur la ligne alors est moins influencé et varie dans des limites beaucoup plus restreintes.

Il ne faut pas oublier toutefois que la régulation n'est jamais absolue, et que l'enroulement compound ou hypercompound n'est efficace que dans les conditions particulières de vitesse angulaire et de charge, pour lesquelles cet enroulement a été calculé.

139. **Régulation.** — Le compoundage, comme il résulte du paragraphe précédent, constitue un moyen de maintenir constant, soit aux bornes de la dynamo, soit entre deux points quelconques du circuit d'utilisation, la différence de potentiel nécessaire à la distribution. Mais, outre que ce moyen n'est pas parfait, il entraîne quelque complication et une plus-value dans la construction de la machine. On a donc recours à d'autres procédés, soit pour compléter l'action du compoundage, soit pour le remplacer complètement.

Pour bien se rendre compte de l'utilité et du but de la régulation des dynamos, il faut remarquer que les appareils récepteurs, lampes ou autres utilisateurs de l'énergie électrique, peuvent être disposés, comme les générateurs d'électricité, soit en dérivation, soit en série.

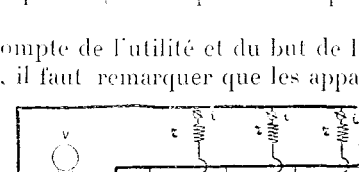


Fig. 180. — Montage de lampes à arc en dérivation.

Quelle que soit la disposition adoptée, il est évident que, dans tous les cas, la distribution devra être telle qu'elle assure à chaque appareil l'énergie nécessaire à son fonctionnement.

Dans le cas de la distribution en dérivation (fig. 180), le courant qui alimente les diverses lampes passe à travers leur résistance en vertu de la différence de potentiel existant entre les conducteurs où se rattachent direc-

tement les bornes de ces lampes ; en d'autres termes les pôles desdites se confondent avec les différents points des conducteurs, et si l'on admet que la perte de tension est négligeable sur tout le parcours occupé par les lampes, les bornes de chacune des lampes seront soumises à la même différence de tension, et cela quel que soit le nombre plus ou moins grand des récepteurs.

Si donc on maintient une différence de potentiel constante à l'origine, les lampes elles-mêmes seront soumises à une tension constante e, de telle sorte que chacune recevra le courant qui lui convient :

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

et en même temps l'énergie voulue :

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

puisque, par hypothèse, R, E et E^2 seront constants, malgré les variations du courant total.

Celui-ci au contraire variera suivant le nombre des lampes, de telle sorte que la distribution sera en réalité à *potentiel constant* et à *intensité variable*.

Si la résistance des conducteurs entre la dynamo et les lampes est faible, et la perte de tension négligeable sur ces lignes de transport, la différence de potentiel aux bornes de la machine sera peu différente de celle des points de connexion de la première lampe ; la différence pourra être notable au contraire, si la résistance de ces conducteurs est grande, ou si le courant les traversant est très intense.

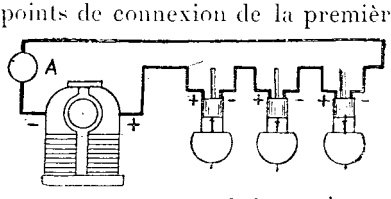


Fig. 181. — Montage de lampes à arc en tension.

Dans le premier cas, il suffira de maintenir constante la différence de potentiel aux bornes de la dynamo ; dans le second cas, la constance du potentiel devra être maintenue aux points mêmes où se branche la première lampe.

Le second schéma (fig. 181) représente des lampes à arc disposées en série : les conditions de fonctionnement de l'appareil récepteur sont toujours les mêmes, il faut qu'entre les bornes de chaque lampe existe une différence de potentiel suffisante pour vaincre la résistance que l'appareil oppose au passage du courant exigé.

Mais ici il n'y a que les bornes extrêmes de la première et de la dernière lampe qui soient reliées aux conducteurs de la dynamo et qui participent aux potentiels de ces conducteurs ; la chute totale entre les points *a* et *m* de chacun de ces conducteurs, se répartit en chutes partielles dans les différents appareils, et si nous désignons par E la différence de potentiel totale entre les deux conducteurs, par *e* la différence de potentiel entre les bornes de chaque appareil, on devra avoir nécessairement pour *n* lampes en série :

$$E = n \times e$$

La différence de potentiel totale E devra donc varier proportionnellement au nombre des appareils, tandis que le courant sera le même dans toutes les parties du circuit unique et, par conséquent, dans chaque lampe, quel qu'en soit le nombre.

Si la résistance de la ligne de transport P *a* et Q *m* donne lieu à une perte de tension, entre la dynamo et les lampes, égale à e_1, on devra augmenter d'autant la différence de potentiel aux bornes P, Q de la dynamo et avoir :

$$E = e + n \times e$$

La distribution en série est donc à potentiel variable et à intensité constante.

Ainsi, suivant qu'il s'agira de distribution en dérivation ou en série, il faudra maintenir la différence de potentiel ou l'intensité du courant constantes.

Dans les divers procédés de régulation, il faut distinguer ceux qui s'appliquent aux machines en dérivation ou schunt et aux machines en série.

140. **Régulation des machines schunt.** — Soit d'abord à maintenir constante la différence de potentiel aux bornes de la dynamo.

Le moyen le plus généralement employé consiste à intercaler dans le circuit du système inducteur un *rhéostat* ou résistance réglable, de manière à faire varier, comme il convient, le courant d'excitation.

Si la résistance du circuit extérieur augmente, le courant diminue, la chute de tension intérieure diminue en même temps, la différence de tension disponible aux bornes de la dynamo augmente : il faut alors réduire l'excitation et pour cela augmenter la résistance auxiliaire.

Il faudra faire le contraire si la résistance du circuit extérieur diminue.

En résumé, la résistance du rhéostat introduite dans le circuit inducteur devra varier en plus ou en moins, dans le même sens que la résistance extérieure.

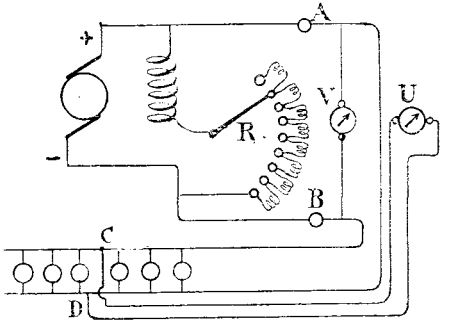


Fig. 182. — Régulation des machines schunt.

Un voltmètre V placé en dérivation aux bornes A et B de la dynamo indiquera à chaque instant à l'électricien le voltage obtenu fig. 182.

Si la tension doit être maintenue constante aux centres C et D de la distribution, des *fils pilotes*, reliés en ces points, viendront apporter à l'usine les indications de l'état électrique de cette région, qui seront manifestées par le voltmètre U placé dans l'usine. On manœuvrera donc le rhéostat R de manière à maintenir en position immuable l'aiguille de ce voltmètre.

Au lieu d'agir à la main sur le régulateur R, on peut l'actionner automatiquement par l'effet même de la variation de potentiel aux points où l'on veut maintenir la différence de tension constante.

Régulateurs automatiques. — Un grand nombre de dis-

positions ont été imaginées à cet effet, nous exposerons seulement le principe du RÉGULATEUR THURY qui est l'un des mieux combinés et des plus pratiques (fig. 183).

Il se compose d'un solénoïde S dont les extrémités sont reliées aux points A, B, les bornes de la dynamo par exemple, où l'on veut maintenir la tension constante :

D'un relai constitué par deux électro-aimants M_1, M_2 en dérivation double sur l'un des pôles du circuit en d et

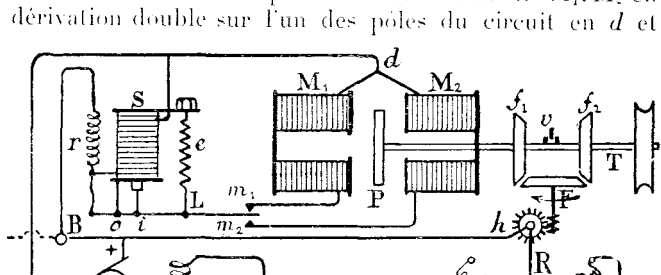


FIG. 183. — Régulateur Thury.

dont les autres extrémités aboutissent à des contacts, m_1 m_2, entre lesquels peut osciller un levier L pivoté en o et commandé en i par le noyau de fer doux qui pénètre à l'intérieur du solénoïde :

D'un mécanisme comprenant un axe T qui porte, d'une part, deux galets de friction coniques et calés sur l'arbre en sens inverse l'un de l'autre f_1 et f_2 ; d'autre part, une poulie entraînée par une petite courroie et à l'autre extrémité un disque de fer doux P, placé entre les pôles des deux électro-aimants :

D'un rhéostat R dont la manette est fixée sur un arbre horizontal h, muni d'un pignon qui engrène avec une vis sans fin terminant l'axe de la roue F.

Etant donné que l'axe T est constamment maintenu en rotation par le moteur de l'usine, voici comment fonctionne ce système.

Supposons que la différence de tension vienne à diminuer entre les points A et B, reliés directement aux extrémités *a* et *b* du solénoïde S : le courant d'excitation du solénoïde diminuera, et le poids du noyau devenant prépondérant, l'emportera sur la tension du ressort *e* ; le levier L viendra en contact avec le contact m_2 fermant ainsi le circuit de l'électro M_2.

Ce dernier attirera donc le plateau, l'arbre T reculera et le cône de friction f_1 viendra en contact avec la roue F ; il lui imprimera un sens de rotation tel que la manette du rhéostat soit portée sur la droite, pour supprimer des résistances et augmenter le courant excitateur de la dynamo.

Lorsque la différence de potentiel a repris sa valeur normale, l'arbre T est ramené dans sa position intermédiaire par le ressort *r*.

Au cas où la différence de potentiel augmenterait, c'est l'action du ressort *e* aidée par l'attraction du solénoïde qui l'emporterait et déterminerait la fermeture du circuit de l'électro M_1 ; le cône f_2 viendrait en prise avec F et lui imprimerait un mouvement inverse qui aurait pour effet d'introduire de nouvelles résistances dans le circuit inducteur.

La résistance *r* sert à régler la résistance du circuit du solénoïde dans lequel elle est insérée, de manière à déterminer le courant excitateur correspondant à la position d'équilibre du levier L, à égale distance des contacts m_1 et m_2. On l'ajuste une fois pour toutes et l'on agit ensuite sur le ressort *e* dont on augmente ou diminue la tension, suivant que l'on veut maintenir une tension plus faible ou plus grande aux points choisis.

Le système mécanique peut être actionné au besoin par un petit moteur électrique faisant partie intégrante de l'appareil régulateur.

Dans l'appareil *Postel-Vinay*, les bobines relais, telles que celles M_1 et M_2 de Thury sont utilisées, non pour renverser le sens de rotation d'un organe mécanique indépendant, mais pour actionner directement l'axe à vis sans fin

qui commande le balai mobile du rhéostat. C'est l'armature mobile de ces électro-aimants, disposée comme le trembleur d'une sonnerie électrique qui agit par un rochet sur la jante en cuir de galets portés à chaque extrémité de l'arbre moteur.

Le système moteur électrique fait donc partie intégrante du régulateur, qui n'exige pas ainsi le secours d'une force motrice extérieure.

Un autre principe est encore fréquemment employé dans la construction de ces régulateurs ; il consiste à relier les diverses résistances composant le rhéostat, à un faisceau de tiges de longueurs différentes, placé au-dessus d'un godet à mercure dont le mouvement de montée et de descente est commandé par le noyau du solénoïde régulateur (fig. 184).

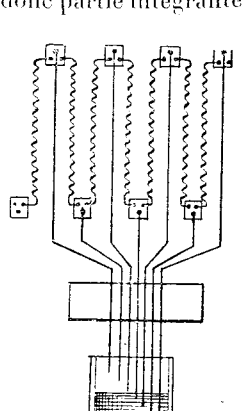


Fig. 184. — Rhéostat automatique à mercure.

Lorsque toutes les tiges sont hors du mercure, le rhéostat est intercalé en entier dans le circuit d'excitation de la dynamo ; mais au fur et à mesure que le faisceau plonge davantage dans le mercure, les diverses résistances sont mises successivement en court-circuit, le courant passant directement de la première tige plongée à la dernière, à travers le métal liquide.

Ainsi, le godet à mercure monte ou descend suivant qu'il y a lieu de remonter ou d'abaisser la différence de potentiel, de manière à la ramener à la valeur de régime pour laquelle l'appareil a été réglé.

Rhéostats. — En ce qui concerne les rhéostats proprement dits, ils sont le plus généralement constitués par des résistances métalliques ; mais on emploie également des résistances liquides.

Dans la première catégorie, on peut distinguer les *rhéostats à cadre* dont les résistances sont formées par une série d'hélices d'un métal à grande résistivité, tel que le *maillechort*. L'appareil comporte un commutateur dont la manette peut être déplacée sur les plots disposés en arc de cercle où aboutissent les diverses sections du circuit résistant.

On trouve aussi certains types de rhéostats où les hélices de fil métallique sont remplacées par des lames de charbon qui sont alors protégées par des enveloppes en tôle perforée.

A la même catégorie appartiennent les *rhéostats à curseur*. Ce système se compose d'un cylindre en fer émaillé sur lequel sont enroulées les spires de fil de maillechort, ces spires étant, d'ailleurs, isolées du cylindre par du carton d'amiante, dans le cas où la surface d'enroulement ne serait pas isolante elle-même. On fait varier les résistances introduites à l'aide d'un curseur qui se déplace le long d'une tige parallèle aux génératrices de la bobine de résistance, en frottant sur les spires. Le curseur porte un écrou qui reçoit d'une tige filetée et manœuvrée par une manivelle, le mouvement d'avance et de recul voulu pour introduire ou supprimer les diverses sections résistantes dans le circuit à régler.

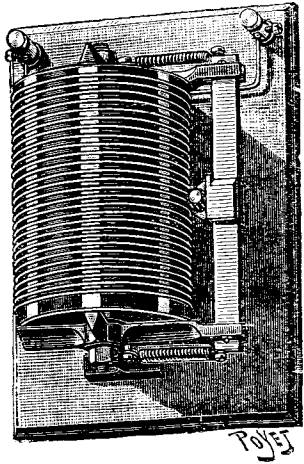


FIG. 185. — Rhéostat Cauce.

Tel est le rhéostat du système Cauce (*fig.* 185).

Pour des appareils moins importants, le curseur glisse à frottement doux le long d'une règle métallique et peut être déplacé directement à la main.

Quel que soit le système, le circuit à régler est relié par

l'une de ses extrémités à l'origine de la bobine de résistance, tandis que l'autre extrémité est rattachée soit au commutateur, soit au curseur mobile.

Les rhéostats à liquide consistent en des cuves contenant soit de l'eau acidulée par l'acide sulfurique par exemple, soit une dissolution saline telle que le sulfate de soude. Dans ces cuves plongent deux plaques de plomb ou de tout autre métal non susceptible d'être attaqué par le liquide conducteur. Chacune des plaques est reliée respectivement aux extrémités du circuit à régler, et l'on fait varier la résistance en écartant plus ou moins les lames, de manière à faire varier l'épaisseur de la couche liquide interposée.

On peut également modifier la valeur de la résistance en changeant la composition des liquides acides ou salins.

Régulation de l'intensité. — Quand il s'agit de maintenir l'intensité du courant constante dans le circuit d'utilisation, on peut appliquer le même procédé de régulation qui consiste à intercaler des résistances dans le circuit d'excitation du schunt.

Lorsque la résistance du circuit extérieur augmente, l'intensité tend à décroître, il faudra donc augmenter le champ magnétisant et pour cela retirer des résistances du circuit d'excitation ; il faudra au contraire en ajouter si la résistance du circuit diminue.

Les résistances additionnelles devront donc varier, pour la régulation, en raison inverse des variations de la résistance du circuit extérieur, contrairement à ce qui se passait dans le cas du potentiel constant.

Il faut remarquer, toutefois, que la réaction d'induit et la perte de tension dans l'armature diminuent avec le courant, d'où résulte une élévation du potentiel, qui s'oppose dans une certaine mesure à de brusques variations de l'intensité.

Quoi qu'il en soit, on suivra les indications de l'ampèremètre pour agir sur le rhéostat, de manière à maintenir l'intensité constante.

Si la régulation est automatique, les régulateurs déjà

décrits pourront être employés, mais le solénoïde qui commande le réglage devra être excité par le courant lui-même, puisque ce sont les variations d'intensité de celui-ci qui doivent influencer l'appareil et non plus la différence de potentiel.

Ce solénoïde sera donc à gros fil et intercalé dans le circuit d'utilisation, en série avec lui.

141. **Régulation des machines série.** — Ces dynamos sont employées généralement dans les applications qui exigent une intensité constante.

Pour maintenir le potentiel constant, on ne saurait introduire utilement un rhéostat dans le circuit inducteur, qui fait partie du circuit général, car on agirait ainsi en même temps sur le potentiel et sur l'intensité, alors que seul le potentiel est en cause.

S'il s'agit de maintenir l'intensité constante, tout réglage de l'intensité retentira encore simultanément sur le potentiel, puisque l'inducteur est excité par le courant à régler.

Dans tous les cas, l'introduction d'une résistance supplémentaire, traversée par la totalité du courant, entraînera une absorption d'énergie considérable, qui sera dissipée inutilement en chaleur, par l'effet Joule.

On emploie alors des procédés analogues à ceux appliqués dans les machines Brusch et Thomson-Houston, et que nous avons exposés précédemment.

Le premier consiste, comme on l'a vu, à détourner dans une résistance variable en dérivation, une fraction plus ou moins grande du courant total, en réduisant ainsi le courant d'excitation. La perte par effet Joule est plutôt diminuée de cette façon, puisque l'adjonction d'une résistance en dérivation réduit la résistance moyenne de l'ensemble.

Le second procédé est basé sur la modification du calage des balais. La différence de potentiel entre les lames diamétralement opposées du collecteur varie, en effet, de o au maximum, depuis le diamètre parallèle à la direction du champ résultant de l'inducteur et de l'induit, jusqu'au diamètre perpendiculaire à ce champ. On peut donc faire

varier cette différence de potentiel, et par suite le débit du courant, en modifiant l'angle de calage des balais.

Dans la machine Thomson-Houston, on agit aussi sur les balais qui sont doubles, pour mettre successivement en parallèle et en court-circuit les diverses bobines de l'induit et faire varier ainsi la force électro-motrice moyenne, suivant la valeur de l'intensité qui doit être maintenue constante.

142. **Procédés divers de régulation.** — Il nous reste à citer divers autres procédés employés notamment pour maintenir constante la différence de potentiel et qui sont moins généralement employés que les précédents.

Feeders. — Un premier moyen consiste à alimenter les différents points d'un réseau électrique à l'aide de conducteurs de transport ou *feeders* à résistance variable.

A cet effet, on intercale un rhéostat dans l'une des branches de chaque *couple de feeders* au départ de l'usine. La différence de potentiel étant maintenue constante aux bornes de la dynamo, et par suite aux barres du tableau A et B, on manœuvre la manette du rhéostat de manière à réaliser une chute de tension constante sur les feeders quelles que soient les charges et les longueurs respectives de ces feeders (*fig.* 186).

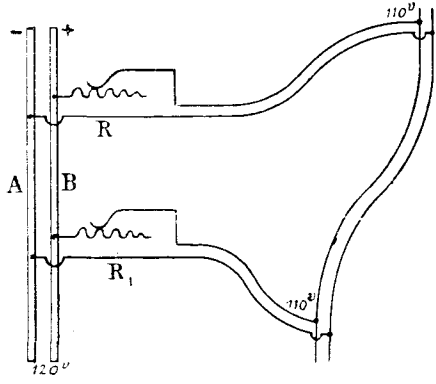


Fig. 186. — Résistances dans le circuit des feeders.

On veut, par exemple, avoir une différence de potentiel constante de 110 volts aux différents centres de distribution; on maintiendra 120 volts aux bornes du

tableau et l'on consentira une perte de 10 volts dans les feeders. On fera donc varier les résistances R et R_1 en les augmentant si le débit du courant diminue, en les diminuant dans le cas contraire.

La commande des rhéostats peut se faire, soit à la main, soit de préférence d'une manière automatique.

On voit de suite l'inconvénient de ce procédé, c'est d'absorber en pure perte une certaine quantité d'énergie dans les rhéostats et la perte est d'autant plus grande qu'elle porte sur la totalité du courant d'utilisation.

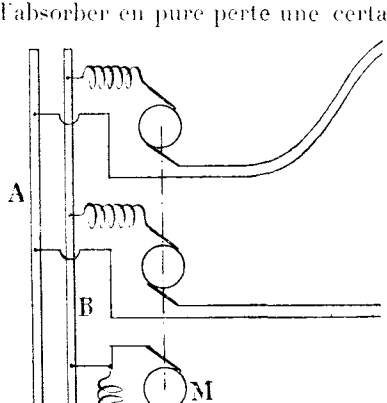


FIG. 187. — Surélévateurs de tension.

SURÉLÉVATEURS DE TENSION. — L'emploi de *dynamos auxiliaires surélévatrices* est plus avantageux. Ces dynamos à excitation en série sont intercalées dans les feeders à la place des rhéostats.

Les induits sont montés sur un axe commun (fig. 187), actionné par un moteur électrique à vitesse constante M qui est lui-même alimenté par le courant pris sur les barres collectrices du tableau.

Dans ces conditions, la force électro-motrice développée par l'induit en série, s'ajoute à la force électro-motrice principale agissant dans les feeders. L'inducteur en tension agit à la manière de l'enroulement série dans les machines compound, il développe une force électro-motrice d'induction complémentaire qui augmente avec le courant et avec la chute de tension correspondante dans les feeders.

L'accroissement de force électro-motrice sera, en effet, proportionnel à celui du courant, si l'enroulement induc-

teur est calculé pour produire, à la vitesse constante admise, une force électro-motrice additionnelle égale à la chute de tension dans la résistance intérieure de l'induit et dans la résistance du feeder. Il faut encore que les inducteurs soient dans un état éloigné de leur point de saturation, même à pleine charge, afin que le flux d'induction et la force électro-motrice reçoivent toujours des accroissements proportionnels aux accroissements du courant.

L'énergie peu considérable absorbée par le moteur est restituée, pour la plus grande partie, en énergie électrique déversée dans le réseau par les dynamos surélévatrices ; celles-ci n'absorbent que l'énergie dissipée sous forme de chaleur dans le fer par hystérésis, et le cuivre par effet Joule.

Régulation par le moteur. — Puisque la force électro-motrice d'une dynamo est directement fonction de la vitesse, on peut régulariser le potentiel en modifiant la vitesse du moteur hydraulique ou à vapeur, suivant les besoins.

Ce réglage s'effectuera au moyen de solénoïdes placés en dérivation sur le circuit à régler, et agissant par leur noyau magnétique, soit sur la valve d'admission de vapeur, soit sur les vannes d'alimentation d'eau.

Emploi des accumulateurs. — Quand il s'agit de remédier aux irrégularités de marche d'un moteur, on a recours plus généralement à une batterie d'accumulateurs, de faible capacité, placée en dérivation aux bornes du circuit d'utilisation (fig. 188).

Le circuit d'utilisation n'est pas relié directement à la dynamo ; deux éléments servant de tampon sont intercalés à chaque extrémité ; la batterie principale forme un pont de dérivation entre les deux bornes i et k.

L'accumulateur ou pile secondaire développe pendant qu'il est soumis à la charge de la dynamo, une force électro-motrice de sens contraire ou en opposition, et à chaque accroissement de force électro-motrice de la dynamo de charge correspond une augmentation concomitante de la

force électro-motrice de l'accumulateur, jusqu'à un maximum de 2,5 à 2,6 volts par élément.

On voit alors quel est le rôle des éléments tampons *a* et *b* ; à une pulsation de la force électro-motrice de la dynamo correspond une pulsation inverse de celle des éléments interposés, de telle sorte que les lampes ne reçoivent que la pulsation amortie comme par l'effet d'un ressort.

Mais ces éléments tampons ne peuvent remédier qu'aux variations instantanées du courant, la fonction principale de régulation est remplie par la batterie en dérivation.

Si la force électro-motrice de la dynamo faiblit, par suite d'une diminution de vitesse du moteur, la force électro-motrice prépondérante de la batterie agit sur le circuit extérieur et la tension aux bornes des lampes, ne varie pas. Si, au contraire, la vitesse et la force électro-motrice de la dynamo augmentent, le courant en excès, non dépensé par les lampes, s'emmagasinera dans les accumulateurs. La tension demeurera constante aux bornes des lampes, car l'accroissement de force électro-motrice sera compensé par la perte de tension due à l'accroissement de courant.

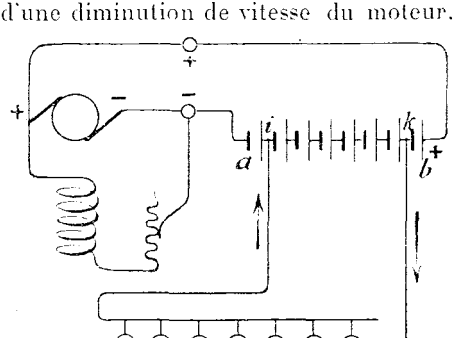


FIG. 188.— Régulation par accumulateurs.

Cette régulation entraîne la dépense d'une batterie d'accumulateurs, mais les frais ne sont pas très importants, car la batterie étant destinée uniquement à servir de volant régulateur, tantôt absorbant l'excédant d'énergie, tantôt le restituant au circuit d'utilisation, n'a besoin que d'une faible capacité, et sera d'un petit modèle relativement peu onéreux.

143. **Rendement des dynamos.** — Ainsi que nous l'avons expliqué (§ 39), le rendement d'un générateur d'énergie s'exprime d'une manière générale par le rapport entre le travail utile et l'énergie totale produite ou dépensée.

Dans le cas des génératrices d'électricité, on distingue trois sortes de rendements : le *rendement industriel*, le *rendement brut* et le *rendement électrique*.

Le premier est le rapport entre l'énergie utilisée ou distribuée et l'énergie mécanique dépensée et fournie à la génératrice.

La puissance électrique utilisable a pour expression $e \times i$, e étant la différence de potentiel aux bornes de la dynamo, i le courant extérieur; le rendement industriel R_i sera donc exprimé par

$$R_i = \frac{e \times i}{\text{puissance mécanique}}$$

Le rendement industriel est le seul véritablement intéressant dans la pratique, c'est lui qui donne la mesure du fonctionnement économique et de la valeur de la machine au point de vue industriel.

Si au lieu de considérer seulement la partie utilisable de l'énergie électrique produite, on tient compte de l'énergie totale dont une partie est absorbée dans les enroulements induits et inducteurs, on obtiendra le rendement brut R_b, soit :

$$R_b = \frac{e \times I}{\text{puissance mécanique}}$$

expression dans laquelle E est la force électro-motrice totale de la dynamo, et I le courant total débité par l'induit.

Enfin, le rendement électrique R_e sera le rapport entre la puissance électrique utilisée et la puissance totale produite :

$$R_e = \frac{e \times i}{E \times I}$$

Le courant i du circuit extérieur peut être égal au

courant de l'induit ou différent de celui-ci, suivant que la dynamo sera excitée en série, en dérivation simple ou compoundée.

L'expression du rendement électrique variera donc avec le type de dynamo ou plutôt d'excitation que l'on aura en vue. Nous examinerons successivement les différents cas et les formules correspondantes.

Pour l'excitation indépendante, le rapport entre l'énergie électrique totale produite par l'induit et l'énergie utile est :

$$R_e = \frac{e \times I}{E \times I} = \frac{e}{E}$$

Mais cette expression ne tient pas compte de l'énergie $r \times i^2$ dépensée dans la résistance r de l'inducteur.

L'expression réelle du rendement électrique sera donc :

$$R_e = \frac{e \times I}{E \times I + r \times i^2}$$

Pour l'excitation en série, on aura encore :

$$R_e = \frac{e}{E}$$

Mais comme la force électro-motrice E est une quantité difficile à mesurer, on l'exprime en fonction des autres quantités électriques dont la mesure s'effectue aisément, à l'aide des voltmètres et ampèremètres, on a en effet :

$$E = e + (r + r_1) I$$

le terme $(r + r_1) I$ représentant la chute de tension dans les résistances r et r_1 des enroulements de l'induit et de l'inducteur.

D'où l'on obtiendra :

$$R_e = \frac{e}{e + (r + r_1) I}$$

S'il s'agit de l'excitation en dérivation, le courant extérieur n'est plus égal au courant total induit, on a :

$$R_e = \frac{e \times i}{E \times I}$$

Le courant I se bifurque entre le circuit inducteur et le circuit extérieur et l'on peut écrire :

$$I = i_2 + i$$

On obtient ainsi la valeur du courant total I de l'induit en mesurant séparément le courant du schunt inducteur i_2 et le courant extérieur i (fig. 189).

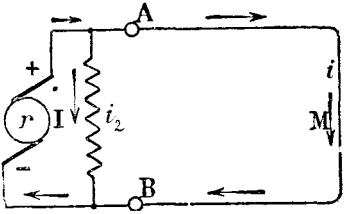


FIG. 189. — Rendement de la dynamo schunt.

Quant à la force électro-motrice E, elle s'obtient en appliquant la seconde loi de Kirchoff au grand circuit r A M B :

$$E = r \times I + e$$

e étant, comme toujours, la différence de potentiel aux bornes A et B.

D'où, en remplaçant E et I par leurs valeurs respectives, dans la formule du rendement.

$$R_e = \frac{e \times i}{r \times (i_2 + i) + e \times (i_2 + i)}$$

Nous examinerons, comme dernier cas, la dynamo compound en courte dérivation; l'énergie utile est encore égale à $e \times i$ (fig. 190).

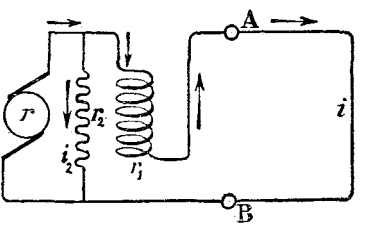


FIG. 190. — Rendement de la dynamo compound.

Remarquons ici que la différence de potentiel aux balais est tout à fait différente de celle aux bornes.

La première e_1 est égale à la seconde e augmentée de la chute de tension dans la bobine en série :

$$e_1 = e + r_1 \times i$$

La force électro-motrice qui contient toutes les chutes de potentiel successives du circuit sera :

$$E = r \times I + e + r_1 \times i$$

Et comme :

$$I = i_2 + i$$

Il vient :

$$E = e + r_1 \times i + r \times (i_2 + i)$$

Et enfin le rendement :

$$R_e = \frac{e \times i}{E \times I} = \frac{e \times i}{e + r_1 \times i + r \times (i_2 + i) \times (i_2 + i)}$$

On établirait tout aussi aisément la formule de rendement relative à l'excitation Compound en longue dérivation.

Le rendement électrique est toujours très élevé dans les bonnes machines et il atteint facilement, pour les machines d'une certaine puissance, 0.95 à 0,97 pour 100.

Mais ce rendement élevé, que les constructeurs indiquent le plus souvent dans leurs catalogues, ne tient pas compte des éléments de pertes autres que l'échauffement du circuit induit et des circuits inducteurs en série ou en dérivation.

En réalité, une partie de l'énergie fournie à la génératrice est absorbée par les courants de Foucault dans l'armature et même dans les spires induites; par l'hystérésis dans le fer de l'induit; enfin, par les frottements mécaniques des divers organes en mouvement.

Nous avons vu (§ 119) comment on atténue dans la plus grande mesure possible, les courants de Foucault qui tendent à prendre naissance dans la masse de l'armature en rotation dans le champ magnétique inducteur. Il suffit de construire l'armature en fer divisé, soit au moyen de faisceaux de fil de fer, soit en superposant des disques de tôle mince séparés par des feuilles de matières isolantes.

Quant aux courants de Foucault dans les circuits induits, ils ne sont sensibles que pour les conducteurs de forte section destinés au débit de courants très intenses. On y remédie encore en divisant les conducteurs et les formant de plusieurs brins ou lames et non de barres massives.

Les phénomènes d'hystérésis proviennent de ce que les diverses régions de la masse de l'armature sont soumises à des aimantations périodiquement variables et de sens inverse, une fois par tour s'il s'agit d'un inducteur bipolaire, deux et trois fois si l'inducteur est à quatre ou à six pôles.

La perte absorbée par le travail d'hystérésis est exprimée par la surface des courbes du cycle d'aimantation, pour chaque période et par centimètre cube de fer; elle peut encore se calculer par les formules données précédemment (§ 79).

Pour avoir une idée approximative de cette cause de perte, on peut admettre un minimum pratique de 0.001 de Joule par cycle et par centimètre cube de fer.

Le travail absorbé par seconde, ou la puissance perdue, pour un anneau de 5000 centimètres cubes, tournant à la vitesse de 20 tours, dans un champ bipolaire, serait donc au minimum :

$$W = 0.001 \times 5000 \times 20 = 100 \text{ watts.}$$

Enfin, la machine marcherait-elle à vide sans produire aucun travail électrique, qu'elle absorberait encore une certaine énergie pour vaincre la résistance que les forces de frottement des pièces mobiles entre elles et contre l'air opposent à leur mouvement.

Ce travail de frottement peut être évalué à l'aide du dynamomètre de transmission que nous avons décrit au commencement de cet ouvrage (§ 11).

Le rendement industriel, qui tient compte de toutes ces pertes est donc le seul véritablement intéressant au point de vue économique. Ce rendement, dans les machines puissantes bien établies, varie de 80 à 94 pour 100, il est donc des plus remarquables au point de vue de la transformation de l'énergie.

144. **Couplage des dynamos.** — Les dynamos peuvent être groupées en tension ou en quantité comme les piles hydro-électriques, de manière à recueillir dans le circuit d'utilisation la somme des énergies des diverses machines.

On ne peut associer, toutefois, que des dynamos pourvues du même système d'enroulement, les conditions de fonctionnement des dynamos série ou schunt étant essentiellement différentes.

D'autre part, dans le couplage en série, il est indispensable que les diverses machines connectées soient capables

de supporter le courant de régime qui doit traverser en totalité les circuits de chacune d'elles : quant aux forces électro-motrices il n'est pas nécessaire qu'elles soient égales, elles s'ajouteront dans le circuit avec leurs valeurs respectives.

Les considérations inverses se présentent dans le couplage en dérivation : chaque dynamo doit développer la même tension égale à celle du circuit extérieur afin de pouvoir déverser son courant individuel dans ce circuit, au lieu d'absorber le courant et l'énergie provenant des autres machines.

En général, on groupe les machines série en tension et les machines schunt en dérivation ; toutefois ces deux types de dynamos peuvent être couplés de l'une et l'autre manière et nous examinerons successivement tous les cas qui peuvent se présenter.

Couplage des dynamos série. — 1° *En série.* — Ce groupement se fait exactement comme celui des éléments de piles, mais en remplaçant les pôles par les balais ou les bornes des machines.

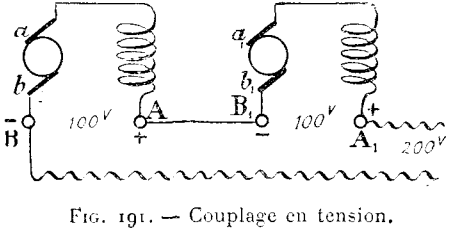


Fig. 191. — Couplage en tension.

On reliera donc (fig. 191) la borne positive A de la machine (1) à la borne négative B_1 de la machine (2) ; les bornes extrêmes restées libres seront naturellement de nom contraire, et constitueront les bornes de la batterie où viendront s'attacher les extrémités du circuit extérieur.

Si chacune des dynamos développe une force électromotrice de 100 volts entre leurs bornes respectives, on obtiendra une différence de potentiel de 200 volts entre les bornes A_1 et B.

D'une manière générale, et quel que soit le nombre des machines : *on réunit entre elles les bornes de nom con-*

traire et l'on rattache le circuit extérieur aux bornes extrêmes, de nom contraire, restées libres.

2° *En dérivation.* — Comme pour les piles, on relie ensemble, d'un côté toutes les bornes positives, de l'autre toutes les bornes négatives. Généralement ces connexions se font par l'intermédiaire de barres de cuivre fixées sur le tableau de distribution de l'usine et où viennent se rattacher, à l'une les pôles positifs, à l'autre les pôles négatifs des dynamos. C'est également de ces barres que partent les circuits extérieurs d'utilisation (fig. 192).

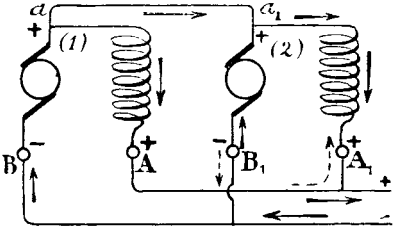


FIG. 192. — Couplage en dérivation des dynamos série.

Si les choses restaient en l'état indiqué, il pourrait arriver, dans le cas où la force électro-motrice de la dynamo (1) par exemple serait supérieure à celle de la dynamo (2) que le courant de la première pénètre dans la seconde suivant la direction des flèches pointillées.

Dans ce cas, non seulement la dynamo (2) ne contribuerait en rien à la fourniture de l'énergie au circuit d'utilisation, mais encore elle absorberait et détournerait en pure perte une partie de l'énergie de la dynamo n° 1.

En outre, le courant pointillé traversant les inducteurs (2) en sens inverse du sens normal, les pôles seraient renversés, A_1 devenant négatif et B_1 positif; les dynamos (1) et (2) formeraient, dès lors, comme un groupe de deux machines reliées en séries, qui ajouteraient leurs forces électro-motrices pour forcer le courant à travers l'ensemble de leurs circuits intérieurs. Il pourrait en résulter un courant intérieur très intense, susceptible d'amener la destruction des enroulements de la machine.

Pour prévenir cet accident, on relie directement entre eux tous les balais positifs par un fil aa_1. Dans ces condi-

tions, le courant parasite venant de a passera de préférence par le fil aa_1 et traversera l'inducteur (2) dans le sens normal, si bien que, loin de renverser ses pôles, il viendra, au contraire, renforcer son excitation et rétablir l'équilibre entre les forces électro-motrices momentanément inégales des deux machines.

Pour qu'il en soit ainsi, il faut que le fil aa_1 ait un diamètre suffisant pour que sa résistance soit négligeable, de manière à ce que, sous l'influence du passage d'un courant qui peut atteindre facilement la moitié du courant normal, il ne s'établisse pas une différence ou chute de tension appréciable entre ses deux extrémités.

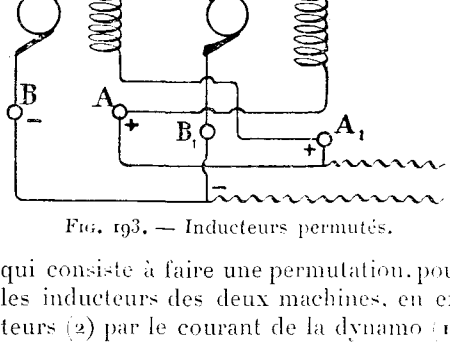


Fig. 193. — Inducteurs permutés.

On peut encore adopter la disposition ci-contre (fig. 193) qui consiste à faire une permutation, pour ainsi dire, entre les inducteurs des deux machines, en excitant les inducteurs (2) par le courant de la dynamo (1).

De cette façon, les forces électro-motrices des deux machines s'équilibreront ; car le courant le plus intense débité par l'une ou l'autre servira à relever la tension de la seconde machine dont elle excitera les inducteurs, et à lui faire produire la même énergie.

Couplage des dynamos schunt. — 1° *En série.* — On ne peut relier deux dynamos schunt en série, en laissant à chacune son excitation en dérivation sur ses propres bornes.

On forme une dérivation unique des divers systèmes inducteurs, dont les extrémités sont reliées aux bornes extrêmes de la première et de la dernière dynamo de la série.

Les induits sont ensuite réunis en série distincte par leurs pôles de nom contraire, et les pôles extrêmes forment les pôles de la batterie où viennent se relier les extrémités du circuit extérieur (fig. 194).

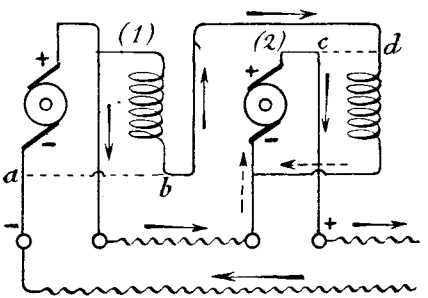


FIG. 194. — Couplage en série.

Si l'on avait laissé à chaque dynamo son excitation propre, la connexion *bd* aurait été remplacée par les connexions en traits pointillés. *ab* et *cd* ; les excitations de chaque inducteur varieraient alors avec la force électro-motrice individuelle de chaque dynamo et le réglage deviendrait impossible.

Grâce à la disposition adoptée, les deux systèmes d'inducteur sont parcourus par le même courant et reçoiven la même excitation

2° *En dérivation.* — La première condition à remplir, pour ce couplage, est que les dynamos développent toutes la même tension.

Pour opérer le groupement, *on reliera toutes les bornes positives à la barre positive du tableau de distribution, et toutes les bornes négatives à la barre négative, sans se préoccuper des circuits inducteurs auxquels rien n'est changé.*

Il faut observer certaines précautions pour la mise en marche des machines, soit qu'elle doive se faire simultanément ou successivement.

Dans les deux cas il convient d'adopter des dispositions particulières, de façon à pouvoir fermer les différents circuits en temps opportun et à se rendre compte, à chaque instant, du débit de chaque dynamo et de la différence de potentiel aux formes de chacune d'elles.

Quand les machines doivent être mises en marche à la fois, on adopte la disposition ci-contre (fig. 195).

C′ et C″ sont des ampèremètres intercalés entre les bornes positives et la barre de connexion; I′ et I″ interrupteurs des circuits inducteurs; R′ et R″ rhéostats de ces circuits; H′ et H″ interrupteurs sur les circuits des induits.

Enfin D est un voltmètre dont l'une des bornes est reliée invariablement à la barre négative et l'autre peut

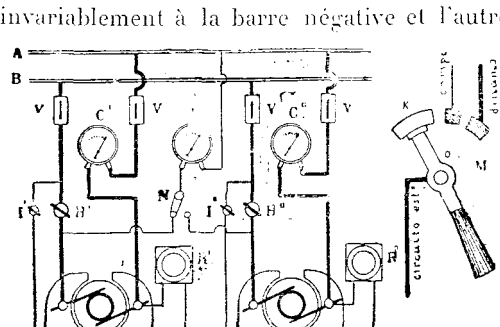


Fig. 195. — Couplage en quantité de deux dynamos *schunt* (1re disposition).

être portée sur l'un ou l'autre des pôles positifs de chaque dynamo, par le moyen d'un commutateur C à deux directions.

On intercale d'abord toutes les résistances dans les circuits inducteurs, et l'on ferme les interrupteurs I: si les dynamos sont au repos, on ferme également les interrupteurs II *au moment de la mise en marche*; *mais si les* dynamos tournent déjà, on ne les reliera au circuit d'utilisation par les interrupteurs H que lorsqu'elles auront atteint leur vitesse normale, afin que l'induction correspondant à la vitesse maxima compense la chute de tension due au débit.

A ce moment on agira sur les rhéostats des diverses

machines pour régler les différences de potentiel aux bornes et les ramener à la même valeur de régime.

Pour intercaler une dynamo dans un circuit en charge, on la fait d'abord tourner à sa vitesse normale, puis le circuit inducteur étant fermé, on règle la tension par la manœuvre du rhéostat, et l'on n'introduit la nouvelle dynamo dans le circuit que lorsque cette tension est égale à celle des bornes de connexion.

On voit aisément, en effet, qu'une dynamo à force électro-motrice nulle ou inférieure à celle du circuit, constitue une résistance ordinaire qui relie directement les deux pôles du circuit et reçoit le courant de celui-ci au lieu de lui en fournir.

Dans ces conditions, l'induit de la dynamo peut être brûlé, si la différence des tensions est notable; dans le cas contraire, la dynamo joue le rôle de réceptrice et fonctionne comme moteur: elle absorbe donc de l'énergie au lieu de contribuer à la distribution.

Quand il s'agit des dynamos schunt, la polarité des inducteurs n'est pas intervertie et le sens de rotation ne change pas, sous l'influence du courant extérieur; la dynamo peut donc surmonter aisément la tension du dehors, dès que son excitation est augmentée par la manœuvre du rhéostat.

Pour retirer une dynamo du circuit, on intercale des résistances dans les rhéostats d'excitation, jusqu'à ce que l'ampèremètre indique un courant très faible, puis on ouvre l'interrupteur de connexion au circuit d'utilisation et en dernier lieu celui du circuit inducteur; enfin on arrête la dynamo.

Dans les stations importantes, on prend des dispositions pour n'introduire les diverses machines dans le circuit qu'après les avoir amenées à fonctionner à la charge normale, sur un circuit spécial de lampes ou de résistances destinées à absorber l'énergie ainsi développée.

Dans ce cas (fig. 196), le circuit inducteur pourvu du rhéostat de réglage R' est relié au pôle négatif de la dynamo, par l'intermédiaire de l'interrupteur I'; d'autre

part, la même borne de la dynamo est mise en communication avec la borne négative par l'interrupteur X′ ou avec les groupes de lampes par l'interrupteur H′.

Pour introduire la nouvelle dynamo dans le circuit, soit celle de gauche par exemple, tous les interrupteurs étant

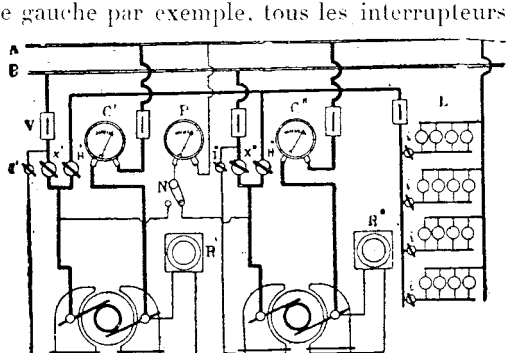


Fig. 196. — Couplage en quantité de deux dynamos (2e disposition).

ouverts, on fait tourner la machine à sa vitesse normale), puis l'on ferme I′ et l'inducteur est excité par le circuit propre de la dynamo.

On ferme alors le circuit de l'induit sur les lampes d'essai, par l'interrupteur H′ et l'on introduit, par le jeu des interrupteurs *i*, autant de lampes qu'il faut pour constituer une charge égale à celle des autres dynamos en service. En même temps on règle la différence de potentiel de la dynamo en suivant les indications du voltmètre.

Lorsque la tension aux bornes de la dynamo, pourvue de sa charge artificielle, a atteint la même valeur que celle aux bornes du circuit d'utilisation, c'est-à-dire aux barres du tableau, on ferme X′ et l'on supprime les lampes en ouvrant H′, la dynamo est ainsi mise en circuit.

On peut imaginer également un autre interrupteur qui serait placé sur une dérivation du circuit inducteur, prise

au-dessous de I', et relierait ce circuit directement aux barres du tableau ; si l'on ferme ce second interrupteur après avoir ouvert I', la dynamo est excitée par le courant extérieur provenant des autres machines. La mise en marche se fait ainsi plus rapidement, et l'on n'a pas d'ailleurs à craindre le renversement des pôles de la dynamo.

Pour retirer la machine du circuit, on la branche de nouveau sur les lampes d'essai en fermant l'interrupteur H', on intercale successivement le nombre de lampes correspondant à la charge, on ouvre X', puis l'on supprime progressivement les lampes et l'on arrête la dynamo.

Couplage des dynamos compound. — 1° *En série.* — Pour relier deux ou plusieurs dynamos compound en tension, on établit les communications comme pour les dynamos excitées en série, en ce qui concerne les bobines à gros fil, et d'autre part, comme pour les dynamos shunt en ce qui concerne les enroulements à fil fin (fig. 197).

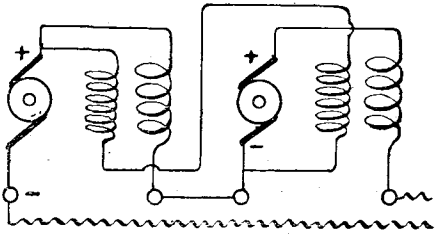


Fig. 197. — Couplage en série des dynamos compound.

On intercale également dans ce dernier circuit un rhéostat de réglage, pour obvier aux variations de force électromotrice que peuvent produire les changements de vitesse auxquels le compoundage seul ne peut remédier.

2° *En dérivation.* — La même règle que ci-dessus s'applique pour la mise en parallèle, en traitant les enroulements série et shunt comme s'ils appartenaient séparément à des dynamos à excitation simple de l'un et l'autre système.

En somme, on couple les circuits principaux des dynamos en dérivation, sans s'occuper des enroulements shunt,

puis on ajoute le fil de compensation D′ D″ entre les deux balais positifs (fig. 198).

L'installation est complétée par un ampèremètre C sur le circuit de chaque machine, un voltmètre E généralement

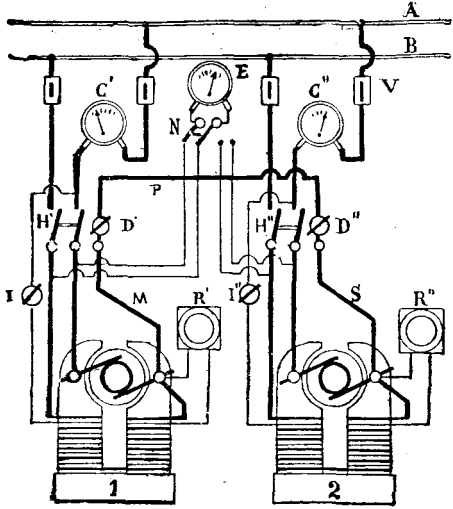


Fig. 198. — Couplage en quantité des dynamos compound.

commun à plusieurs dynamos, des interrupteurs bipolaires H pour mettre chaque dynamo en circuit ou hors circuit, et un rhéostat régulateur R sur chaque enroulement schunt des inducteurs.

CHAPITRE VIII

DESCRIPTION DES DIVERS TYPES DE DYNAMOS A COURANT CONTINU

145. **Dynamo Gramme.** — Le dessin (fig. 199) représente un type de dynamo à inducteur bipolaire et à induit

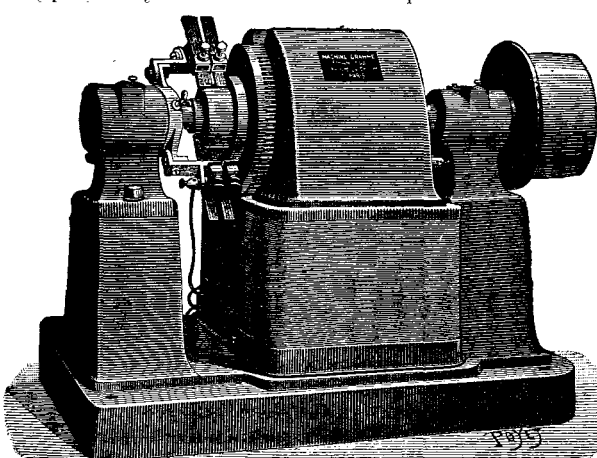


FIG. 199. — Machine Gramme (type supérieur).

Gramme ou à anneau. Il est connu sous le nom de dynamo type supérieur, ainsi dénommé parce que l'induit est placé à l'extrémité supérieure des inducteurs. Néan-

moins, le bâti présente une assiette largement établie et une grande stabilité; les supports des paliers sont bien séparés des inducteurs et permettent un accès facile de l'induit, du collecteur et des balais.

Le bâti en fonte comprend un socle général, les deux supports des paliers et les noyaux des électros; le tout forme une seule et même pièce entièrement venue de fonte.

Les noyaux inducteurs sont surmontés de pièces polaires en forme de mâchoires qui embrassent les trois quarts environ de la superficie de l'induit. Les bobines inductrices enroulées préalablement sur un mandrin, sont enfilées sur les noyaux et maintenues entre deux cadres en bois.

Les bobines induites sont enroulées sur un anneau en fil de fer doux, monté sur un croisillon en bronze qui est calé sur l'arbre, à l'aide d'une clavette.

Les porte-balais sont disposés pour faire varier le calage suivant le débit; ils sont montés à cet effet sur un anneau mobile autour d'une douille formée par l'extrémité du palier voisin.

Enfin, suivant le mode le plus généralement adopté, le graissage des coussinets et des tourillons se fait au moyen d'une bague qui est suspendue sur le tourillon à l'intérieur du palier et plonge par sa partie inférieure dans un réservoir d'huile; l'arbre, dans son mouvement de rotation, imprime un mouvement de roulement de la face intérieure de la bague sur le tourillon et remonte ainsi constamment à la partie supérieure la fraction de la bague qui plonge dans l'huile; on obtient ainsi un excellent graissage.

La puissance de ces machines s'élève au maximum à 42 kilowatts; on en construit au-dessous, jusqu'à un quart de kilowatt.

146. **Dynamo Rechniewski.** — C'est une machine bipolaire, à induit denté genre Siemens ou à tambour, type supérieur (fig. 200).

Les induits dentés ont pour effet de faire varier la reluctance du circuit magnétique et, par suite, l'intensité du flux dans la région de l'entrefer; cette variation du flux

émanant des différents points de la surface polaire détermine la production de courants de Foucault, dans l'épaisseur de la masse polaire voisine de la surface (§ 125).

Pour éviter l'échauffement excessif des pièces polaires qui résulterait de la présence de ces courants parasites, l'inducteur I de la machine Rechniewski est lamellé comme l'induit, c'est-à-dire qu'il est constitué par des feuilles de tôle minces, en fer doux, isolées par l'interposition de feuilles de papier enduit de gomme laque.

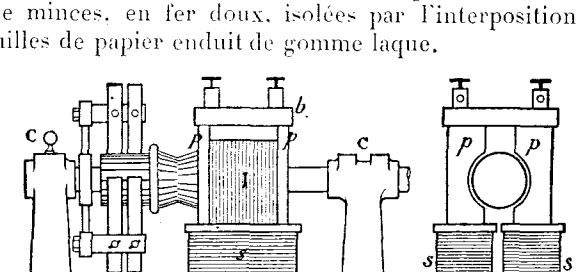


FIG. 209. — Dynamo Rechniewski.

Ces tôles, découpées suivant un profil convenable, forment par leur ensemble la carcasse inductrice comprenant les noyaux, les pièces polaires et la culasse.

Les piles de tôle sont maintenues sur les deux faces latérales traversées par l'arbre, au moyen de deux plaques de fonte p, ayant le même profil que les tôles.

Ces plaques présentent un retour d'équerre à la partie inférieure, qui sert à les boulonner sur le bâti de fondation en fonte, de manière à fixer invariablement l'ensemble de l'inducteur; les bords supérieurs desdites plaques dépassent les pièces polaires et servent de support à une planchette b sur laquelle sont fixées les bornes du circuit extérieur et les prises de courant. L'espace resté libre entre la tablette et les inducteurs permet la ventilation de la dynamo.

Les solénoïdes inducteurs *s* sont enroulés sur des bobines en bois, placées de toute pièce sur les noyaux inducteurs.

Les deux paliers *c*, qui sont d'une seule venue avec leur support, sont boulonnés sur le socle général de fondation F.

L'armature de l'induit genre Siemens est constituée par une pile de disques de tôle qui est enfilée sur un manchon en bronze porté par l'arbre, et maintenue, à ses deux extrémités, par deux disques en fibre vulcanisée, serrés par des boulons. Les fils induits sont encastrés dans les rainures formées par l'ensemble des disques dentés, ils sont isolés par des bandes de carton; des ficelles en fil de bronze maintiennent les conducteurs, sans faire de saillie sur l'armature.

On arrive ainsi à réduire l'entrefer au strict minimum nécessaire pour le jeu mécanique de l'induit.

Les lames du collecteur sont isolées par des feuilles de papier; le porte-balais, mobile à l'extrémité de l'un des paliers, ne présente rien de particulier.

147. **Dynamo Siemens.** — Cette machine, construite par la Société alsacienne de Belfort, est du type supérieur, bipolaire, avec induit à tambour.

La dynamo (fig. 201) repose sur un bâti très robuste, dont le socle et les supports de paliers sont d'une seule pièce de fonte; ce socle reçoit deux électros en acier doux d'une grande conductibilité magnétique. Les bobines inductrices sont enroulées sur une bobine en tôle et peuvent être enlevées et remplacées aisément, en cas d'avaries.

L'enroulement en tambour de l'induit est recouvert aux deux extrémités de l'armature par une enveloppe de cuivre perforée qui protège l'enroulement, tout en facilitant le refroidissement de l'induit.

Le collecteur est constitué par des barrettes, généralement en acier, qui sont isolées simplement par les lames d'air qui les séparent; ces barrettes fixées sur le collecteur sont facilement démontables, et peuvent être remplacées rapidement en cas d'usure. Une tablette fixée au sommet des pièces polaires porte les bornes de la machine

où viennent aboutir les conducteurs reliés aux balais.

Le graissage des coussinets se fait par une ou plusieurs bagues, dont la partie inférieure plonge dans le réservoir ménagé à l'intérieur du palier; l'huile remontée par les

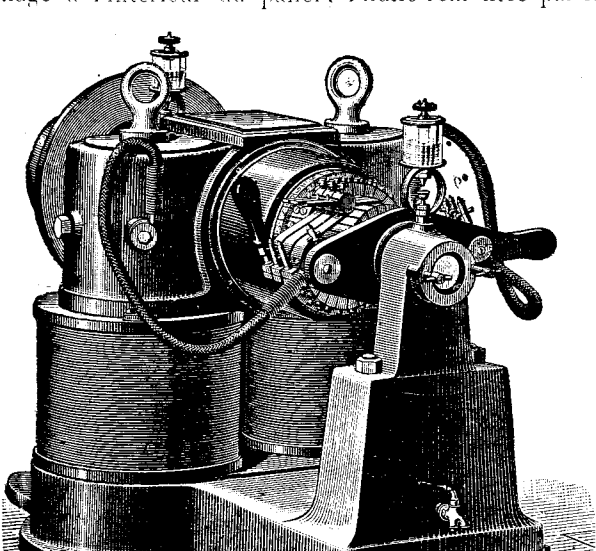


Fig. 201. — Dynamo Belfort (Société alsacienne de Constructions mécaniques.

bagues se répand sur les tourillons et dans de petites cavités pratiquées dans les coussinets.

Les paliers sont munis d'un robinet de vidange et d'un niveau d'huile qui permet de constater à chaque instant la quantité d'huile contenue dans le réservoir; les coussinets relativement longs, sont ajustés de telle sorte qu'ils peuvent se placer exactement dans la direction de l'arbre, qui

porte ainsi sur toute la longueur des coussinets, d'où une usure plus régulière et moins rapide.

Voici quelques chiffres donnés par les constructeurs sur une machine de 25 kilowatts :

Vitesse *normale*. . . .	450 tours par minute
A. Puissance utilisable . .	25.000 watts
B. Pertes électriques :	
1° Excitation des inducteurs.	550 —
2° Perte dans le fil induit.	915 —
C. Pertes mécaniques et magnétiques : Frottements, courants de Foucault, hystérésis. .	780 watts

$$\text{Rendement électrique} \frac{A}{A + B} = \frac{25\,000}{25.000 + 1465} = 94.5\ o/o$$

$$\text{Rendement industriel} \frac{A}{A + B + C}$$

$$= \frac{25.000}{25.000 + 1465 + 780} = 91,7\ o/o$$

Un pareil rendement est, comme on le voit, des plus satisfaisants.

148. **Dynamo d'Oerlikon.** — Cette dynamo est bipolaire, avec induit à anneau et inducteur du type cuirassé (fig. 202).

La carcasse, venue de fonte avec les pièces polaires, enveloppe latéralement ces pièces et l'induit, formant ainsi une cuirasse magnétique autour de l'armature.

Les bobines inductrices sont enroulées sur les pièces polaires elles-mêmes, qui jouent en même temps le rôle de noyaux.

Le flux magnétique émanant de la pièce supérieure, par exemple, traverse l'armature, pénètre dans le pôle sud opposé, puis se bifurque dans le socle pour se déverser dans les deux montants latéraux et se refermer par la culasse *qui forme la partie supérieure du cadre. Cette* forme d'inducteur réduit au minimum la dispersion du flux dans le milieu ambiant, lequel ne manifeste au-

cune action magnétique dans le voisinage de l'électro.

Les supports des paliers sont des chaises en fonte rapportées et boulonnées sur les montants verticaux de la carcasse.

L'enroulement de l'armature est placé dans de pro-

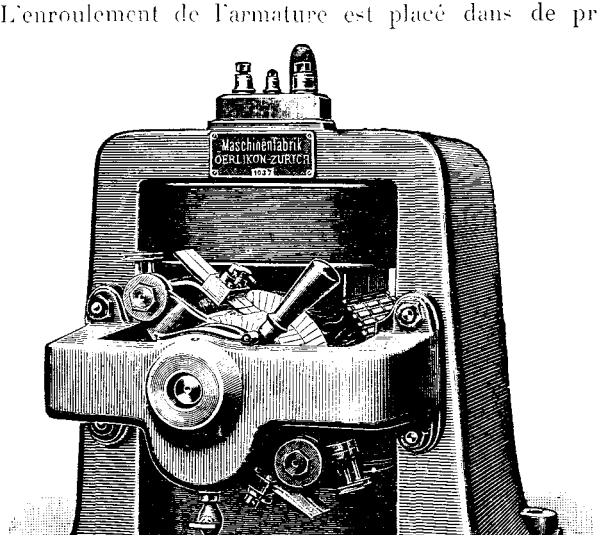


Fig. 202. — Dynamo d'Oerlikon.

fondes rainures pratiquées dans le fer de l'anneau et mis ainsi à l'abri de tout accident.

Les arbres de l'induit en acier tournent dans des paliers munis d'un graissage automatique.

Ce modèle bipolaire se construit jusqu'à la puissance de 20 kilowatts.

149. **Dynamo Limb.** — Cette machine, construite par MM. Gindre frères, à Lyon, est bipolaire, à anneau, et

caractérisée par la forme générale de la carcasse qui constitue une dynamo complètement fermée.

Elle peut être classée dans la catégorie des dynamos cuirassées, mais elle diffère de la dynamo précédente d'Oerlikon en ce que la cuirasse est complète, tant sur les côtés que sur les faces d'avant et d'arrière de la machine.

Le socle S et les supports des paliers sont venus de fonte avec la moitié inférieure de l'inducteur, qui forme une sorte de coffre, dont le couvercle est appliqué et boulonné, par une bride saillante *d*, sur le pourtour de la car-

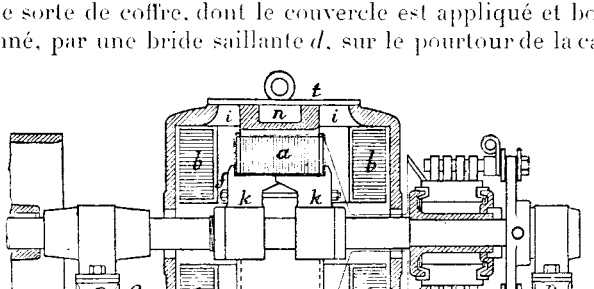


Fig. 203. — Dynamo Limb.

casse. Les surfaces de raccordement sont larges et parfaitement dressées, de manière à assurer un contact parfait et sans réluctance magnétique appréciable (fig. 203).

Dans les machines puissantes, la carcasse inductrice est distincte du bâti, sur lequel elle est fixée par deux oreilles *o* boulonnées sur les grands côtés du cadre, comme il est indiqué dans la figure ci-contre.

Chaque pôle est constitué par deux demi-pièces polaires *nn*, *mm*, qui remplissent en partie les vides ménagés aux fonds supérieur et inférieur du coffre magnétique.

Ces évidements rectangulaires sont recouverts de toiles métalliques *t*, dans le but d'empêcher l'introduction des

limailles et copeaux métalliques, particulièrement ceux de fer qui pourraient s'introduire dans l'entrefer. On voit également que les demi-pièces polaires se détachent latéralement des parois de la cuirasse, dont elles sont séparées par des intervalles suffisants *i*, pour éviter les dérivations magnétiques en dehors de l'entrefer.

La coupe transversale, perpendiculaire à l'axe, présente le profil de ces pièces polaires qui se raccordent à la carcasse, sur les petits côtés de l'évidement rectangulaire, par une partie en forme de talon. Par suite de cette disposition, la paroi intérieure de la cuirasse forme, au droit des

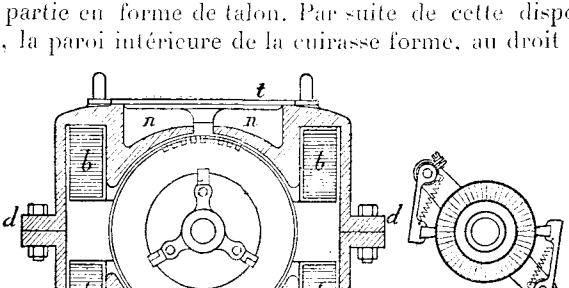


FIG. 204. — Dynamo Limb (coupe transversale).

pièces polaires et avec elles, un logement annulaire dans lequel viennent se placer les bobines *b*, enroulées d'avance, du circuit inducteur (fig. 204).

On voit ainsi que l'induit tourne à l'intérieur même des bobines inductrices et subit, dès lors, directement leur influence magnétique, de telle sorte que le flux de force engendré est intégralement recueilli par l'armature *a*, qui plonge pour ainsi dire au sein du champ magnétique.

Le flux émanant des demi-pièces polaires supérieures, par exemple, donne lieu à deux circuits magnétiques qui se répartissent dans les demi-anneaux de l'induit ; puis les deux gerbes de lignes de force traversent les demi-pièces polaires inférieures, et de là se répandent par le rebord

de la boîte dans toute l'étendue des parois verticales, pour s'étaler de nouveau dans le rebord supérieur et se concentrer finalement dans les pièces du pôle nord.

Cette distribution des circuits magnétiques se rapproche jusqu'à un certain point de celle qui se produit dans l'*inducteur Thomson-Houston* (fig. 144) dont la coupe par les boulons serait assez analogue à la coupe transversale de la dynamo qui nous occupe actuellement.

L'enveloppe a encore l'avantage de protéger les divers organes de la machine, qui sont complètement clos à l'intérieur. Cette carcasse forme un véritable écran magnétique et les galvanomètres les plus sensibles placés dans le voisinage n'accusent aucune influence magnétique.

L'armature de l'induit *a* est formée de rondelles de tôle mince, qui sont saisies entre les mâchoires opposées de deux croisillons K dont les essieux sont calés sur l'arbre de la machine ; le serrage est effectué par trois boulons *f* réunissant deux à deux les branches opposées des deux croisillons.

L'enroulement système Gramme est encastré dans des rainures longitudinales de l'armature dentée. Les fils des diverses bobines induites, sortent de l'intérieur de la cuirasse en longeant l'arbre, pour venir se souder aux lames respectives du collecteur.

Les paliers, en bronze dur, sont à graissage automatique.

Trois bornes, placées de chaque côté sur les parois latérales, servent de points d'attache aux conducteurs amenant le courant des balais et aux extrémités des bobines shunt et série de l'enroulement compound des inducteurs.

En résumé, cette machine est très compacte, réduit autant que possible la reluctance du circuit inducteur, permet un grand développement de l'induit et une réduction notable du nombre des spires, qui se trouvent ainsi animées d'une vitesse linéaire considérable, sans augmentation de vitesse angulaire, c'est-à-dire du nombre de tours.

150. **Dynamos à pôles conséquents. — Dynamo Sautter-Harlé.** — Cette machine bipolaire présente un inducteur type Manchester à pôles conséquents ; son induit est un anneau Gramme ordinaire (fig. 205).

La partie inférieure de la carcasse comprend l'une des pièces polaires *n* qui font corps avec le socle et les deux

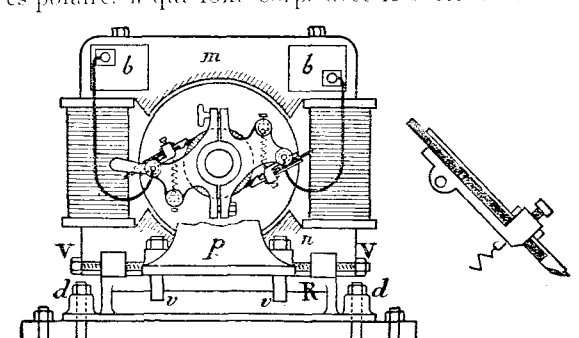


Fig. 205. — Dynamo Sautter-Harlé.

paliers *p* ; les noyaux d'électro qui ont une section carrée sont reliés par la pièce polaire supérieure jouant le rôle de culasse.

Cette culasse porte sur la face placée du côté des collecteurs deux grosses bornes *b* où viennent se rattacher les conducteurs fixés aux balais ; deux autres bornes plus petites servent à connecter les extrémités des bobines inductrices à fil fin, avec les bornes du rhéostat de réglage du champ.

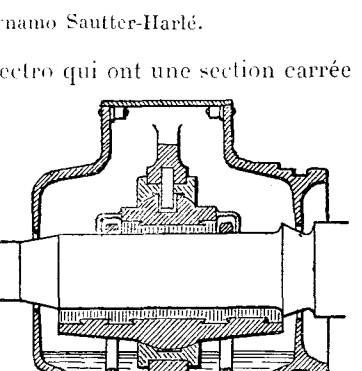


Fig. 206. — Palier.

Le graissage des paliers s'effectue automatiquement, au moyen d'une bague montée folle sur l'arbre et entraînée dans son mouvement.

Dans certains modèles (fig. 206), les paliers sont à rotule avec double bague de graissage. Les coussinets portent sur leurs supports par des surfaces sphériques ; ils peuvent, par suite, se déplacer librement, de manière à prendre exactement la direction de l'arbre, ce qui assure une portée régulière sur toute leur surface.

On a représenté également (fig. 207), l'installation de la

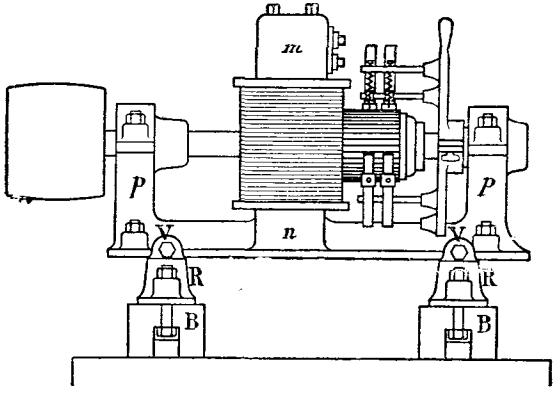


Fig. 207. — Rails tendeurs.

machine sur un système de rails tendeurs permettant de régler la tension de la courroie, même pendant la marche. Ces rails peuvent être fixés, soit directement sur le bloc de fondation en pierre ou béton, soit, comme dans le cas de la figure ci-contre, sur des semelles de bois B isolant le bâti du sol.

La machine glisse sur deux rails R, fixés, par des boulons *d* sur la fondation. Ce mouvement est commandé par quatre vis de butée V. Il est guidé par quatre crochets *r* qui, au repos, agrippent les rails par-dessous et assurent la stabilité de la machine.

Pour détendre la courroie, on commence par desserrer légèrement les quatre crochets *r*, puis les deux vis V placées du côté du moteur, jusqu'à ce qu'on ait obtenu la tension voulue. On resserre alors les quatre crochets *r* et l'on

ramène les vis antagonistes jusqu'au contact. Il est indispensable de faire tourner chacune des vis de butée du même nombre de tours, afin que le parallélisme entre l'axe de la dynamo et celui de l'arbre de commande ne soit pas altéré dans cette opération.

Pour tendre la courroie, on agira inversement, après avoir desserré au préalable les deux vis placées du côté opposé à la commande.

Ces diverses dispositions, qui sont décrites avec tout le soin désirable dans l'instruction dressée par MM. Sautter-Harlé, sont évidemment applicables aux dynamos de tous autres types, conduites par courroies.

151. **Dynamo Hillairet-Huguet.** — C'est encore une machine bipolaire à pôles conséquents, à induit à anneau (fig. 208).

La pièce polaire inférieure fait corps avec le socle de fondation, mais les paliers sont distincts et boulonnés aux extrémités du bâti.

Les noyaux d'électros sont à section circulaire ; la pièce polaire supérieure formant culasse est fortement échancrée en son milieu, pour mettre obstacle au passage du flux transversal de l'induit.

On a représenté une disposition de rails tendeurs qui ne comporte qu'un seul couple de vis, placé du côté du moteur nécessairement.

D'une manière générale, les tendeurs ne peuvent être efficaces que dans le cas où la courroie de commande est suffisamment inclinée sur l'horizontale et fait avec la verticale un angle de 45 degrés au minimum.

152. **Dynamo Brown-Boveri.** — Cette machine forme comme un type intermédiaire entre les dynamos bipolaires et multipolaires.

La carcasse inductrice, du type cuirassé, présente quatre pièces polaires, dont deux seulement, plus saillantes et servant de noyaux, sont munies de bobines inductrices. Il se forme ainsi des pôles conséquents dans les pièces polaires supérieures et inférieures qui sont dépourvues de bobines, et quatre circuits magnétiques qui se ferment par l'arma-

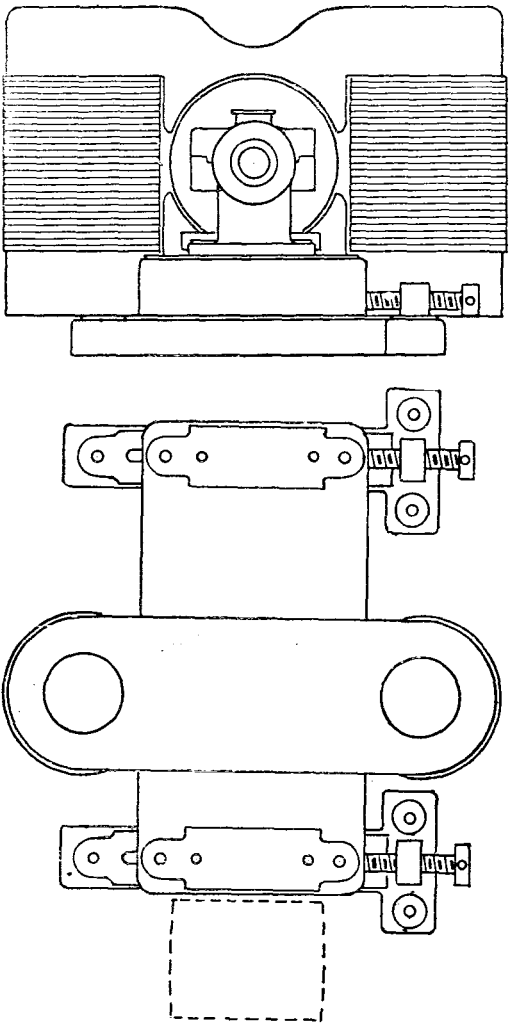


Fig. 208. — Dynamo Hillaret. Élévation et plan

ture du type Siemens, entre les deux demi-pièces polaires voisines (fig. 209).

Cette disposition ayant pour effet, comme dans tous les types cuirassés d'enfermer les noyaux inducteurs dans une enveloppe de fer, supprime presque entièrement les dérivations magnétiques dans l'espace ambiant.

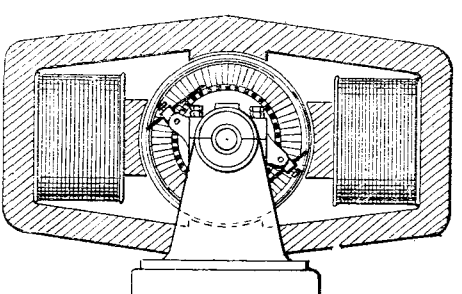


Fig. 209 — Dynamo Brown-Boveri.

Cette dynamo, d'une construction très économique, est encore simplifiée pour être employée comme excitatrice des dynamos à courants alternatifs des mêmes constructeurs. Dans ce cas, l'armature est calée sur le prolongement de l'arbre de l'alternateur; les paliers et le socle sont donc supprimés, et la carcasse de l'inducteur est réduite au cadre rectangulaire, avec ses quatre pôles et ses deux bobines inductrices. L'axe des bobines est placé verticalement et le cadre est porté par une console fixée contre l'un des paliers de l'alternateur.

153. **Dynamos multipolaires. — Dynamo Thury.** — Les machines multipolaires du système Thury sont à pôles conséquents; l'induit des génératrices à basse tension est à tambour, mais il est à anneau pour les tensions supérieures à 1500 volts (fig. 210). Le nombre des pôles inducteurs varie de 4 à 10 suivant la puissance; le type représenté sur le dessin ci-joint est à 6 pôles, nombre adopté pour les puissances de 30 à 300 kilowatts.

L'inducteur, d'une construction spéciale, présente dans son ensemble une carcasse de forme hexagonale dans le cas actuel. Il est constitué par six plaques de fer *r* disposées

bout à bout et recouvertes, sur la plus grande partie de leur longueur, par les bobines plates d'excitation *b* (fig. 211).

Les pièces polaires de même métal *p*, sont forgées de manière à s'ajuster exactement dans les angles intérieurs

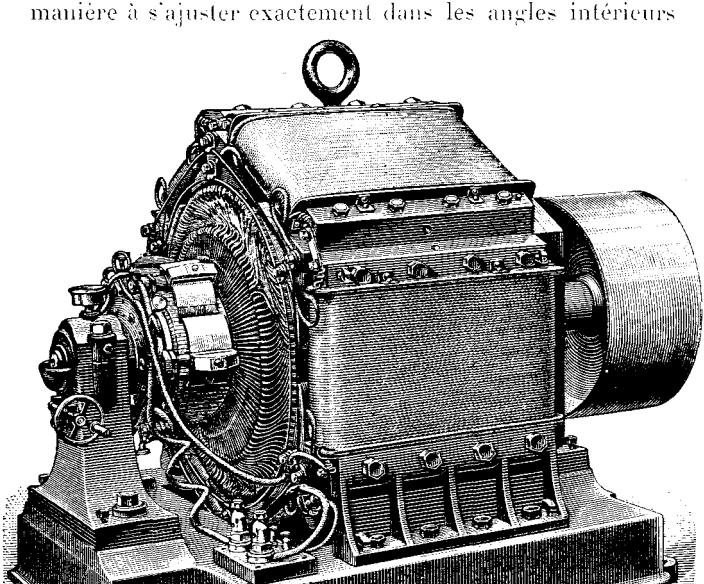


Fig. 210. — Dynamo Thury.

du polygone et servent ainsi à raccorder deux à deux les extrémités non recouvertes des noyaux d'électros, qui sont fixées par de fortes vis sur ces pièces polaires. Celles-ci se terminent par de larges épanouissements qui viennent embrasser la plus grande partie de la périphérie de l'induit.

Cette carcasse magnétique repose directement sur deux cornières en bronze K, boulonnées sur le socle en fonte de la machine. Cette disposition a pour but de prévenir les

dérivations du flux magnétique qui pourraient se fermer à travers la masse de fonte inférieure.

Le socle S a la forme d'un cadre rectangulaire évidé au centre, pour y laisser pénétrer les bobines inférieures de la carcasse magnétique. Dans les machines de 30 kilowatts

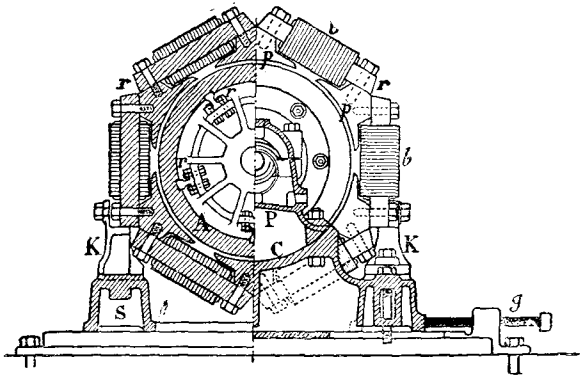


FIG. 211. — Dynamo Thury (coupe transversale).

et au-dessus, comme celle qui est représentée ci-contre, ce bâti porte trois paliers, dont deux sont placés sur le cadre supportant l'électro et le troisième sur un prolongement du bâti non évidé B.

Comme le montre la demi-coupe transversale de droite, la fonte du bâti se relève au droit des paliers, pour former une chaise cylindrique C sur laquelle vient s'ajuster le palier proprement dit P fixé par deux boulons. Le joint des deux pièces étant formé par le contact de deux surfaces cylindriques, concentriques à l'induit, le centrage des paliers se fait exactement par rapport à l'axe (fig. 211).

Ce bâti est porté par trois glissières, dont deux sont munies de vis de pression *d* pour régler la tension de la courroie motrice ; le bâti est d'ailleurs maintenu sur chacun des rails tendeurs par deux boulons *e* dont les têtes s'engagent dans la rainure longitudinale des rails.

Les coussinets en bronze de grande étendue, pour réduire

l'usure au minimum, sont lubrifiés par des anneaux mobiles *i* baignant dans l'huile. Des rainures circulaires ménagées aux extrémités desdits coussinets, emmagasinent une certaine quantité d'huile qui vient encore améliorer le graissage.

L'armature en fer de l'induit A est constituée par des feuilles de tôle minces. Le manchon ainsi construit est sup-

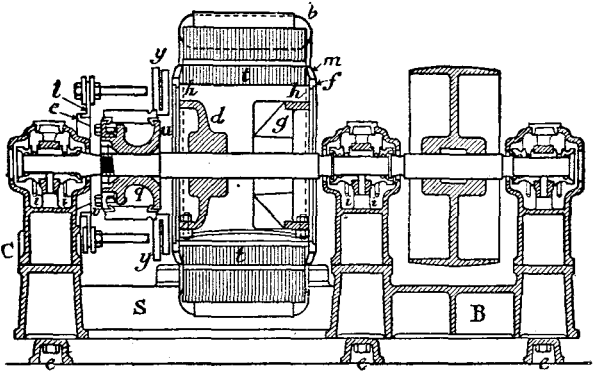


FIG. 212. — Dynamo Thury (coupe longitudinale).

porté par cinq rails *r* disposés parallèlement à l'arbre et vissés sur les bords de deux pièces en fonte dont les moyeux sont calés sur l'arbre (fig. 212). L'un de ces supports *d*, celui de gauche, est un plateau creux, dont la concavité est tournée vers l'extérieur et qui laisse entre ses bords et la surface intérieure de l'armature, un vide utile à la ventilation; celui de droite *g* est un anneau de fonte relié à son moyeu par des nervures en forme d'ailettes, formant croisillon et ventilateur pour refroidir l'induit.

Les rails qui soutiennent l'armature sont vissées comme nous l'avons dit sur les bords du plateau et du croisillon par l'intermédiaire de pattes en bronze, afin d'isoler magnétiquement l'armature des moyeux et de l'arbre. Ces rails pénètrent dans des rainures ménagées suivant la

génératrice intérieure du cylindre induit, afin d'obvier au glissement de l'anneau sur ses supports.

Le serrage des tôles formant l'armature s'effectue de la façon suivante : les rails longitudinaux présentent à leurs extrémités, en saillie sur les deux bases de l'induit, une échancrure dans laquelle pénètre un anneau d'acier brisé, dont les deux sections sont maintenues par un anneau complet en bronze; la pile de tôle *t* formant l'armature est prise entre deux anneaux d'acier *h* découpés au même gabarit et amincis en biseau sur les bords: tout cet ensemble est saisi et serré entre les extrémités des rails par le système d'anneaux brisés, sertis par les anneaux de bronze.

La figure montre également le détail de construction du collecteur *q*; la douille en fonte *u* est coïncée sur l'arbre à l'aide de deux bagues coniques et d'un écrou fileté en acier; le serrage des lames du collecteur s'effectue à l'aide d'un plateau à bords biseautés *r*, relié par des vis de rappel à la bride circulaire portée par la douille.

Chaque lame porte un trait de scie dans lequel s'engage une lame de cuivre en U, à branches inégales *y*, où viennent se souder respectivement les bouts commençant et finissant de chaque groupe de bobines voisines.

Les balais sont généralement en charbon: les trois paires de balais, nombre égal à celui des paires de pôles, sont portés comme à l'ordinaire par un anneau *l*, monté sur une douille qui est fixée contre l'un des paliers, dans une position concentrique à l'axe de la machine.

Cette dynamo, très robuste et bien proportionnée dans toutes ses parties, constitue un des types les mieux étudiés des machines à courants continus et jouit de la réputation la mieux méritée.

154. **Dynamo Farcot**. — Le type ci-contre de 160 kilowatts présente un inducteur à six pôles, et un induit à tambour de $1^{m}16$ de diamètre (fig. 213). La carcasse inductrice est constituée par un anneau en fonte A, en deux parties raccordées suivant le diamètre horizontal, par des rebords *b* parfaitement dressés et boulonnés avec soin.

Les noyaux d'électros *n*, en acier coulé, sont rapportés, et

fixés radialement à l'intérieur de la culasse annulaire par deux fortes vis, ils s'épanouissent du côté intérieur, pour fournir les pièces polaires embrassant l'induit.

Les bobines *f* à enroulement compound sont glissées sur les noyaux avant que ceux-ci ne soient mis en place; elles se trouvent alors maintenues solidement entre la face intérieure de l'anneau et la pièce polaire.

Ici il n'y a pas

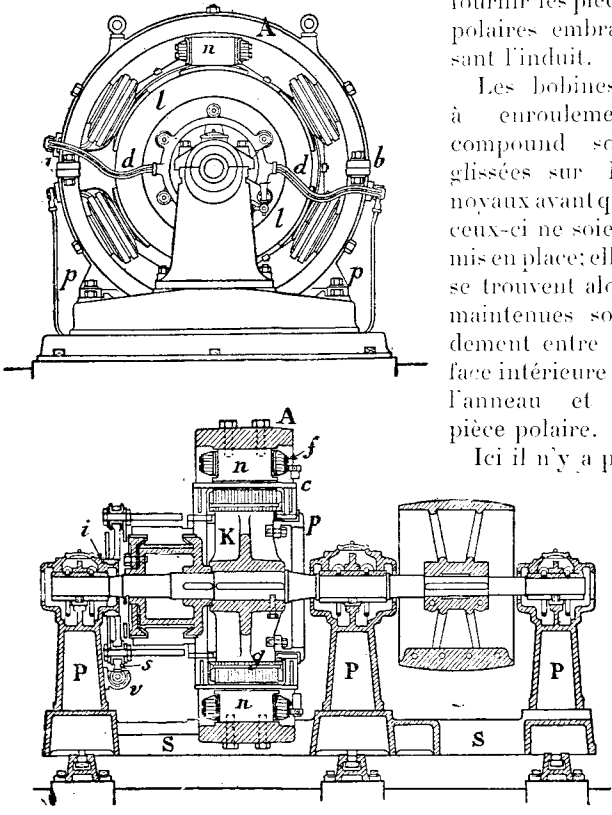


FIG. 213. — Dynamo Farcot en élévation et coupe.

de pôles conséquents, chaque pièce polaire étant excitée par une seule bobine inductrice; les flux magnétiques se bifurquent néanmoins de part et d'autre de chacun des pôles. Le système inducteur repose sur le socle au moyen de deux patins *p* fixés par quatre boulons.

Le double cadre évidé formant socle S, supporte trois paliers P à doubles bagues lubrifiantes ; la partie basse de la carcasse des électros pénètre dans l'évidement du cadre correspondant, de manière à abaisser le centre de gravité du système, comme précédemment.

L'induit est formé d'un noyau feuilleté g constitué par des tôles d'acier doux, prises entre deux plaques de fer latérales l ; le tout est maintenu et serré par des boulons. Cette armature est montée sur les bras d'un croisillon K dont le moyeu est claveté sur l'arbre.

Sur la surface extérieure recouverte d'une enveloppe isolante est disposé l'enroulement induit du système Siemens, comportant des barres de cuivre c reliées sur les faces du tambour par des pièces en U, suivant le mode adopté pour ce genre d'enroulement.

Du côté droit, un plateau à gorge p, vissé sur le croisillon, permet d'effectuer les connexions voulues, en dehors de la zone occupée par l'arbre. Sur le côté gauche, les différentes bobines sont reliées aux lames du collecteur.

L'anneau du porte-balais, monté sur une douille à gorge t, portée par le palier voisin du collecteur, est pourvu d'un secteur denté s, qui engrène avec une vis sans fin ajustée sur la chaise du palier. Les balais, au nombre de six, sont reliés par groupes de trois en quantité, par des barres de connexion en cuivre.

Le courant issu du groupe de balais positifs est conduit par un double câble souple, aux bobines de l'enroulement en série, puis se rend à la borne fixée sur le bâti des électros ; la seconde borne, placée dans une position symétrique, est reliée de même au pôle négatif de la dynamo.

155. **Dynamos multipolaires d'Oerlikon.** — La machine à six pôles de 100 kilowatts, *représentée ci-contre* (fig. 214), rappelle par sa disposition générale celle décrite ci-dessus

La culasse circulaire de l'inducteur enveloppant entièrement les noyaux excitateurs avec leurs pièces polaires, la dispersion magnétique à l'extérieur de la carcasse est très faible et sans influence sensible sur les chronomètres.

Le socle, très robuste, présente des méplats en saillie

parfaitement dressés, sur lesquels s'ajustent les chaises des paliers et les talons venus de fonte à la base du bâti des électros.

L'induit à tambour comporte une armature à rainures

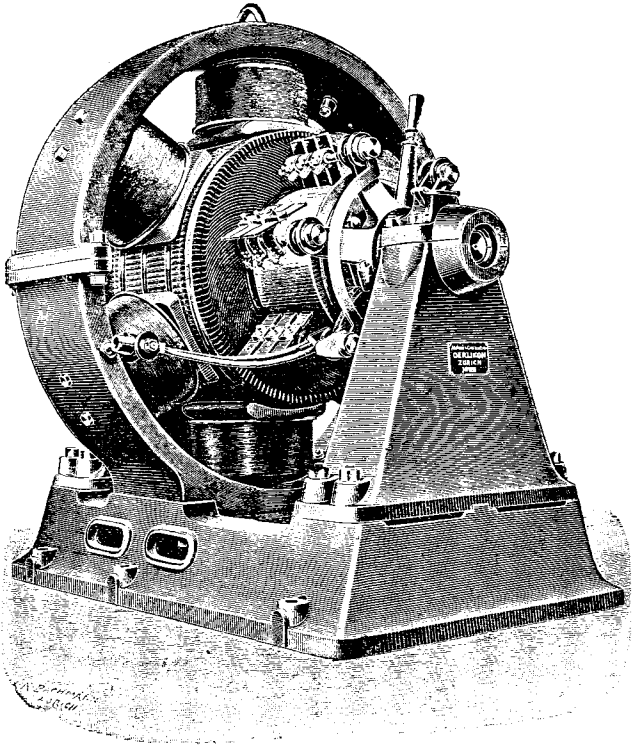


Fig. 214. — Dynamo multipolaire d'Oerlikon.

profondes dans lesquelles s'engagent les conducteurs nduits parfaitement isolés.

L'arbre de la machine est en acier, les tourillons sont trempés afin d'augmenter leur résistance à l'usure; les paliers sont pourvus d'un système de graissage automatique.

Ce type de dynamo peut être monté directement sur l'arbre vertical d'une turbine motrice (fig. 215) : dans ce

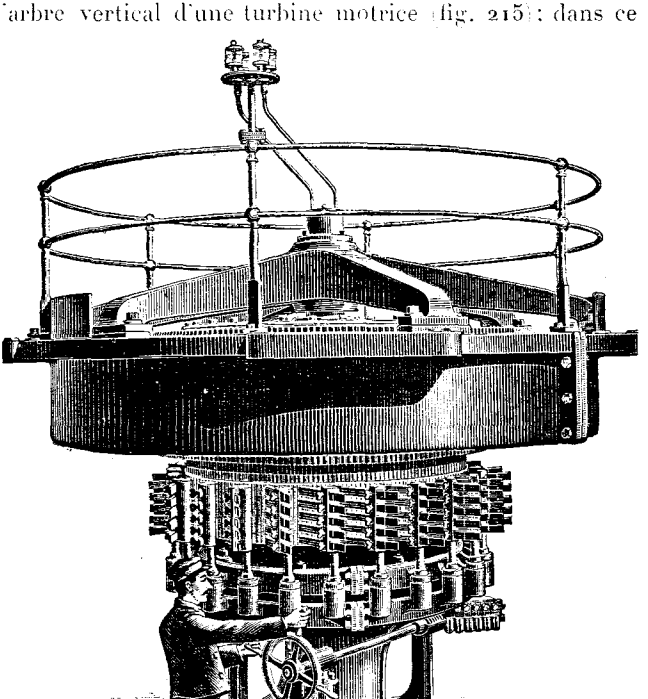


Fig. 215. — Dynamo d'Oerlikon à axe vertical.

cas, la couronne en fonte servant de culasse générale est surmontée d'un croisillon à plusieurs bras, formant palier destiné à guider la partie supérieure de l'arbre. La dynamo

représentée est employée dans les opérations métallurgiques ; son inducteur comporte 24 pôles et le courant débité atteint 7500 ampères sous 55 volts.

156. **Dynamos Alioth.** — Le type à quatre pôles et induit en tambour, qui est représenté ci-contre, correspond à une machine de la puissance de 9600 watts à 125 volts, tournant à 1000 tours par minute.

L'inducteur de la dynamo Alioth (fig. 216) est d'une

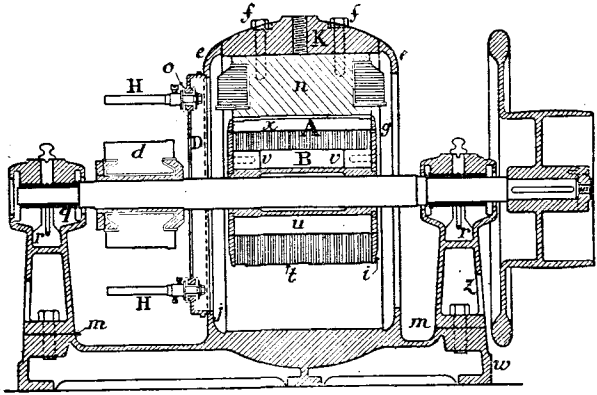


FIG. 216. — Dynamo Alioth (coupe longitudinale).

construction tout à fait spéciale. La carcasse cylindrique K formant culasse générale, épaisse dans la partie médiane, s'amincit et se recourbe sur les bords, pour former un encadrement protecteur *e* de forme circulaire, sur les deux faces du tambour. Quatre fenêtres allongées *a* sont ménagées dans la fonte de ces rebords pour permettre la ventilation intérieure.

Du côté de la poulie, l'enveloppe est complétée par une plaque bombée en tôle perforée *n*, qui vient se fixer sur les bords du cadre ; la dynamo est également fermée du côté du collecteur *d*, comme nous le verrons tout à l'heure. Il résulte de cette construction que la masse extérieure de la machine se présente sous l'aspect d'une carcasse à peu près sphérique.

Dans le modèle représenté ici, la carcasse du système inducteur est venue de fonte avec le socle général de la dynamo; pour des machines plus puissantes, la culasse est constituée par deux pièces de fonte, reliées par deux brides horizontales, serrées par des boulons.

Les noyaux en fonte des électros *n* sont rapportés et fixés sur la face intérieure cylindrique de la culasse, par deux vis *f* dont les têtes sont en parties noyées, pour diminuer leur saillie à la surface extérieure. A cet effet, ces

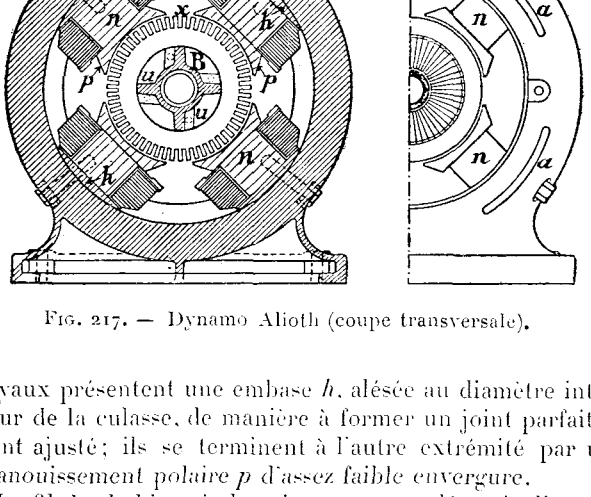


FIG. 217. — Dynamo Alioth (coupe transversale).

noyaux présentent une embase *h*, alésée au diamètre intérieur de la culasse, de manière à former un joint parfaitement ajusté; ils se terminent à l'autre extrémité par un *épanouissement polaire p d'assez faible envergure*.

Le fil des bobines inductrices est enroulé, soit directement sur le noyau, soit avec interposition d'une bobine de bois *g* ou de métal, en deux parties reliées par une couronne inférieure *l* (fig. 217).

Les supports des paliers sont ici à joints cylindriques *m*, ils sont fixés par une seule vis très robuste, sur des chaises W, *venues de fonte, en saillie sur le socle général et présentant* une surface cylindrique concentrique à l'arbre de

l'induit. Les paliers sont évidés latéralement en z pour permettre l'accès de la vis placée intérieurement. Ils sont munis de coussinets en bronze q et de bagues lubrifiantes r qui plongent dans le réservoir d'huile ménagé à la partie supérieure : celui-ci est pourvu d'un tube de niveau latéral où l'huile doit affleurer au moment du garnissage.

L'armature de l'induit A est constituée par 450 feuilles de tôle de 0,5 millimètres d'épaisseur ; elle a pour dimensions 248 millimètres de diamètre et 250 millimètres de longueur. Les disques sont dentés et les barres de cuivre de l'enroulement en tambour sont encastrées dans les rainures x de 5 millimètres de largeur sur 20 de profondeur.

L'armature est portée sur un manchon en bronze B calé sur l'arbre. Ce manchon présente quatre ailettes longitudinales u, qui règnent sur toute la longueur de la pièce. La pile de tôles enfilée sur le manchon est serrée sur les deux faces du tambour par des plateaux en bronze t, au moyen de vis pénétrant dans les extrémités élargies des ailettes v.

L'armature n'est pas construite d'un seul bloc, mais de piles de tôles séparées par des intervalles de 3 millimètres t, qui laissent entre les différentes parties du tambour des espaces annulaires utilisés pour la ventilation ; ces espaces correspondent aussi avec le vide intérieur des tôles u, ce qui permet un courant d'air très favorable au refroidissement de l'induit.

Le porte-balais mérite une mention spéciale ; c'est une sorte de couvercle en fonte, évidé en son centre, qui présente sur le pourtour une nervure laissant un bord libre de 8 millimètres. Ce bord s'engage en partie dans une feuillure j que présente l'évidement de la carcasse sphérique. Cette pièce, maintenue par deux flasques fixées par des vis traversant des boîtes à ressort, peut ainsi coulisser dans la feuillure, afin de faire varier le calage des balais. Une tôle perforée vient obturer le vide compris entre la pièce dont il s'agit et l'arbre de la machine.

Les balais, au nombre de quatre, sont fixés sur des tiges H, qui s'engagent dans des douilles dont la tige filetée

est boulonnée sur le porte-balais D qu'elle traverse, par l'intermédiaire d'une bague isolante *o*. Les lames du collecteur, au nombre de soixante-trois, dans le modèle décrit; sont isolées à la micanite.

La maison Alioth construit des machines de ce genre jusqu'à la puissance de 340 kilowatts.

157. Dynamo Alioth excitatrice. — Nous décrirons ici, bien qu'elle appartienne au système bipolaire, la dynamo excitatrice du même constructeur.

Le modèle ci-contre (fig. 218), destiné à fournir le courant continu d'excitation à une machine, à courants alternatifs ou alternateur de 100 chevaux, est une excitatrice de 1700 watts, donnant un courant de 24 ampères sous la tension de 70 volts.

L'inducteur appartient au type cuirassé; il est bipolaire, mais ne présente qu'une seule bobine, de grande dimension d'ailleurs. La carcasse est un cadre en fonte, rectangulaire, à angles arrondis, qui porte la pièce polaire supérieure faisant corps avec lui.

Le noyau vertical portant la bobine présente une base élargie, par laquelle cette pièce repose sur le côté inférieur du cadre, et se termine à la partie supérieure par un large épanouissement polaire. Le noyau est fixé sur la face intérieure du cadre par deux vis, dont les têtes sont logées dans un évidement pratiqué en dessous de la cuirasse. Celle-ci repose sur une console de fonte, qui se rattache au bâti de la machine principale par un joint cylindrique concentrique à l'arbre; elle y est maintenue invariablement par deux fortes vis.

Une planchette en bois, vissée sur la partie supérieure de la cuirasse, reçoit les bornes de connexions de la machine.

L'induit en tambour, à noyau feuilleté et crénelé, a une longueur de 180 millimètres et un diamètre de 200; l'entrefer est seulement de 3 millimètres.

Cette armature est montée sur le prolongement même de l'arbre de l'alternateur, par l'intermédiaire d'un manchon calé sur cet arbre. Ce manchon se prolonge au delà

de l'induit, par une partie de plus faible diamètre, placée en porte-à-faux à l'extrémité de l'arbre.

L'armature est enfilée sur la première partie, et la

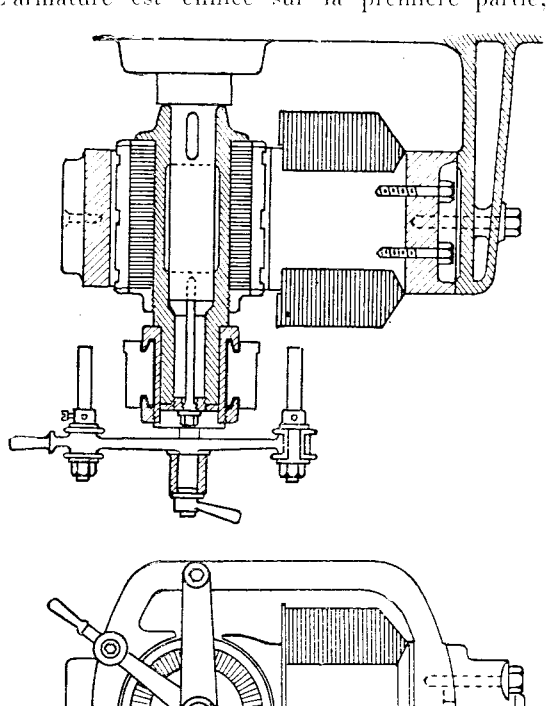


Fig. 218. — Excitatrice Alioth (coupe longitudinale et élévation).

pile de tôles, butée à droite contre une bride, est serrée à gauche par un anneau vissé sur une partie filetée du manchon. La partie antérieure, en encorbellement, porte de collecteur à cinquante-huit lames, qui ne présente rien le particulier.

L'extrémité du manchon est fermée par un bouchon à vis, qui est traversé en son centre perforé, par un long boulon qui va se visser à l'extrémité de l'arbre et empêche le manchon de glisser sur celui-ci. En dévissant ce boulon on peut retirer le manchon avec l'induit et tous les organes qu'il supporte.

Les deux balais sont portés aux extrémités d'un levier dont l'axe de rotation pénètre dans la douille d'un bras transversal, supporté par deux tiges qui sont vissées sur les côtés verticaux du cadre inducteur. Une fois le calage obtenu, on maintient les balais en place, en serrant l'écrou à manette qui se visse sur l'axe du porte-balais.

Comme on le voit, cette machine, de construction très simple, est des mieux combinées ; elle présente de grandes facilités pour le montage et le démontage, conditions très favorables au bon fonctionnement et à l'entretien de la dynamo.

158. **Dynamo Siemens à induit extérieur.** — Cette dynamo est du type à pôles intérieurs logés dans l'armature de l'in-

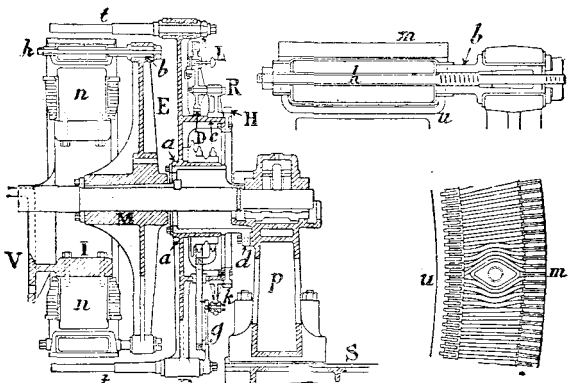


FIG. 219. — Dynamo Siemens (coupe longitudinale.)

duit. Ce type est surtout caractérisé par l'absence de collecteur ; les balais frottent directement sur les conducteurs

induits qui sont constitués par des barrettes de cuivre nues.

Le type de grande puissance, représenté ci-contre, est disposé pour être accouplé directement sur le moteur (fig. 219).

Le bâti ne présente donc qu'un seul palier extérieur *p*, et l'inducteur I, en porte-à-faux, est boulonné contre le socle de la machine à vapeur V qui l'actionne. Dans les dynamos moins puissantes, qui sont commandées par courroie de transmission, le bâti comporte deux paliers et l'un d'eux sert également de support à l'inducteur.

Cette dynamo comprend un inducteur à huit pôles. La carcasse magnétique est constituée par un moyeu creux en fonte ou en acier doux, à huit pans, sur lesquels viennent se fixer, par deux vis, autant de noyaux d'électros *n* en fer forgé, disposés suivant les rayons comme les branches d'une étoile.

Ces noyaux à section quadrangulaire se terminent par des épanouissements polaires *e*, qui donnent une très grande surface d'entrefer ; on obtient ainsi, par cette disposition d'électros intérieurs, un circuit magnétique très ramassé, dont la reluctance est réduite au minimum.

Les bobines excitatrices enroulées sur des carcasses en tôle sont enfilées, toutes prêtes, sur les noyaux, et se trouvent retenues par les épanouissements polaires.

Une flasque demi-circulaire V, venue de fonte avec le moyeu de la carcasse magnétique et renforcée par des nervures, sert à relier cette carcasse au bâti du moteur, comme nous l'avons indiqué ci-dessus.

L'induit est un anneau Gramme de grande dimension ; l'armature est constituée par des tôles d'acier doux, isolées au papier gomme-laqué ; chacune des couronnes est composée, vu l'importance de ces pièces, de plusieurs secteurs, assemblés de manière à croiser les joints des différentes couches composant l'anneau.

Cette armature est supportée par une étoile E en fonte, à vingt et un bras renforcés par des nervures (fig. 220), et dont le moyeu allongé M, calé sur l'arbre, pénètre avec lui dans le vide de la carcasse d'électros.

Chacun des bras porte, à son extrémité, une tige horizontale d'acier *h* qui entre dans les trous correspondants poinçonnés dans les tôles. Chaque tige d'acier est munie d'un manchon en bronze *b* qui s'engage dans l'œil ménagé à la partie supérieure du bras de l'étoile, et qui est garni intérieurement d'une gaine isolante. L'ensemble est maintenu par des rondelles de bronze et des écrous, qui effectuent le serrage à bloc des tôles fortement comprimées au préalable.

L'induit ainsi disposé est recouvert d'une couche de

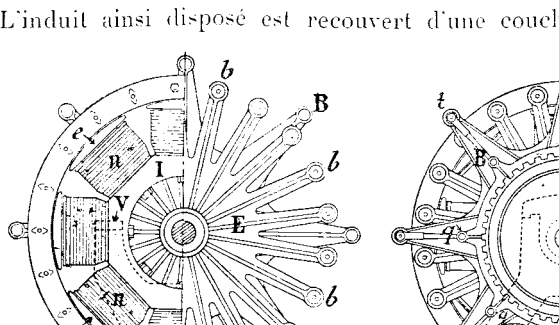


FIG 220. — Dynamo Siemens (élévation).

papier d'amiante et reçoit l'enroulement constitué par des lames de cuivre *mu* placées sur champ. La spire se compose d'une lame extérieure disposée suivant la génératrice du cylindre et d'une lame découpée dans une même feuille de cuivre suivant la forme d'un U très ouvert.

Pour former l'enroulement sans fin, à spirale, qui doit recouvrir l'induit, chaque barrette droite extérieure est soudée, par l'une de ses extrémités, à la branche de gauche d'un U et par l'autre extrémité à la branche de droite de l'U qui suit immédiatement. La surface extérieure est ensuite soigneusement tournée et c'est l'ensemble des bar-

rettes extérieures, notablement plus épaisses et plus hautes que les pièces en U, qui forme le collecteur lui-même.

L'isolement des spires est obtenu par l'interposition de gaines en papier spécial qui ne laissent à nu que la tranche extérieure des barrettes.

Le courant est recueilli par huit séries de balais, en nombre égal, d'une façon générale, à celui des pôles ; ces balais sont disposés sur un support spécial désigné sous le nom d'étoile porte-balais B.

Les huit branches de l'étoile se détachent radialement d'un plateau, évidé en son centre et garni sur les bords de l'évidement d'un cylindre formant moyeu *o* ; celui-ci est venu de fonte avec le plateau, de même qu'un second cylindre concentrique au premier *c*.

Le moyeu annulaire est bagué sur un cylindre *d* qui est boulonné, en porte-à-faux, sur le palier extérieur, à la manière de l'inducteur sur le bâti du moteur.

Les branches de l'étoile portent à leur extrémité les tiges *t* qui doivent servir de supports aux balais. Celles-ci traversent la douille supérieure de chaque bras, au moyen de deux bagues isolantes, et de manière à rester libres de tourner autour de leur axe.

Ce mouvement a pour but d'exercer une pression suffisante des balais contre l'induit, par l'intermédiaire des attaches élastiques, et d'abaisser ou de relever les balais à volonté. Cette manœuvre s'effectue d'un seul coup, pour tous les balais, grâce à un dispositif particulier.

A cet effet, un collier K portant six expansions radiales *q* est bagué sur le cylindre concentrique extérieur cité plus haut. A chacune des expansions radiales vient se rattacher par une articulation isolante, une biellle *g* fixée à l'extrémité de la tige porte-balais correspondante. Toutes ces tiges sont donc rendues solidaires du mouvement de rotation qui peut être imprimé au collier.

Le levier de commande L de ce mouvement est articulé sur une expansion supplémentaire R du collier ; le petit bras opposé au bras de la manette se termine par un secteur denté, en prise avec une crémaillère circu-

laire D fixée sur la surface du cylindre portant le collier.

En appuyant sur le levier, celui-ci s'incline le long d'un arc fixé sur deux branches voisines de l'étoile, et fait décrire un certain angle au collier; les bielles sont alors inclinées toutes dans le même sens et font tourner les tiges supportant les balais, soit pour rapprocher ceux-ci de l'induit, soit pour les isoler en les écartant de la machine.

L'ensemble de l'étoile peut aussi osciller autour de son axe afin de faire varier le calage des balais. Pour effectuer cette commande, le cylindre concentrique au moyeu, porte, boulonnée sur ses bords, une couronne dentée H qui engrène avec un pignon, monté sur le même arbre qu'une roue dentée actionnée par une vis à volant. L'arbre et la vis sont portés par une chaise boulonnée sur le palier extérieur *p*. Ce dernier est muni de coussinets noyés dans une boîte à huile. Il est boulonné sur un socle à glissières S, ce qui permet de l'écarter avec tout le système du porte-balais, de manière à pouvoir démasquer l'induit pour le vérifier et le réparer au besoin.

Ce système de construction permet de donner un très grand développement à l'induit, sans accroître démesurément le volume et le poids de l'inducteur. On obtient ainsi la vitesse périphérique nécessaire à l'induction, avec des vitesses angulaires très réduites, ce qui permet en dernière analyse de commander directement la dynamo par le moteur, sans exiger de celui-ci un nombre de tours par minute trop exagéré.

La Société alsacienne de constructions mécaniques de Belfort a construit pour l'usine du quai de Jemmapes, à Paris, des dynamos de ce système d'une puissance de 750 kilowatts, soit de 1000 chevaux, pouvant fournir un courant de 1500 ampères, sous la tension de 500 volts.

Le système inducteur de cette machine a 12 pôles, l'étoile porte-induit a 39 bras, et l'étoile porte-balais, de 12 branches, a 4,5 mètres de diamètre.

Nous donnons les constantes de ces dynamos d'après *l'Industrie électrique* :

INDUIT :

Vitesse angulaire, en tours-minute	70
Diamètre extérieur de l'anneau, en mètres.	3,81
Diamètre intérieur de l'anneau	3,42
Vitesse linéaire à la périphérie de l'anneau en mètres-seconde	14 »
Différence de potentiel aux balais, en volts.	500 à 600
Longueur de la génératrice de l'induit, en mètres	0,50
Section du fer de l'anneau, en cm^2	710
Nombre total de spires	2268
Section d'une spire en millimètres carrés.	60
Courant dans une spire de l'induit, en ampères.	125
Densité de courant en ampères par millimètre carré.	2
Résistance de l'enroulement à 40° c, en ohms	0,006

INDUCTEURS.

Section du fer des noyaux, en cm^2	2100
Section de l'acier dans la culasse, en cm^2	1100
Longueur du noyau, en cm.	45
Surface polaire, en cm^2.	3600
Entrefer en cm.	4
Courant maximum dans l'inducteur, en ampères.	25
Résistance totale des bobines, en ohms.	24
Section du fil, en mm^2.	21
Densité du courant en ampères par mm^2	1,2
Puissance maximum dépensée dans l'excitation, en watts	1500

PUISSANCES, RENDEMENT.

Puissance disponible dans le circuit extérieur, en kw, 750.

Puissance dépensée dans la machine :

Effet Joule, inducteur, RI^2 en kw.	1	22,3
Effet Joule, induit, RI^2 en kw.	13,5	
Hystérésis	6,8	
Courants de Foucault	1	

Rendement électrique, en pour 100, $\frac{750}{772,3} = 97$

159. **Dynamo Schuckert à anneau plat.** — Cette dynamo, construite par la maison Henrion, de Nancy, est du type à anneau plat.

Ce qui caractérise l'enroulement de ce système, au point de vue électrique, c'est que, dans la spire de l'anneau plat,

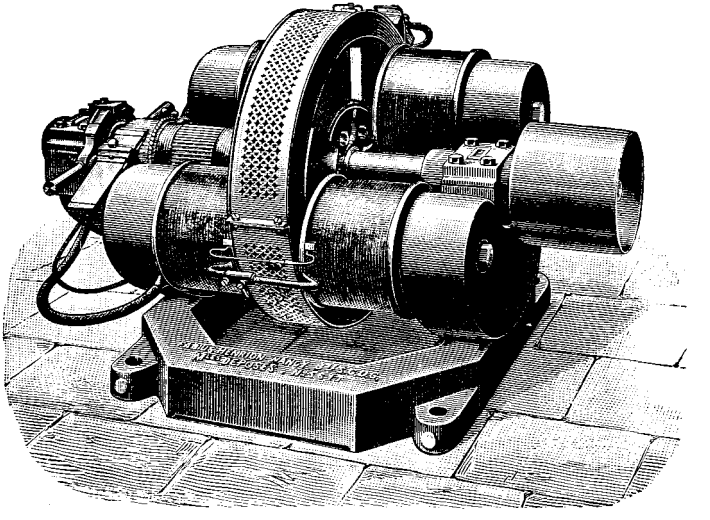


Fig. 221. — Dynamo Schuckert.

ce sont les fils radiaux menés sur les faces de l'anneau qui constituent les conducteurs actifs, siège de la force électro-motrice d'induction. Les fils induits se déplacent donc en tournant dans deux plans perpendiculaires à l'axe de rotation, qui sont les faces de l'armature.

Cette disposition exige que le flux de force inducteur soit parallèle à l'axe, ce qui détermine la forme du système des électros fig. 221.

Ceux-ci, dans la machine bipolaire représentée, sont constitués par deux groupes de pôles, nord et sud, placés de part et d'autre de l'armature. Le flux magnétique est dirigé normalement sur l'induit et forme deux

circuits fermés à travers la demi-épaisseur de l'anneau.

Le socle, venu de fonte avec les deux culasses qui portent aussi les paliers, est de forme octogonale, évidé au centre pour y loger la partie inférieure de l'induit.

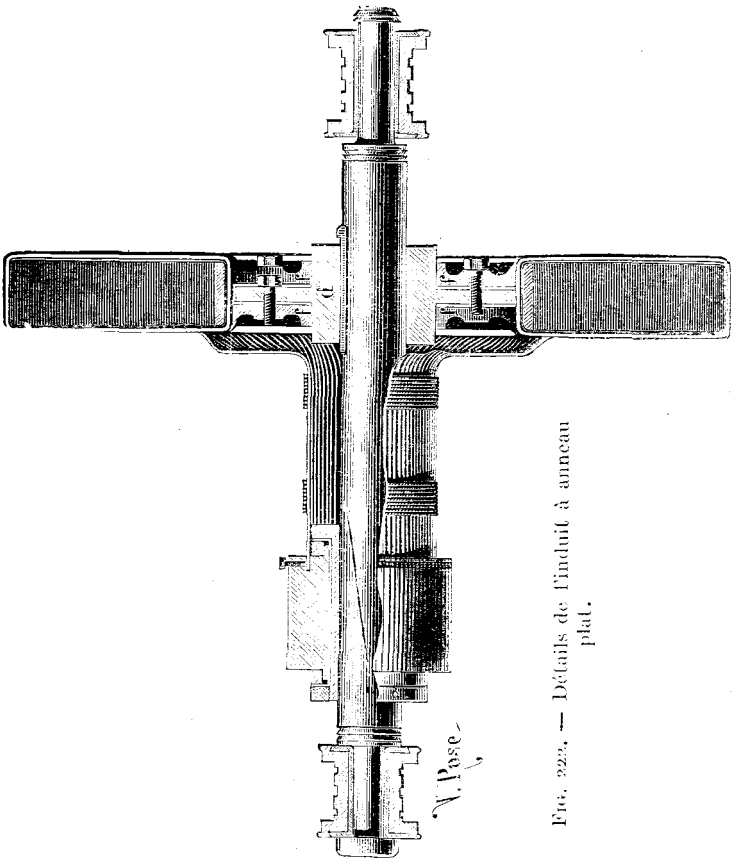


Fig. 223. — Détails de l'induit à anneau plat.

Grâce à cette disposition, l'arbre, l'induit et le collecteur sont découverts et facilement accessibles; il suffit de

dévisser les chapeaux des paliers pour retirer l'armature et son arbre.

Les noyaux des bobines inductrices, en fer forgé, sont pourvus de larges expansions polaires qui embrassent un arc étendu de l'armature, assurent une large section au passage du flux dans l'entrefer et réduisent ainsi la reluctance du circuit au minimum.

Le noyau induit est formé par une spirale de fer feuillard enroulée sur un fort anneau de laiton *a;* les différentes spires sont vernies et isolées l'une de l'autre par du papier parcheminé (fig. **222**).

On remarquera que les plans de séparation des spires sont parallèles à l'axe et, par suite, perpendiculaires à la direction des forces électro-motrices de Foucault, donnée par la direction même des fils radiaux.

Cette armature est montée sur un plateau en bronze dont le moyeu *d* est calé sur l'arbre à l'aide d'une clavette. Le centrage et le calage de l'induit sur le plateau se fait au moyen de pièces *f*, qui sont exactement tournées de manière à opérer le coïncage voulu entre l'anneau et le moyeu, et qui viennent se visser à cet effet sur le disque du plateau.

L'enroulement de l'induit est constitué par des bobines indépendantes, toutes semblables et, par suite, interchangeables, condition très favorable pour la facilité de l'entretien. La figure montre clairement le mode de connexion des bobines aux lames du collecteur.

Les fils de raccordement, repliés parallèlement à l'axe, se rattachent aux lames du collecteur par des vis de serrage. Il est ainsi très facile, en desserrant lesdites vis, de retirer le collecteur et de lui en substituer un autre, quand il est nécessaire.

Les machines puissantes sont multipolaires. L'inducteur comporte deux flasques annulaires en deux parties, portant chacune une couronne de noyaux d'électros; ces deux flasques sont réunies par deux boulons à leur partie supérieure.

L'induit à disque se prête à la construction d'armatures

de grand diamètre, car l'utilisation des fils radiaux augmente avec les dimensions de l'anneau. On peut ainsi obtenir de grandes vitesses de translation des fils induits dans le champ magnétique, avec des vitesses angulaires réduites; de plus l'anneau, très développé, constitue un véritable volant pour régulariser la vitesse.

160. Dynamo à disque Desroziers. — L'induit à disque se distingue de l'induit à anneau plat par son enroulement, qui est constitué par des boucles fixées sur les faces du plateau, formant ainsi des bobines plates qui tournent dans des plans normaux à l'axe.

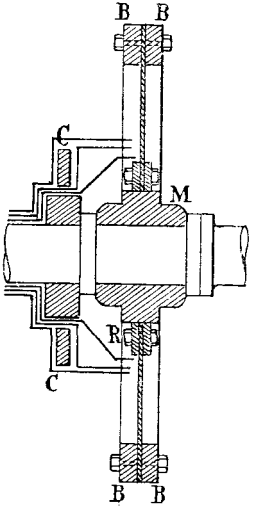


FIG. 223. — Connecteur de l'induit Desroziers.

Nous avons décrit, avec détail, l'enroulement de l'armature Desroziers dans le chapitre VI. On se rappellera que les bobines sont montées alternativement sur deux disques de carton, fixés eux-mêmes sur l'une et l'autre face d'un plateau, de maillechort (fig. 223).

Ce plateau, évidé en son centre, est boulonné entre la collerette du moyeu M et une rondelle de fer R; en outre, deux couronnes de bronze B B, fixées par des boulons sur ses bords, assurent sa rigidité. *Le connecteur* qui sert à faciliter le montage des connexions des bobines au collecteur, est figuré en C. C'est un plateau isolant, sur les faces duquel se développent les fils de connexion qui vont d'une section de l'induit aux lames du collecteur, situées à 120 degrés de part et d'autre de cette section.

L'inducteur est constitué par deux couronnes de six électro-aimants portées par deux flasques, supportées par des patins boulonnés sur un socle général en fonte. Ces

deux flasques sont reliées à la partie supérieure, par une traverse en fonte qui est utilisée pour supporter une planchette d'accouplement des circuits (fig. 224).

Les pôles des électro-aimants, dont les noyaux sont fixés par de forts boulons sur les flasques, sont alternativement de nom contraire sur une même flasque ; il en est de même de deux pièces polaires se faisant vis-à-vis.

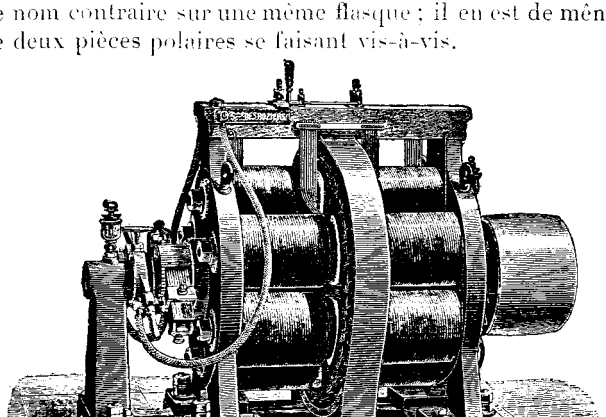


Fig. 224. — Dynamo Desroziers.

Le système inducteur présente ainsi six champs magnétiques, dont les lignes de force traversent normalement les plateaux induits, d'un pôle d'une flasque à celui qui se trouve en regard sur l'autre flasque.

Le peu d'épaisseur de l'induit permet au flux de traverser l'entrefer sans interposition d'une armature magnétique ; on évite ainsi les pertes d'énergie par hystérésis ; quant à celles dues aux courants de Foucault, elles sont très atténuées par la résistance propre du plateau de maillechort qui, d'ailleurs, est convenablement découpé, pour interrompre les circuits de ces courants.

Les chaises des paliers sont boulonnées sur le socle.

Dans les machines de faible puissance, l'un des paliers est venu de fonte avec celle des flasques placée du côté opposé au collecteur. Les machines plus puissantes ont deux et trois chaises boulonnées sur le socle. Pour ces dernières, les flasques sont formées de deux secteurs demi-circulaires, qui viennent se relier, suivant le diamètre horizontal, par des pattes venues de fonte sur les faces extérieures.

Le porte-balais, monté sur une douille que porte le palier voisin du collecteur, est muni de deux poignées de manœuvre, et le collier amené dans la position de calage, se fixe sur la douille par une vis de serrage.

Le disque de l'induit Desroziers pouvant être très grand, on peut réduire beaucoup la vitesse angulaire; d'autre part, l'absence du fer dans l'induit, qui supprime le dégagement de chaleur dû au travail d'hystérésis et la ventilation très énergique des fils, permet d'augmenter la densité du courant dans l'enroulement induit, sans crainte d'élever la température au delà de la limite compatible avec la conservation de la machine.

La faible vitesse de rotation relative permet d'accoupler directement, par un manchon élastique, la dynamo avec le moteur.

La maison Bréguet, qui construit ces machines, en livre couramment de 15 à 350 kilowatts.

CHAPITRE IX

LES COURANTS ALTERNATIFS

161. **Nature des courants alternatifs.** — Les courants d'induction produits dans les machines industrielles sont toujours engendrés à l'état de courants alternatifs, dans les conducteurs induits qui constituent les circuits intérieurs de la dynamo.

Les courants continus, que l'on utilise dans les circuits extérieurs, sont issus des mêmes courants alternatifs que l'on transforme à l'aide d'un commutateur collecteur; celui-ci, comme nous l'avons vu, remplit la double fonction de redresser le courant, d'une part, de rendre son intensité constante, d'autre part.

Si au contraire les courants sont utilisés, sans transformation, tels qu'ils sont engendrés dans les circuits induits, c'est-à-dire à l'état de courants alternatifs, ils se présentent avec un caractère tout différent et donnent lieu à des phénomènes complémentaires, qu'il convient d'étudier d'une manière spéciale.

Ces courants sont nécessairement dus à des forces électromotrices de même nature, c'est-à-dire périodiques et alternatives, qui suivent un cycle complet de variations, s'élevant depuis la valeur nulle à un maximum, pour décroître ensuite jusqu'à s'annuler, puis croître en sens inverse, atteindre un maximum dans ce nouveau sens, décroître et revenir à zéro, puis recommencer une nouvelle période de variations et ainsi de suite.

Nous avons vu, dans le chapitre V, comment on peut représenter matériellement ces valeurs variables de la force électro-motrice, par les perpendiculaires abaissées des différents points d'un cercle sur le diamètre normal au champ inducteur et nous avons représenté *la force électro-motrice instantanée*, c'est-à-dire la valeur de cette force électro-motrice, à chaque instant, par l'expression :

$$e = \mathrm{E\ max} \times \mathrm{K}.$$

Ainsi que nous l'avons expliqué, K représente les diverses valeurs des ordonnées de la courbe des variations, exprimées en fractions du rayon du cercle sur lequel on compte la période cyclique, et ce coefficient fractionnaire varie entre 0 et 1, suivant l'angle dont a tourné le vecteur, à partir de l'extrémité de gauche du diamètre transversal au champ magnétique.

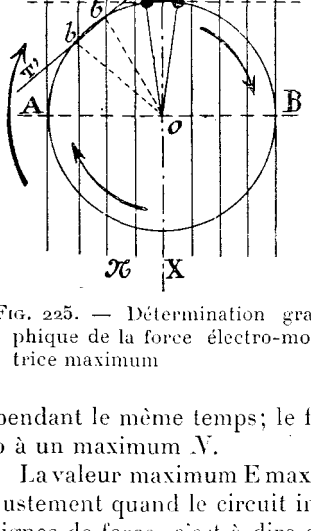


Fig. 225. — Détermination graphique de la force électro-motrice maximum

Cette force électro-motrice variable provient de ce que, dans ses diverses positions par rapport au champ inducteur, le circuit induit ne coupe pas un flux égal pendant le même temps; le flux *H* coupé varie lui aussi de 0 à un maximum *N*.

La valeur maximum E max. de la force motrice se produit justement quand le circuit induit coupe le maximum de lignes de force, c'est-à-dire quand il est à 90° de sa position initiale, soit au quart du cycle des variations.

Valeur de la force électro-motrice maximum. — Pour obtenir cette valeur maximum (fig. 225), nous remarquerons que le flux *N* du champ magnétique total correspond à la demi-circon-

férence de longueur π, parcourue dans le temps de la demi-période $\frac{T}{2}$.

Or, dans la position voisine de l'axe Y X, le mobile *a*, représentant le conducteur induit, se déplace suivant la tangente T G, avec la vitesse moyenne.

$$\pi : \frac{T}{2} = \frac{2\pi}{T}$$

Au moment considéré, le mobile *a* parcourt donc, par seconde, suivant T G, un chemin égal à $\frac{2\pi}{T}$; autrement dit il coupe $N \times \frac{2\pi}{T}$ lignes de force dans l'unité de temps, car le flux N étant réparti uniformément sur la droite T G, le flux coupé est proportionnel au chemin parcouru sur cette droite.

La force électro motrice maximum aura donc pour valeur :

$$E\ max. = \frac{2\pi}{T} \times N$$

Il en serait de même pour la force électro-motrice développée dans une spire, au moment où elle traverserait le plan de la ligne des pôles XY.

Si au lieu d'une simple spire, on a une bobine de N spires, la force électro-motrice totale maximum sera, pour la position similaire de la bobine :

$$E\ max. = \frac{2\pi}{T} \times N \times N$$

La valeur maximum de la force électro-motrice est une des valeurs instantanées *e*; de sorte que pour cette valeur spéciale, on aura toujours :

$$e = E\ max. \times K = \frac{2\pi}{T} \times N \times N \times K$$

Il en résulte que pour ce cas particulier K = 1 et, en effet, c'est bien la valeur de K qui correspond à cette position du conducteur, sur le diagramme.

Pour toutes les autres positions du mobile induit, K varie entre 0 et 1, comme nous l'avons vu.

En *b*, par exemple, le mobile marche toujours avec une vitesse $\frac{2\pi}{T}$, mais la direction de son déplacement n'est plus normale à la direction des lignes de force; le flux coupé

n'est plus proportionnel au chemin parcouru sur l'arc de cercle, ou plutôt, le flux uniformément réparti sur le chemin oblique $b\,b'$ est un flux réduit proportionnellement à la valeur correspondante de K; soit un flux $N \times K$ et nous retrouvons ainsi l'expression générale.

$$e = \frac{2\pi}{T} \times N \times N \times K = E\,max. \times K$$

L'expression $\frac{2\pi}{T}$ que l'on désigne souvent par le symbole ω (oméga) est égale à la vitesse angulaire ou au nombre de tours par seconde, dans le cas d'une machine bipolaire; c'est en effet l'angle parcouru par seconde.

C'est dans tous les cas, la fraction du cycle effectué par seconde et on lui donne en général le nom de *pulsation*.

On peut encore considérer cette expression comme le produit de la fréquence ou du nombre de périodes par seconde $\frac{1}{T}$, par 2π.

Unité d'arc, radian. — Cette quantité s'exprime en *radians par seconde*.

Le *radian* est l'unité d'arc adoptée pour la mesure des angles dans le système C G S. C'est l'arc de longueur égale au rayon dans la circonférence de 1 centimètre de rayon.

Il en résulte que la circonférence contient 2π radians correspondant à 360°.

D'où l'angle correspondant au radian :

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

On dira donc qu'un angle de 360 degrés vaut 2π radians; un angle de 180 degrés, π radians; un de 90 degrés, $\frac{\pi}{2}$ radians, etc.

162. **Différence de phases.** — Nous avons expliqué au chapitre V ce que l'on entend par courants déphasés ou présentant entre eux une différence de phases; la même différence, ou comme on dit le même *décalage* peut se présenter entre un courant et la force électro-motrice qui le produit, comme nous le verrons plus loin.

Pour bien mettre en évidence le mécanisme de cette

différence de phases, qui joue un rôle important dans l'électricité alternative, nous aurons recours au mode représentatif déjà adopté. Un vecteur tournant dans un cercle, comme l'aiguille d'une horloge sur un cadran, indiquera par ses positions successives les diverses fractions du temps périodique, et par ses projections sur l'axe NS (fig. 226), les valeurs correspondantes de la force électromotrice instantanée ou du coefficient K proportionnel à celle-ci.

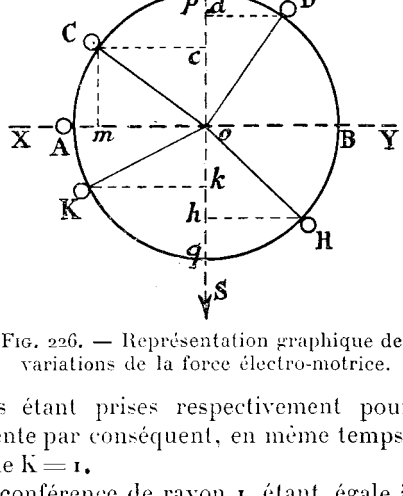


FIG. 226. — Représentation graphique des variations de la force électro-motrice.

Il est entendu que le rayon du cercle est égal à E max. ou I max, ces valeurs étant prises respectivement pour unité, et qu'il représente par conséquent, en même temps, la valeur maximum de K = 1.

D'autre part la circonférence de rayon 1 étant égale à 2π représente le temps périodique T.

Quand le vecteur est en OA, sa projection sur NS est nulle, d'où e ou i sont nuls et K = 0. A mesure que le vecteur s'élève en tournant dans le sens de la flèche, sa projection grandit sur ON et devient égale au maximum op, lorsque le vecteur a tourné de 90°; puis cette projection diminue; elle n'est plus que od pour la position OD du vecteur; elle s'annule quand le vecteur vient sur OB; puis grandit en s'abaissant de B vers S, dans le sens inverse ou négatif, diminue ensuite, se réduit à ok pour la position OK du vecteur et redevient nulle lorsque le vecteur de retour en OA, a accompli un cycle complet.

On voit que la force électro-motrice ou l'intensité alternative, oscille dans ses valeurs successives, le long de NS,

zéro de à *op*, de *op* à zéro et à *oq* en changeant de signe et de *oq* à zéro en terminant son cycle de variations.

Ainsi ces valeurs oscillent comme un pendule dont l'élongation serait égale à *op;* cette valeur maximum est également désignée sous le nom d'*amplitude de la quantité variable.* Supposons maintenant l'existence simultanée de deux courants ou de deux forces électro-motrices, ou d'un courant et d'une force électro-motrice, et pour fixer les idées prenons l'exemple de deux intensités de courants simultanés.

Si ces courants ont la même amplitude, ils pourront être représentés par un vecteur de même longueur et aussi par un vecteur unique s'ils sont en coïncidence de phase et si leurs cycles de variations sont de même période.

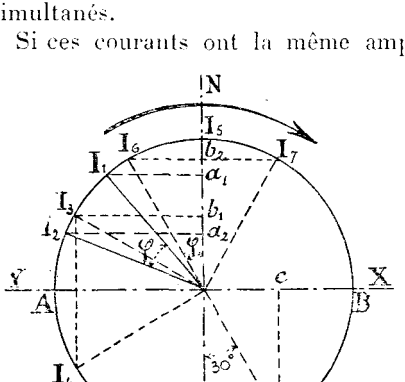


Fig. 227. — Vecteurs en phases différentes.

Mais s'il existe entre eux une différence de phase, c'est-à-dire si, en particulier, les valeurs zéro et les valeurs maxima du premier courant sont en avance sur celles du second, les vecteurs représentatifs ne se confondront pas et ils seront séparés par un arc représentant le décalage, ou la différence de temps correspondant à l'avance ou au retard de phase d'un courant sur l'autre (fig. 227).

Les vecteurs distants de l'angle $I_1\ o\ I_2$ que l'on désigne généralement par la lettre grecque φ (phi), tourneront en conservant toujours le même écart angulaire, puisque par hypothèse, ils accomplissent leurs cycles périodiques pendant le même temps. Ainsi lorsque $o\ I_2$ coïncidera avec $o\ A$

i_2 sera nul, mais i_1 aura déjà acquis une valeur positive qui dépend de l'angle φ et qui sera d'autant plus élevée que cet angle sera lui-même plus grand ; de même i_1 atteindra son maximum avant i_2.

Si nous remarquons que la circonférence 2π est parcourue dans le temps T, il faudra pour accomplir l'arc d'un radian, un temps $\frac{T}{2\pi}$ et pour l'arc φ ou de φ radians, un temps :

$$t = \frac{T}{2\pi} \times \varphi ;$$

t sera la valeur du temps correspondant à la différence de phase.

En prenant pour origine le moment où le vecteur en avance est sur O A, nous saurons que le vecteur en retard passera lui-même par la position de i_2 nul, après un temps t égal à la valeur ci-dessus.

Ramenons $o\,I_2$ sur $o\,A$, $o\,I_1$ fera toujours le même angle φ avec $o\,I_2$ et par suite avec $o\,A$; à cet angle φ correspondra pour i_1 une valeur de K égale à ob_1, que nous désignerons par M.

M sera donc la valeur particulière de K pour la position du vecteur faisant un angle φ avec l'axe d'origine, et l'intensité correspondante sera :

$$i_1 = I\,max \times K = Im. \times M$$

en désignant, pour simplifier, le maximum de I par Im.

Il est facile de voir qu'à chaque valeur de i_1 correspondra une valeur de i_2, qui pourra s'exprimer par la formule :

$$i_2 = Im \times (K \times \sqrt{1 - M^2} - M \times \sqrt{1 - K^2})$$

En effet, pour K = O, c'est-à-dire lorsque le vecteur $o\,I_1$ est sur $o\,A$, cette formule se réduit à :

$$i_2 = Im \times M$$

car alors $o\,I_2$ occupe la position $o\,I_4$ symétrique de $o\,I_3$ et les courants correspondants doivent être égaux et de signe contraire.

Pour $K = I_1$ correspondant au vecteur oI_5, le second vecteur sera en oI_6, faisant un angle φ avec oN ; la formule donnera alors :

$$i^2 = I_m \times \sqrt{1 - M^2}$$

ce qui se vérifie par l'égalité des triangles correspondant aux vecteurs oI_3 et oI_6.

Enfin, si l'on donne à K la valeur $ob_2 = \sqrt{1 - M_2}$, le vecteur oI_4 se trouve en oI_7 symétrique, de oI_6 et ce dernier vient sur oN, on doit donc avoir alors :

$$i_2 = I_m$$

et c'est en effet le résultat que l'on trouve lorsque l'on porte dans la formule la valeur $K = \sqrt{1 - M_2}$.

Un cas particulier à considérer est celui où l'angle de retard φ est égal à 90 degrés ou au quart de la circonférence.

Dans ce cas, la formule de i_2 se simplifie et devient :

$$i_2 = I_m \times \sqrt{1 - K^2}$$

Elle montre qu'aux valeurs maxima ou nulles de K correspondent inversement les valeurs nulles ou maxima de i_2.

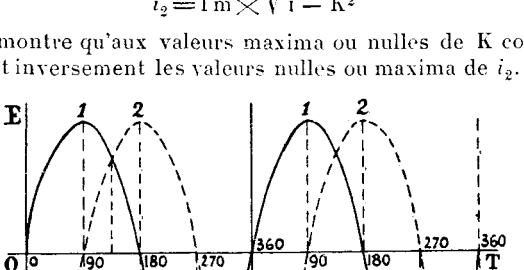


FIG. 228. — Courbes représentatives de deux courants décalés d'un quart de phase.

Ainsi lorsque le vecteur oI_1 est sur oA, $K = 0$, et $i_2 = -I_m$, car alors le vecteur oI_2 est sur oS.

De même, pour $K = 1$, oI_1 est sur oN et oI_2' sur oA, donc i_2 est nul, comme l'indique la formule.

On obtiendra alors les deux courbes représentatives (fig. 228) permettant de suivre les variations simultanées des

courants i_1 et i_2. On remarquera, en particulier, que i_2 est négatif lorsque i_1 croît positivement ou décroît négativement; qu'il est positif, au contraire, pour les valeurs décroissantes positives et croissantes négatives de i_1. Autrement dit, i_2 est de même signe que i_1 lorsque celui-ci décroît, et de signe contraire lorsqu'il va en croissant.

Ainsi le courant décalé de 90 degrés ou d'un quart de période, se conduit par rapport au second courant, comme la force électromotrice de self-induction par rapport au courant principal. Il faudra donc affecter le radical $\sqrt{1-K^2}$ du signe plus ou moins, suivant que i_1 croîtra ou diminuera.

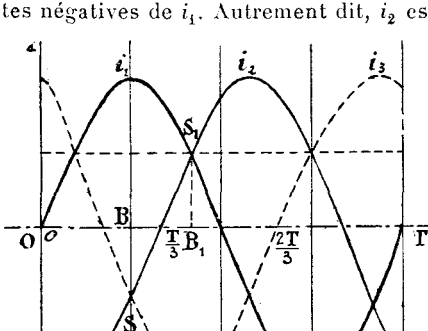


FIG. 229. — Courbes décalées d'un tiers de phase.

Les deux courbes se coupent en S, et ont en ce point une ordonnée commune K. On obtiendra évidemment la valeur de cette ordonnée en égalant les expressions de i_1 et i_2 :

$$\text{I m.} \times K = -\text{I m.} \times \sqrt{1-K^2}$$

D'où l'on tire :

$$K = -\sqrt{1-K^2} \text{ et } K = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$$

Considérons encore le cas particulier où l'angle φ, au lieu d'être égal à 90 degrés ou $\frac{\pi}{2}$, atteindrait la valeur $\frac{2\pi}{3}$ ou le tiers de la conférence cyclique (fig. 228).

L'expression de i_2 serait alors :

$$i_2 = -\frac{\text{I m.}}{2} \times \left(K + \sqrt{3(1-K^2)}\right)$$

Pour $K = 0$, les deux vecteurs occupent les positions oA et oD (fig. 227), et l'on a :

$$i_2 = -\,\mathrm{I\,m.} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}866.\ \mathrm{I\,m.}$$

Pour K = 1, soit i_1 maximum, l'expression de i_2 a pour valeur (fig. 229 :

$$i_2 = -\frac{\mathrm{I\,m.}}{2} = \mathrm{B\,S}$$

On voit également, par raison de symétrie, que c'est aussi la valeur de l'ordonnée commune, en S_1, car on peut considérer la troisième courbe i_3, qui est en retard de $\frac{2\pi}{3}$ sur i_2 ; elle coupe l'ordonnée maximum de i_1 au même point S, puisque les deux courbes i_2 et i_3 sont symétriquement placées par rapport à i_1 ; mais le point S_1 est évidemment symétrique de S et $B_1 S_1 = B\,S = \frac{I\,m.}{2}$

Le troisième courant i_3 représenté en pointillé sur la figure 228 aurait pour expression :

$$i = -\frac{\mathrm{I\,max.}}{2} \times \left(\mathrm{K} - \sqrt{3(1 - \mathrm{K}^2)}\right)$$

163. **Intensités d'un courant alternatif moyenne et efficace.** — Intensité moyenne. — Quelle est l'intensité d'un courant alternatif? Il faut distinguer entre l'*intensité nominale* qui définit la valeur du courant et l'*intensité instantanée*.

Celle-ci est la valeur que prend le courant à chaque instant déterminé de la période ; elle est nulle à l'origine et maximum au quart du temps périodique ; elle passe par toutes les valeurs intermédiaires, croissantes ou décroissantes, positives ou négatives, aux autres moments de la période.

Ces valeurs instantanées ne permettent pas d'apprécier la grandeur du courant, et pour se faire une idée exacte de son intensité, en la comparant notamment à celle des courants continus, il est nécessaire d'envisager une valeur *unique et particulière, qui devra nécessairement* représenter une certaine moyenne de toutes les valeurs instantanées du courant, pendant la durée d'une période.

Si l'on se reporte à la courbe représentative des inten-

sités instantanées, on voit qu'elle se compose de deux nappes (fig. 230) dont les ordonnées sont deux à deux égales et de signe contraire ; la moyenne arithmétique de ces ordonnées serait donc nulle, si l'on considérait la période entière; mais il est évident que la grandeur moyenne des ordonnées est indépendante du signe et qu'il suffira de prendre la moyenne des ordonnées d'une demi-période.

Comme d'autre part ces ordonnées sont en nombre infini, on ne peut en déterminer la moyenne par les simples règles de l'arithmétique; on peut d'ailleurs obtenir le

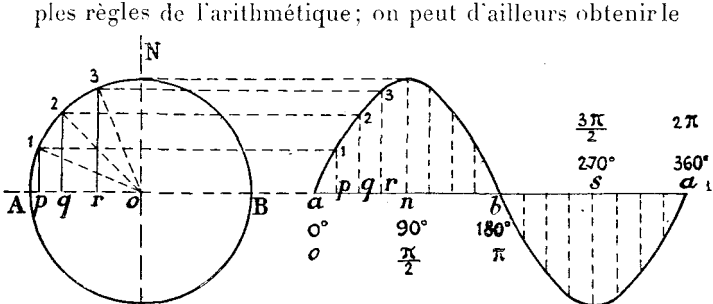


Fig. 230. — Courbe représentative des intensités instantanées.

résultat par de simples considérations géométriques exposées ci-dessous et l'on trouve :

$$I_{moy} = \frac{2}{\pi} \times I_m = 0.637\, I_m.$$

Valeur de l'intensité moyenne. — Divisons le diamètre A B en un grand nombre de parties égales infiniment petites et menons les ordonnées correspondantes par les points de division (fig. 231).

Soit $h\,i$ l'une de ces ordonnées, qui représente la valeur instantanée de l'intensité pour l'angle actuel de $o\,i$ avec o A et soit $r\,t$ l'ordonnée correspondante de la courbe des intensités.

Supposons maintenant que sur chacune des ordonnées du

cercle de gauche on ait construit des rectangles égaux tels que $m\ n\ c\ b$, et de telle sorte que les trapèzes correspondants $m\ n\ a\ b$ couvrent le demi-cercle A N B ; à ces divers trapèzes correspondront d'autres trapèzes sur la surface de la courbe de droite, qui en sera également couverte.

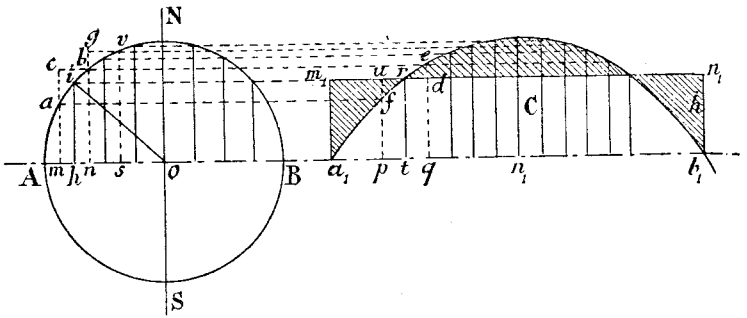


FIG. 231 — Détermination graphique de l'intensité moyenne.

D'autre part, les triangles semblables $o\ i\ h$, $a\ b\ c$ donnent :

$$\frac{i\ h}{o\ i} = \frac{c\ b}{a\ b}$$

D'où l'on tire par les règles ordinaires du calcul :

$$i\ h \times a\ b = o\ i \times c\ b$$

Or, $i\ h$ est égal a $r\ t$, par construction, et $a\ b$ est égal à $p\ q$, puisque $a_1\ b_1$ n'est autre chose que le développement de la demi-circonférence A N B, dont $a\ b$ est un des éléments; autrement dit, $p\ q$ est le développement de l'élément $a\ b$ correspondant et lui est égal.

On peut donc écrire :

$$r\ t \times p\ q = o\ i \times c\ b$$

Le produit $r\ t \times p\ q$ n'est autre que la surface du rectangle $u\ p\ q\ d$, qui peut être considéré comme égal, à un infiniment petit près, au trapèze curviligne $f\ p\ q\ e$.

Nous pourrons établir des relations analogues pour tous les trapèzes, deux à deux et en faisant la somme de ces égalités membre à membre, nous aurons :

Somme de quantités analogues à $r\ t \times p\ q = o\ i \times c\ b + o\ i \times g\ v + \ldots$ Ce que l'on a l'habitude d'écrire en abrégé :

$$\Sigma\ r\ t \times p\ q = o\ i \times (e\ b + g\ r + \ldots..)$$

Le premier terme représente évidemment la surface totale de la courbe de droite; quant à la somme entre parenthèses du second membre, elle constitue par l'ensemble de ses projections sur A B, la longueur même de ce diamètre; on obtiendra donc finalement, en désignant par C la surface de la courbe et par r le rayon $o\,i$:

$$C = r \times 2\,r = 2\,r^2$$

Imaginons maintenant un rectangle ayant pour base $a_1\,b_1$ et pour hauteur une longueur h telle que la surface de ce rectangle soit égale à celle de la courbe et que l'on ait :

$$a_1\,b_1 \times h = C = 2\,r^2$$

ou :

$$\pi\,r \times h = 2\,r^2$$

puisque $a_1\,b_1$ est égal à la demi-circonférence. Cette valeur de h sera par définition même l'ordonnée moyenne, puisqu'elle serait l'ordonnée constante d'une courbe rectiligne $a_1\,m_1\,n_1\,b_1$ dont la surface est égale à la courbe primitive, et si l'on mettait bout à bout les rectangles élémentaires dans les deux courbes on obtiendrait une même surface totale.

On tire de là la valeur de l'ordonnée ou intensité moyenne :

$$h = \frac{2\,r^2}{\pi\,r} = \frac{2}{\pi} \times r$$

Et comme r n'est autre que l'intensité maximum, on écrira finalement :

$$\text{I moy.} = \frac{2}{\pi} \times \text{I m.}$$

Il est évident qu'on obtiendrait la même relation pour la force électro-motrice et qu'on aurait :

$$\text{E moy.} = \frac{2}{\pi}\,\text{E m.} = 0{,}637\,\text{E m.}$$

Intensité efficace. — Cette valeur du courant moyen est intéressante au point de vue théorique, mais en pratique, ce n'est pas cette grandeur qui intervient dans les phénomènes magnétiques ou autres manifestations de l'énergie des courants alternatifs.

Les demi-phases étant alternativement positives et négatives, à des intervalles de temps égaux, ont voit tout d'abord que l'effet d'un courant alternatif sera nul pour

l'électrolyse et ne décomposera pas l'eau du voltamètre, en particulier. De même, l'action magnétique sur l'aiguille aimantée du galvanomètre sera presque insensible, car les actions inverses des phases de sens opposé se succèdent à des intervalles trop rapprochés, pour pouvoir surmonter l'inertie de l'aiguille, qui vibre sur place, sans être entraînée dans un sens plutôt que dans l'autre.

Ces considérations montrent, d'ailleurs, que l'on ne peut employer dans le cas qui nous occupe, des galvanomètres, ampèremètres ou voltmètres industriels, portant des aiguilles aimantées avec des aimants directeurs, comme les appareils Deprez et Carpentier, par exemple.

Il n'en est pas de même toutefois des appareils à pièces de fer doux, dépourvus d'aimants permanents, car alors, le fer soumis à l'action magnétisante, prend des aimantations périodiquement variables, suivant le sens du courant et les actions réciproques de l'aimant momentané et du courant ont une résultante dirigée toujours dans le même sens. Néanmoins, ces appareils devront être gradués, suivant la fréquence des courants à mesurer, par suite des perturbations magnétiques apportées par l'hystérésis et les courants de Foucault, dans une proportion variable qui dépend de la valeur de cette fréquence.

Mais les véritables instruments de mesure pour courants alternatifs sont les *électrodynamomètres*, les *ampèremètres* et *voltmètres thermiques*, tels que ceux de *Cardew*, et les voltmètres électrostatiques.

Nous verrons, quand nous parlerons de ces appareils, que les actions électriques qui s'y développent sont proportionnelles non pas à l'intensité ou à la force électro-motrice moyenne des courants, mais aux carrés moyens de ces quantités; c'est donc la moyenne des carrés qui intervient en fait et qui devra nous servir à définir la grandeur de l'intensité ou de la force électro-motrice d'un courant alternatif.

En un mot, les effets calorifiques et dynamiques des courants alternatifs dépendent directement de la valeur moyenne des carrés des valeurs instantanées de l'intensité

et de la force électromotrice. Ce sont ces valeurs moyennes qui servent à définir les éléments d'un courant alternatif, et on leur donne le nom d'*intensité et de force électro-motrice efficaces*. Elles ont pour valeurs :

$$J = 0{,}707\ I_m \text{ et } E = 0{,}707\ E_m.$$

Valeur de l'intensité efficace. — Cette intensité se révélera notamment dans les effets calorifiques des courants. D'après la loi de Joule, la chaleur développée dans un conducteur de résistance R pendant une seconde, par le passage d'un courant continu et d'intensité constante J, est exprimée en joules par :

$$W = R \times J^2$$

et pendant un nombre de secondes T :

$$W_1 = R \times J^2 \times T$$

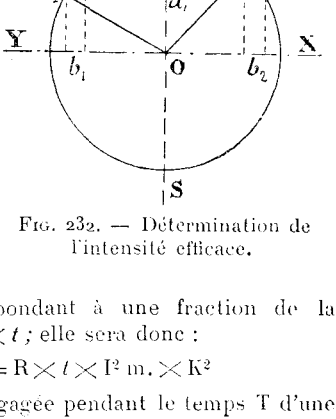


Fig. 232. — Détermination de l'intensité efficace.

S'il s'agit d'un courant alternatif, la chaleur due au carré de l'intensité instantanée i^2 est celle qui se dégage pendant un temps extrêmement court, correspondant à une fraction de la quantité i^2, exprimée par $i^2 \times t$; elle sera donc :

$$w = R \times i^2 \times t = R \times t \times I^2_m \times K^2$$

La quantité de chaleur dégagée pendant le temps T d'une période sera la somme des quantités instantanées ainsi définies, et l'on pourra écrire comme précédemment :

$$\Sigma w = \Sigma R \times t \times I^2_m \times K^2$$

Comme d'ailleurs K est la seule quantité variable constamment multipliée par les facteurs $R \times t \times I^2_m$, on aurait évidemment :

$$\Sigma w = R \times t \times I^2_m \times \Sigma K^2$$

Il faut donc faire la somme des valeurs successives de K^2 pendant la période de temps T (fig. 232).

On remarquera que les valeurs de K se reproduisent symé-

triquement deux à deux de part et d'autre de l'axe N S; mais au lieu de considérer les paires de valeurs égales, on peut grouper les ordonnées telles que $I_1 b_1$ et $I_2 b_2$ qui correspondent à deux vecteurs décalés de 90 degrés, soit O I_1 et O I_2.

Nous aurons alors, d'après les formules données précédemment (§ 162) :

$$\overline{I_1 b_1}^2 = K^2$$
$$\overline{I_2 b_2}^2 = (1 - K^2)$$

Et la somme des deux ordonnées sera :

$$\overline{I_1 b_1}^2 + \overline{I_2 b_2}^2 = K^2 + 1 - K^2 = 1$$

En faisant la somme de tous les couples analogues, nous aurons additionné deux fois les ordonnées. Le nombre de ces couples est infini, désignons-le par N; nous aurons donc :

$$\Sigma K^2 = \frac{N \times 1}{2} = \frac{N}{2}$$

Comme d'ailleurs nous avons admis que chaque valeur de K correspondait à la fraction de temps très petite t, on pourra écrire évidemment :

$$N = \frac{T}{t}$$

D'où:

$$\Sigma w = R \times I^2 m. \times t \times \frac{T}{2t} = \frac{R \times I^2 m. \times T}{2}$$

L'intensité efficace du courant alternatif n'est pas autre chose que l'intensité du courant continu qui produirait la même énergie calorifique pendant le même temps ; on écrira donc l'égalité :

$$\frac{R \times I^2 m. \times T}{2} = R \times J^2 \times T$$

D'où :

$$J^2 = \frac{I^2 m.}{2}$$

et enfin :

$$J = \frac{I m.}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \ I m.$$

On voit que l'intensité efficace est représentée par l'ordonnée commune à deux courbes d'intensités égales, décalées de

90 degrés, dont la valeur de K a été trouvée égale à $\frac{1}{\sqrt{2}}$ $= 0{,}707$. (§ 162).

Nous trouverions de même pour la force électro-motrice efficace en fonction de la force électro-motrice maximum :

$$E = \frac{Em.}{\sqrt{2}} = 0{,}707\,Em.$$

Ainsi un courant alternatif dont la force électro-motrice oscille entre les maxima + 100 et — 100 volts, équivaut à un courant continu de force électro-motrice égale à :

$$100 \times 0.707 = 70.7 \text{ volts.}$$

Il en est de même de l'intensité et, réciproquement, un courant de 70.7 volts ou de 70,7 ampères efficaces a une amplitude qui atteint la valeur 100 ; un courant de 100 ampères efficaces a pour valeur maximum 141,4 ampères et ainsi de suite.

164. **Energie et puissance efficaces.** — Le travail fourni par un courant continu a pour expression le produit de la force électro-motrice par l'intensité. Le travail instantané du courant alternatif sera donc à chaque instant le produit de la force électro-motrice instantanée par le courant correspondant. Comme ce qui nous intéresse c'est le travail moyen par seconde, nous obtiendrons l'expression voulue, en considérant que la force électro-motrice efficace, d'une part, et l'intensité efficace, d'autre part, sont équivalentes aux forces électro-motrices et intensité des courants continus de même valeur ; on aura donc :

$$W = E \times I$$

En désignant par E et I les valeurs efficaces du courant alternatif ; ce que l'on peut encore écrire :

$$W = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \times \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{E_m \times I_m}{2}$$

Ainsi la puissance d'un courant alternatif est égale au produit de la force électro-motrice et de l'intensité efficaces ou au demi-produit des forces électro-motrice et intensité maxima.

Il faut que les valeurs instantanées d'où résultent les quantités efficaces E et I se produisent dans des périodes simultanées, autrement dit que les phases de la force électro-motrice et de l'intensité soient en complète concordance. On conçoit, en effet, que la moyenne des produits des forces électro-motrices et intensités instantanées varie, nécessairement, suivant le décalage des deux courbes représentatives l'une par rapport à l'autre.

Or, ce décalage peut exister pour deux causes différentes provenant soit de la *self-induction*, soit de *la capacité* du circuit. Il nous reste à expliquer comment ces deux causes interviennent dans le fonctionnement des courants alternatifs et comment elles modifient la force électro-motrice agissante, l'intensité et l'énergie du courant.

165. **Effets de la self-induction.** — Nous avons vu dans le chapitre IV, que lorsqu'un courant d'intensité variable traverse un circuit conducteur, le flux galvanique variable qui en résulte détermine la production d'une force électro-motrice de self-induction, qui vient ajouter son action ou la retrancher dans le circuit où s'exerce la force électro-motrice extérieure variable, suivant que celle-ci est dans sa période de diminution ou de croissance.

La force électro-motrice de self-induction peut être considérée comme une force électro-motrice intérieure par opposition avec la force électro-motrice extérieure, *dite force électro-motrice agissante*, qui provient de la source d'énergie électrique extérieure.

La force électro-motrice de self-induction a pour expression, comme nous l'avons vu (§ 103) :

$$E_i = L \times (J_1 - J_0)$$

L étant le coefficient de self-induction et $(J_1 - J_0)$ la variation du courant par seconde.

On peut lui donner une autre forme, en remarquant que le flux engendré par le courant alternatif dans le circuit à self-induction, présente des variations semblables à celles de ce courant et peut être représenté par des courbes sinueuses analogues. Ainsi, le flux variable qui évolue

dans le circuit considéré, est semblable à celui qui traverse les spires d'une bobine tournant dans un champ magnétique constant. Or, la force électro-motrice maximum qui se développe dans ces circonstances est (§ 161) :

$$E\,m. = \frac{2\pi}{T} \times N \times N$$

formule dans laquelle $N \times N$ est le flux total maximum traversant les N spires de la bobine, et $\frac{2\pi}{T}$ la vitesse angulaire ou plutôt le nombre de cycles par seconde ou la pulsation.

Soit I_0 l'intensité maximum du courant, le flux total maximum de self-induction sera :

$$N \times N = L \times I_0$$

Et la force électro-motrice maximum d'induction sera par analogie :

$$E_s. = \frac{2\pi}{T} \times L \times I_0$$

Il est, d'ailleurs, évident que si I représente l'intensité efficace du courant, le flux efficace sera $L \times I$ et la force électro-motrice de self-induction proprement dite ou efficace deviendra :

$$E_s = \frac{2\pi}{T} \times L \times I$$

La force électro-motrice de self-induction prend naissance dans le circuit, par suite de la variation de l'intensité du courant; elle peut donc exister indépendamment de la force électro-motrice agissante extérieure. Si l'on supprime, en effet, la source d'électricité extérieure, ou si l'on *rompt* le circuit, la force électro-motrice de self-induction agit seule dans le circuit et elle a pour effet de prolonger la durée du courant. La self-induction s'oppose de même à l'établissement du courant et retarde le moment où l'intensité doit prendre sa valeur de régime, comme il retarde dans le cas précédent l'annulation du courant.

Théoriquement ces valeurs limites ne sont atteintes qu'après un temps infini, mais pratiquement on peut admettre que le courant a atteint les $\frac{2}{3}$ environ de sa valeur de régime, ou est réduit au $\frac{1}{3}$ de sa valeur initiale, après un temps exprimé par le rapport $\frac{L}{R}$ du coefficient de self-induction du circuit à sa résistance ; ce rapport s'appelle la *constante de temps* du circuit.

Soit par exemple un circuit possédant une self-induction $L = 0{,}05$ quadrant ou Henry et une résistance de 10 ohms on aura :

$$\frac{L}{R} = \frac{0.05}{10} = 0{,}005 \text{ seconde}$$

soit un demi-centième de seconde ; mais si la résistance est très faible et L très grand, ce temps peut atteindre plusieurs secondes.

On peut supposer que la source génératrice de la force électro-motrice extérieure, de nature alternative, est introduite dans le circuit, à des instants divers de la période, soit au point de sa phase correspondant à la valeur maximum du courant de régime, soit à celui où l'intensité du courant est nulle ; dans le premier cas, le courant subit un retard et n'atteint son amplitude de régime qu'après un certain nombre de périodes, peu nombreuses d'ailleurs, et au bout d'un temps très court ; dans le second cas, la self-induction n'a aucune influence sur l'établissement du courant de régime, qui atteint, dès la première période, l'amplitude qu'il comporte dans les conditions de résistance et de self-induction du circuit mis en œuvre.

Il n'y aura donc pas à se préoccuper en pratique du retard à l'établissement de régime d'un courant alternatif, mais seulement des autres effets de la self-induction dont il nous reste à parler maintenant.

Force électro-motrice résultante. — La courbe représentative de la force électro-motrice de self-induction est

évidemment de même forme et de même période que la force électro-motrice agissante et que le courant qui l'engendre ; mais elle diffère de phases avec ces derniers.

L'intensité et le flux inducteur étant nuls, nous savons que la force électro-motrice induite est maximum ; que celle-ci devient nulle, au contraire, quand le flux et l'intensité génératrice sont maxima (fig. 233).

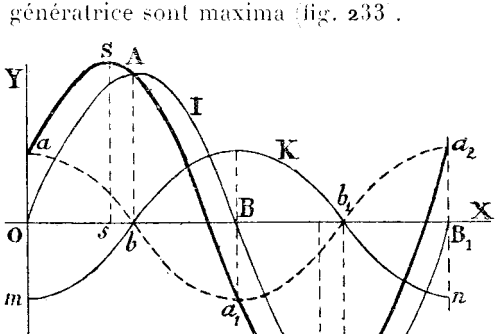


FIG. 233. — Force électro-motrice résultante en cas de self-induction.

Les deux courbes représentatives du courant I et de la force électro-motrice de self-induction, seront donc disposées, comme l'indique la figure, en I et en K, c'est-à-dire qu'elles seront décalées, l'une par rapport à l'autre, d'un quart de période ou de 90 degrés.

La courbe I peut représenter aussi bien la force électro-motrice *effective*, celle qui agit effectivement pour faire passer le courant I dans la résistance R du circuit et qui est, d'ailleurs, proportionnelle à cette intensité :

$$E = R \times I$$

Si la force électro-motrice agissante était simplement égale à $R \times I$ et se confondait avec la courbe de I, elle serait insuffisante pour débiter le courant, car elle est contrariée par la force électro-motrice de self-induction, qui se retran-

che dans certaines parties de la période telles que *mb* où les deux courbes ont des ordonnées de signe contraire.

La force électro-motrice agissante devra donc être augmentée de toute la quantité nécessaire pour équilibrer la réaction de self-induction. Pour obtenir la force agissante voulue il faudra augmenter les ordonnées de la courbe I des ordonnées de la courbe de self-induction. A cet effet, nous ferons tourner de 180 degrés cette courbe autour de l'axe *o* X, de manière à l'amener dans la position de la courbe pointillée $aba_1 b_1 a_2$.

L'ordonnée à l'origine de la courbe résultante sera donc *oa ;* l'ordonnée maximum *Ss* sera à gauche de *Ab*, et la phase de la force électro-motrice agissante sera en avance de la différence de temps *sb*, sur celle de l'intensité.

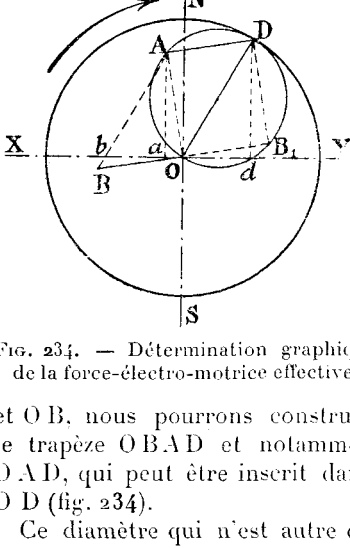


Fig. 234. — Détermination graphique de la force-électro-motrice effective.

Si nous représentons comme précédemment les forces électro-motrices effective et de self-induction maxima, par deux vecteurs décalés de 90 degrés O A et O B, nous pourrons construire sur ces deux vecteurs le trapèze O B A D et notamment le triangle rectangle O A D, qui peut être inscrit dans un cercle de diamètre O D (fig. 234).

Ce diamètre qui n'est autre que la diagonale du rectangle O A D B_1 et par suite la résultante des deux forces électro-motrices composantes O A et O B_1 ou A D = O B est la force électro-motrice agissante elle-même.

Les ordonnées telles que B*b*, D*d* et A*a* seront à chaque instant les valeurs instantanées des trois forces électro-motrices dont les valeurs maxima sont représentées par les vecteurs O D, O B, O A, savoir :

O D, force électro-motrice agissante.

O B, force électro-motrice de self-induction.

O A force électro-motrice effective.

Cette figure nous montre aisément que le maximum de O A se produit un peu après celui de O D, puisque O A coïncide avec O N, un moment après que O D a traversé cet axe.

On voit donc que la self-induction a pour effet, en premier lieu, d'établir un décalage ou différence de phase entre l'intensité et la force électro-motrice agissante. C'est l'intensité qui est en retard sur la force électro-motrice puisqu'elle ne passe par sa valeur nulle ou maximum, qu'un certain temps après. Le retard représenté par le temps *sh* dans la figure des courbes précédentes, correspond à un certain angle ou arc φ sur la circonférence des temps et, comme nous l'avons vu, cet arc détermine la valeur du temps de différence de phase d'après l'expression (§ 162) :

$$t = \frac{T}{2\pi} \times \varphi$$

Il est évident que ce temps et l'arc φ dépendent de la valeur du coefficient de self-induction L.

Valeur de l'impédance. — Considérons le triangle O A D de la figure précédente que nous reproduisons ici (fig. 235) et supposons que les côtés du triangle représentent les valeurs efficaces des trois forces électro-motrices en jeu.

L'angle φ est représenté par A O D ; la force électro-motrice effective par $OA = R \times I$ et la force motrice de self-induction par $AD = \frac{2\pi}{T} \times L \times I = p\,L\,I$, en posant pour abréger : $p = \frac{2\pi}{T}$.

D'après la règle des triangles rectangles, nous pouvons poser :

$$\overline{OD}^2 \text{ ou } E^2 = R \times I^2 + \overline{p \times L \times I}^2$$

Ce qui peut s'écrire à cause du facteur commun I^2 :

$$E^2 = (R^2 + p^2 \times L^2) \times I^2$$

ou encore :

$$I^2 = \frac{E^2}{R^2 + p^2 \times L^2}$$

et :

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + p^2 \times L^2}}$$

Cette relation établie pour les forces électro-motrices et intensités efficaces, est évidemment vraie pour les valeurs maxima, puisque les unes et les autres ne diffèrent que du facteur commun $\sqrt{2}$; elle est également vraie pour les valeurs instantanées, qui donnent lieu à la même construction graphique.

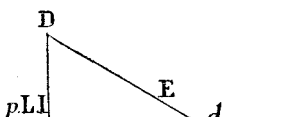


Fig. 235. — Détermination graphique de l'impédance.

Si le circuit était dépourvu de self-induction, le terme $\times L$ serait nul et la formule se réduirait à :

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2}} = \frac{E}{R}$$

C'est-à-dire qu'on retrouverait la loi d'Ohm.

Ainsi la self-induction a pour effet, en second lieu, d'augmenter le dénominateur de la formule d'Ohm, et tout se passe comme si une résistance additionnelle était introduite dans le circuit ; la résistance apparente est alors $\sqrt{R^2 + p^2 \times L^2}$ et on lui donne le nom *d'impédance ;* le terme $p \times L$ constitue *l'inductance* du circuit.

Si la force électro-motrice agissante et l'intensité pouvaient être en concordance de phases, la formule donnant les valeurs instantanées de l'intensité serait :

$$i = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + p^2 \times L^2}}$$

Car on aurait encore :

$$i = I_m \times K, \text{ avec } I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + p^2 \times L^2}}$$

Mais par suite du décalage, on a, d'après la formule établie

précédemment (§ 162) entre deux courants présentant entre eux une différence de phase, la relation :

$$i = I_m \times (K\sqrt{1 - M^2} - M\sqrt{1 - K^2})$$

et par suite :

$$i = \frac{E_m \times (K\sqrt{1 - M^2} - M\sqrt{1 - K^2})}{\sqrt{R^2 + p^2 L^2}}$$

M étant la valeur de K correspondant à la différence de phase relative à l'angle φ. Cette valeur de M dépend nécessairement de la self-induction L, et l'on peut écrire, d'après les triangles O A D et *o a d*, M n'étant autre chose que l'ordonnée *da* menée à la distance *o d* = 1 du point O (§ 162) :

$$M = \frac{p \times L}{\sqrt{R^2 + p^2 L^2}}$$

Nous avons vu que le décalage ne peut dépasser 90 degrés, car le sommet S de la courbe de force électro-motrice agissante est nécessairement compris entre le sommet A de la force électro-motrice effective et l'axe des Y (fig. 233).

Dans le cas extrême où le décalage atteindrait 90 degrés, on aurait M = 1 et par suite :

$$p \times L = \sqrt{R^2 + p^2 L^2} \text{ ou } p^2 L^2 = R^2 + p^2 L^2$$

C'est-à-dire :

$$R^2 \text{ ou } R = 0$$

Réciproquement, il faudrait que la résistance du circuit fût nulle pour que le décalage atteignit 90 degrés ou pratiquement que cette résistance fût négligeable, vis-à-vis d'une self-induction L très grande.

Si la résistance était infinie ou très grande vis-à-vis de L, l'influence de la self-induction deviendrait nulle ou négligeable.

En résumé, nous voyons que la self-induction prend une importance qui peut devenir prépondérante dans les courants alternatifs; elle *a pour effet, dans tous les cas, d'établir un retard de phases de l'intensité du courant sur la force électro-motrice agissante de la source extérieure et d'augmenter la résistance apparente du circuit.*

Nous avons à parler maintenant de l'influence de la seconde cause accessoire qui vient modifier le régime des courants alternatifs, soit la capacité.

166. **Capacité des conducteurs.** — Nous n'avons fait que citer, au chapitre II, cette quantité qui intervient, spécialement au point de vue industriel, dans le fonctionnement des courants alternatifs.

Nous avons expliqué dans le même chapitre comment un corps conducteur, les feuilles d'un électroscope par exemple, pouvait être porté à un potentiel déterminé.

Il suffit dans ce cas, de relier la petite sphère qui surmonte la tige de l'instrument (fig. 6) au pôle positif d'une pile par un fil conducteur ; un léger transport d'électricité se fait du pôle à la sphère et aux feuilles d'or, puis le courant s'arrête au bout d'un temps très court, et l'électroscope, chargé de cette manière d'une certaine quantité d'électricité, s'élève au potentiel du pôle de la source, comme un corps métallique se met en équilibre de température avec une source de chaleur voisine.

A partir du moment où la sphère a reçu la charge électrique maximum qu'elle peut emmagasiner, cette électricité se trouve à l'état statique ou de repos, et les phénomènes qui s'y rapportent constituent la branche de l'électricité désignée sous le nom d'*électrostatique*, bien distincte de celle qui se rapporte à l'*électrodynamique* ou électricité en mouvement, qui nous intéresse plus directement au point de vue industriel.

La capacité dont il est question dans ce chapitre rentre dans le domaine de l'électrostatique. Les effets de l'électricité statique sont tout différents de ceux de l'électricité dynamique. Les masses électriques au repos agissent, en effet, à la manière des masses magnétiques les unes sur les autres, et les forces attractives et répulsives obéissent, dans les deux cas, à la même loi de Coulomb :

$$f = \frac{M \times m}{d^2}$$

L'unité de masse électrique ou de quantité d'électricité statique sera donc différente de l'unité d'électricité dynamique et elle se définira comme l'unité de masse magnétique.

Unité d'électricité statique. — *L'unité d'électricité statique est la quantité d'électricité qui, placée à la distance d'un centimètre d'une masse semblable, la repousse dans l'air, avec la force d'une dyne.*

Il existe, d'ailleurs, un rapport déterminé entre les grandeurs des unités dans le système électrostatique et le système électromagnétique, qui nous a servi à définir l'unité de quantité d'électricité dynamique (§ 67). En mesurant chacune de ces deux grandeurs, on a trouvé que leur rapport était précisément égal à la vitesse de la lumière en centimètres par seconde, soit à 3×10^{10} ou trente mille millions. On peut donc écrire :

Unité électromagnétique de quantité $= 3 \times 10^{10}$ unités électrostatiques.

Si nous imaginons que l'unité électrostatique se déplace dans l'espace, en présence d'une quantité égale d'électricité, avec la vitesse de la lumière, les actions mutuelles de ces masses électriques mobiles seront analogues aux actions électro-magnétiques qui s'exercent entre deux courants parallèles et seront numériquement égales à celles qui s'exerceraient entre ces deux quantités à l'état statique.

Il s'agit ici d'unités C G S ; comme l'unité C G S de quantité électro-magnétique vaut 10 unités pratiques, on réduira les quantités électrostatiques en coulombs, en écrivant :

$$\text{Coulombs} = \text{quantités électromagnétiques (C G S)} \times 10$$

$$= \frac{\text{quantités électrostatiques (C G S)} \times 10}{3 \times 10^{10}}$$

Ainsi pour réduire en coulombs les quantités d'électricité exprimées en unités électrostatiques, il faudra les diviser par 3×10^9.

On démontrerait de même que s'il s'agissait de volts, il faudrait multiplier par 300, en tenant compte du rapport constant 3×10^{10} qui ici divise les unités électrostatiques de force électro-motrice.

Potentiel d'une sphère conductrice. — Considérons une sphère conductrice isolée dans l'espace et chargée d'une

certaine quantité q d'électricité (fig. 236). L'expérience a démontré que si cette sphère se trouve soustraite à l'action de masses électriques extérieures, étant éloignée d'ailleurs de tout autre conducteur, la charge électrique se répartit uniformément sur la surface extérieure de cette sphère, de telle sorte que *la densité électrique* ou quantité d'électricité par centimètre carré, soit la même en tous les points.

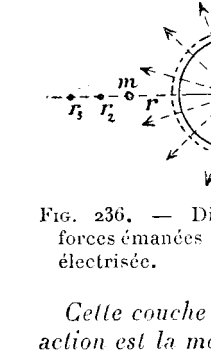


FIG. 236. — Direction des forces émanées d'une sphère électrisée.

Ainsi l'électricité est tout entière sur la surface extérieure, et on constate, si la sphère est creuse, que cette couche superficielle en équilibre n'exerce aucune action, ni force quelconque en un point intérieur.

Cette couche n'agit que sur les points extérieurs, et son action est la même que si toute la charge était concentrée au centre de la sphère.

Cette charge élève le potentiel électrique aux différents points de la surface de la sphère, comme les calories élèvent la température du corps chauffé. La valeur du potentiel dépend donc de la charge, et l'on peut envisager ce potentiel de la manière suivante.

Quand nous avons parlé au chapitre II du potentiel gravifique, dû au champ d'attraction terrestre, nous avons vu que ce potentiel était défini par le travail emmagasiné dans l'unité de masse pesante, élevée à une certaine altitude dans le champ gravifique.

Les masses électriques distribuées dans l'espace ou accumulées sur une même surface conductrice, celle de la sphère, par exemple, créent un champ électrique de forces attractives ou répulsives analogue au champ gravifique. Si donc on suppose que l'unité de masse électrique est amenée, d'un point aussi éloigné que l'on voudra, jusqu'au voisinage immédiat de la surface de la sphère, *l'énergie totale correspondant à ce déplacement constituera*

par définition le potentiel en un point de cette surface.

Ce potentiel a pour valeur, en désignant par Q et par R le rayon de la sphère :

$$V = \frac{Q}{R}$$

La force qui entre en jeu ici est évidemment la résultante des actions de toutes les masses qui forment la charge de la sphère, et dont nous représenterons la somme par Q; nous avons admis d'autre part que l'action des masses Q est la même que si elles étaient toutes concentrées au centre de la sphère de rayon R.

Quand la masse m égale à l'unité est à une distance quelconque r_1 du centre de la sphère, et à l'extérieur, la force qui s'exerce sur elle de la part de Q, est $\frac{Q}{r_1^2}$, en vertu de la loi de Coulomb; quand cette masse unité est arrivée au contact de la surface extérieure de la sphère, la force est $\frac{Q}{R^2}$ et elle variera continûment de $\frac{Q}{r_1^2}$ à $\frac{Q}{R^2}$, pour la série des chemins élémentaires parcourus par la masse m, à la rencontre de la sphère.

Les chemins élémentaires étant tous comptés à partir du centre de la sphère, et ayant successivement pour expression $(r_1 - R)$, $(r_2 - r_1)$, $(r_3 - r_2)$, et ainsi de suite, les longueurs communes telles que r_1 et $(-r_1)$ se détruisent dans la sommation des termes et il ne reste plus finalement que les distances extrêmes R et r_n, n désignant un nombre aussi grand que l'on voudra.

Ces observations s'appliquent aussi bien aux termes entre parenthèses multipliés par les forces correspondantes, c'est-à-dire aux travaux élémentaires. On peut, en effet, appliquer à chacun des parcours considérés la force moyenne correspondante, ce qui revient très approximativement à affecter du même facteur $\frac{Q}{r_1^2}$, par exemple, les deux longueurs communes positive et négative telles que r_1 et $(-r_1)$ et ainsi pour les autres.

Il ne restera donc plus finalement que les termes extrêmes

$\frac{Q}{R^2} \times R$ et $\frac{Q}{r_n^2} \times r_n$; mais si la distance r_n est très grande et même infinie, suivant l'expression adoptée, le terme $\frac{Q}{r_n}$ est nul ou négligeable et l'énergie totale du transport est :

$$V = \frac{Q}{R^2} \times R = \frac{Q}{R}$$

Tel est le potentiel communiqué par la charge Q en un point de la surface de la sphère de rayon R.

On trouverait la même expression pour un point quelconque, donc tous les points de la surface de la sphère sont au potentiel $\frac{Q}{R}$ et celle-ci constitue ce qu'on appelle *une surface équipotentielle.*

Le potentiel $\frac{Q}{R}$ commun à tous les points de la sphère est ce qu'on appelle le potentiel de la sphère.

Il est d'ailleurs évident que la surface d'une sphère conductrice constitue une surface équipotentielle, car s'il existait une différence de potentiel entre deux points quelconques de la dite surface, il y aurait déplacement des masses électriques du point potentiel supérieur à l'autre point et cela infailliblement, puisque la conductibilité de la sphère permet ce déplacement sans difficulté ; inversement, puisque les masses sont en équilibre statique, il en résulte que le potentiel est uniforme sur toute l'étendue de la sphère.

On voit également que le potentiel est le même à l'intérieur de la sphère, car ce milieu est neutre, et n'est le siège d'aucune masse ou force magnétique : le travail de la masse unité venant de l'infini est donc entièrement accompli lorsque cette masse est venue au contact de la surface extérieure de la sphère et elle peut pénétrer à l'intérieur sans aucun travail et, par suite, sans augmenter ou diminuer le potentiel.

Ce que nous avons dit pour la surface conductrice d'une

sphère s'applique à toute surface conductrice de forme quelconque, ellipsoïdale ou cylindrique. Toutefois, sur les divers points d'une surface ellipsoïdale, on sait que les masses électriques ne sont pas uniformément réparties et que la densité augmente d'autant plus vers les extrémités du conducteur que celui-ci a une forme plus allongée. Ces masses accumulées dans les régions effilées exercent sur elles-mêmes des actions répulsives, connues sous le nom de *pression électrostatique,* qui déterminent l'échappement des masses électriques dans l'air ambiant. Ce phénomène, qui se manifeste surtout dans les conducteurs taillés en pointe, constitue le *pouvoir des pointes* et est utilisé dans l'emploi des paratonnerres.

Quelle que soit d'ailleurs la répartition de la charge statique sur le corps conducteur, le potentiel est le même en tous les points de densités diverses.

Les forces développées par la couche uniforme répandue sur une sphère chargée, sont nécessairement normales à la surface et dirigées par suite suivant les rayons, c'est ce que montre la pression électrostatique et, d'ailleurs, il ne pourrait en être autrement sans que les masses électriques soient sollicitées à glisser sur la sphère et à détruire l'équilibre statique (fig. 237).

Ainsi toutes les forces passent par le centre et sont dirigées vers l'extérieur, c'est pourquoi l'action résultante est la même que si ces forces émanaient des masses magnétiques concentrées au centre de la sphère.

Capacité d'une sphère. — Si nous relions par un conducteur la sphère considérée, de rayon R, au pôle d'une pile, cette sphère prendra le potentiel V de ladite pile en même temps qu'une charge Q ; de telle sorte qu'on aura :

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

Cette charge se produit au moyen d'un courant de très courte durée qui traverse le conducteur de connexion et dont l'insensité va nécessairement en diminuant, pour s'annuler lorsque la charge a atteint son maximum ; c'est

aussi le moment où la sphère s'est mise en équilibre de potentiel avec le pôle de la source.

Ainsi le courant, presque instantané, est maximum à l'origine, alors que la sphère est au potentiel zéro, par exemple, puis il va en diminuant au fur et à mesure que la charge et le potentiel de la sphère augmentent; enfin il devient nul lorsque ledit potentiel est maximum.

On voit que la charge d'un conducteur donne lieu à un *phénomène analogue à celui que présentent les récepteurs* électrolytiques ou les dynamoteurs, lesquels opposent à la force électro-motrice du générateur une force contre-électro-motrice qui va en croissant et peut atteindre à la limite une valeur égale.

Reprenons notre sphère chargée au potentiel V d'une pile et relions-la à une seconde pile au potentiel V_1; on pourra encore écrire, comme relation afférente au nouvel état électrique de la sphère :

$$V_1 = \frac{Q_1}{R}$$

et si nous divisons les deux relations établies, membre à membre, il viendra :

$$\frac{V}{V_1} = \frac{Q}{Q_1}$$

C'est-à-dire que les charges sont proportionnelles aux potentiels et inversement.

On peut encore écrire cette relation :

$$\frac{Q}{V} = \frac{Q_1}{V_1} = C$$

ce qui signifie que le rapport de la charge au potentiel est toujours le même et on désigne par C ce rapport constant. Ce rapport C s'appelle la *capacité électrostatique* ou simplement la *capacité du conducteur.*

L'expression de la capacité d'un conducteur sphérique se tirera de la formule donnant le potentiel de la sphère; on en tire en effet :

$$R = \frac{Q}{V} = \frac{Q_1}{V_1} = C$$

Ainsi la capacité d'une sphère isolée est égale à son rayon, qui devra être exprimé en centimètres dans le système de mesures C G S. Les capacités des conducteurs dont la forme est différente d'une sphère ne peuvent pas être établies par le calcul, sauf dans quelques cas particuliers.

La terre peut être considérée comme une immense sphère conductrice, sa capacité égale au rayon sera donc de 630 millions d'unités électrostatiques de capacité.

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

L'unité de capacité peut être représentée par la capacité d'une sphère de 1 centimètre de rayon, puisqu'alors on peut écrire

$$C = R = 1.$$

On voit, d'après l'expression générale de la capacité, que pour une même charge Q, le potentiel sera d'autant moins élevé que la capacité sera plus grande ; ainsi une même quantité d'air, comprimée dans différents réservoirs, déterminera une pression d'autant moins élevée que le volume du réservoir considéré sera plus grand.

Il résulte de là que deux conducteurs de même capacité prennent des charges égales sous un même potentiel, ou des charges proportionnelles à leurs capacités si celles-ci sont différentes.

Farad. — On a adopté aussi une unité pratique de capacité qui est le *Farad. Par définition, le Farad est la capacité d'un condensateur qui prend le potentiel de 1 volt pour une charge de 1 coulomb.*

Cette unité pratique vaut 9×10^{11} unités électrostatiques de capacité ; elle serait donc trop grande dans les applications et l'on emploie pratiquement le microfarad ou millionième de Farad, qui vaut encore 9×10^{5} unités électrostatiques.

La terre, considérée comme sphère isolée, aurait une capacité de $\frac{1}{1500}$ de Farad environ, ou 700 microfarads.

167. **Condensation électrique.** — La sphère ou le conducteur électrisé que nous avons considéré jusqu'à présent était isolé et éloigné de tout autre conducteur et de toute masse magnétique extérieure.

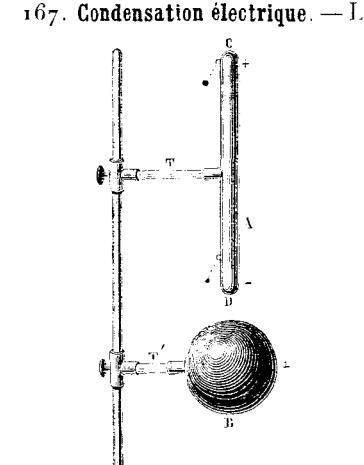


Fig. 237. — Électrisation par influence

Quand, au contraire, un conducteur chargé se trouve dans le voisinage d'un autre conducteur isolé, le premier développe, par influence, sur le second deux couches d'électricité de signe contraire (fig. 237). Si le corps inducteur B est chargé d'électricité positive, l'électricité négative de A se portera dans la partie la plus voisine de B et l'électricité positive à l'extrémité la plus éloignée.

Les quantités des deux sortes d'électricité induites sur A sont numériquement égales, et d'autant plus grandes que ce conducteur se rapproche davantage de B. Si l'on met un point quelconque de A en communication avec le sol, l'électricité de même nom que celle du corps inducteur disparaît et A reste chargé d'électricité de nom contraire, soit ici d'électricité négative.

Supposons maintenant que le corps électrisé B soit à l'intérieur du conducteur influencé et qu'en particulier le système se compose de deux sphères concentriques (fig. 238). Si l'on met la tige conductrice b en communication avec une source d'électricité positive, la sphère extérieure A

mise à la terre se charge d'une quantité d'électricité négative exactement égale à la charge inductrice B, tandis que l'électricité positive induite, de même valeur, s'écoule dans le sol.

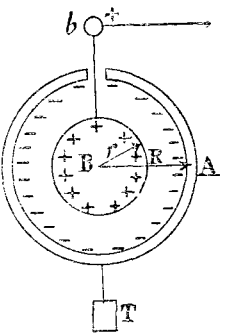


FIG. 238. — Influence entre deux sphères concentriques.

On voit une analogie évidente entre ces phénomènes d'influence électrique et ceux d'induction magnétique. Un pôle magnétique positif B développe dans un barreau A soumis à son influence deux pôles ou masses magnétiques de signe contraire disposés comme les masses électriques de la figure 237. Mais il reste toutefois une différence essentielle entre les deux phénomènes, car alors que l'on peut séparer chacune des espèces d'électricité, soit en isolant l'inducteur de la source, soit en reliant l'induit à la terre, on ne peut isoler le magnétisme boréal du magnétisme austral et obtenir un barreau aimanté qui ne présente qu'un seul pôle, soit une seule espèce de magnétisme.

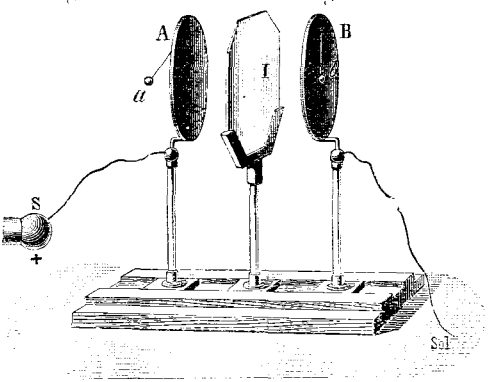


FIG. 239. — Condensateur d'Epinus.

La *condensation électrique* est une conséquence de ces phénomènes d'influence : nous nous servirons du *condensateur* d'Epinus pour exposer cette théorie.

L'appareil consiste en deux plateaux de laiton, montés

parallèlement sur des pieds de verre pouvant être rapprochés ou éloignés à volonté (fig. 239).

Le plateau B étant supposé enlevé, mettons le plateau A en communication avec le pôle positif d'une source d'électricité ; après le passage d'un courant de courte durée dans le fil de connexion, le potentiel de A sera égal à celui de la source et la charge du plateau aura atteint sa valeur maximum possible dans les conditions de l'expérience.

Remettons maintenant le plateau B en place, c'est-à-dire dans le voisinage de A, en ayant soin de le relier à la terre; un nouveau courant passera dans le fil et la charge de A augmentera, bien que ce plateau soit maintenu au même potentiel par la même source d'électrisation.

Ainsi la présence de B a pour effet de donner, pour un même potentiel, au plateau A une charge plus grande que s'il était seul. Il en résulte que la capacité du système formé par les deux plateaux est plus grande qu'auparavant et qu'elle a augmenté proportionnellement à la charge.

Potentiel d'un condensateur. — L'ensemble des deux sphères de la figure 238 constitue également un condensateur dont il est facile d'évaluer le potentiel en fonction des charges ; ce potentiel est d'ailleurs égal à celui V de la source.

Les deux sphères sont chargées de quantités d'électricité égales et de signe contraire q et $(-q)$; les sphères étant concentriques, les potentiels au centre commun dus aux charges de chacune des sphères sont respectivement $\frac{q}{r}$ et $(-\frac{q}{R})$ et le potentiel sera :

$$V = \frac{q}{r} - \frac{q}{R}$$

C'est aussi le potentiel de la sphère intérieure en communication avec la source.

Nous remarquerons que le potentiel V_0 de la sphère extérieure est égal à celui de la terre, soit au potentiel zéro; d'ailleurs les charges q et $(-q)$ agissent comme si elles étaient concentrées toutes deux au centre et le potentiel dû à ces charges à la distance R du centre est :

$$V_0 = \frac{q - q}{R} = 0$$

On peut dire ainsi que :

$$V = V - o = V - V_0$$

est *la différence des potentiels des sphères ou, comme on l'appelle simplement, le potentiel de l'ensemble des deux sphères.*

Capacité d'un condensateur. — L'expression du potentiel des sphères peut s'écrire :

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

Si la sphère intérieure était seule isolée dans l'espace, elle aurait pris sous le potentiel V une charge différente q_1 telle que l'on aurait :

$$V = \frac{q_1}{r} = q \times \frac{1}{r}$$

Comme le facteur $\frac{1}{r}$ est évidemment plus grand que $\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right)$, il faut de toute nécessité que q soit plus grand que la charge primitive q_1 pour le même potentiel V ; donc la capacité du système est augmentée par rapport à celle du conducteur unique.

La formule générale de la capacité, établie précédemment est :

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

D'où l'on tire :

$$V = \frac{q}{C} = q \times \frac{1}{C}$$

Si nous comparons à la formule ci-dessus :

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

il en résulte que l'on peut écrire, à égalité de potentiel :

$$\frac{1}{C} = \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right) = \frac{R - r}{R \times r}$$

en réduisant les fractions au même dénominateur. D'où finalement :

$$C = \frac{R \times r}{R - r} = r \times \frac{R}{R - r}$$

Comme $\frac{R}{R - r}$ est évidemment plus grand que l'unité,

$r \times \frac{R}{R-r}$ est plus grand que r capacité primitive de la sphère unique, isolée dans l'espace.

Si l'on suppose que le rayon de la sphère extérieure augmente jusqu'à l'infini, le potentiel du système se réduira à :

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

puisque R étant infini, le terme $\frac{q}{R}$ devient infiniment petit et s'annule; de même la capacité deviendra $C = r$; nous retrouvons ainsi le potentiel et la capacité de la sphère isolée.

Nous pouvons donc considérer cette dernière comme constituant elle-même un condensateur, dont la seconde surface conductrice se trouve transportée à l'infini. Il en résulte que la charge positive, par exemple, qui recouvre la sphère de rayon r n'est pas seule, comme on pourrait le croire, sur le conducteur isolé, mais qu'il existe concurremment une charge négative qui lui correspond, à l'infini.

Ainsi, lorsqu'un conducteur chargé est isolé au milieu d'une salle, les parois de l'enceinte présentent nécessairement une charge égale et de signe contraire.

Par conséquent, si l'on peut isoler les charges sur deux conducteurs distincts, comme nous l'avons dit plus haut, il n'en est pas moins vrai, qu'il est impossible de produire une charge quelconque sans qu'elle soit accompagnée d'une charge égale ou de signe contraire. Ce fait est en accord avec le principe de la conservation de l'électricité qui, de même que la matière, ne peut ni être réduite ni être augmentée; de sorte qu'à tout accroissement d'électricité positive doit correspondre une quantité égale d'électricité négative qui fait exactement compensation.

168. **Diélectriques.** — On voit l'analogie qui existe entre les phénomènes d'induction électrique et d'induction magnétique. De même que les actions magnétiques se transmettent toujours par des lignes de force partant de pôles ou masses positives, pour aboutir aux pôles ou masses négatives, de même les lignes de forces électriques aboutissent à chaque extrémité, à des masses électriques de signe contraire.

Les actions magnétiques se propagent par leurs lignes

de force, soit à travers l'air, soit à travers des substances magnétiques ou diamagnétiques; les actions électriques se propagent de même à travers l'air et plus volontiers dans certains milieux de substances auxquelles on donne le le nom de *diélectriques*.

Une autre analogie consiste dans la *charge résiduelle* des diélectriques qui est évidemment comparable à l'aimantation résiduelle des aimants permanents. On constate, en effet, que l'électricité ne réside pas précisément sur les conducteurs, mais à la surface et même à l'intérieur des diélectriques solides, verre ou mica, par exemple, interposés entre les deux conducteurs des condensateurs.

L'électricité résiduelle paraît pénétrer d'autant plus profondément dans le diélectrique que la charge a été plus prolongée; ce phénomène se traduit par un certain nombre de décharges que l'on peut obtenir successivement, après quelques instants d'attente entre chaque décharge. L'air forme un milieu diélectrique qui ne donne pas lieu aux phénomènes de charge résiduelle, de même qu'il n'est doué d'aucune force coercitive au point de vue magnétique.

Les diélectriques sont donc des corps isolants, mais *leur pouvoir inducteur* ou leur faculté de condensation plus ou moins grande n'est pas en rapport direct avec leur pouvoir isolant. Ainsi le mica, dont la résistivité est cent fois plus faible que celle de la gomme laque, a un pouvoir inducteur trois fois plus grand que celui de cet isolant et égale à huit fois celui de l'air; l'influence électrostatique est donc transmise avec une facilité trois et huit fois plus grande à travers le mica que dans les deux autres milieux.

On appelle *pouvoir inducteur spécifique d'un diélectrique le rapport des charges, sous un même potentiel, d'un condensateur dont les conducteurs sont isolés successivement par le diélectrique considéré et par une couche d'air de même épaisseur.* Ce rapport est le même que celui des capacités des condensateurs dans les conditions spécifiées.

Le pouvoir inducteur spécifique paraît comparable à la perméabilité dans le domaine magnétique; plus cette

faculté inductive est grande, plus le système peut acquérir une forte charge sous un potentiel donné. Il en résulte donc que les actions attractives et répulsives des masses électriques qui déterminent ce potentiel, sont d'autant plus faibles que les milieux dans lesquels ces actions s'exercent sont doués d'un pouvoir diélectrique plus élevé.

On a pris comme étalon, ou unité de pouvoir inducteur spécifique, la faculté inductive de l'air sec, à la température de 0 degré centigrade et à la pression barométrique de 760 millimètres.

Les pouvoirs inducteurs des divers corps isolants sont généralement supérieurs à celui de l'air et par conséquent plus grands que l'unité; ils dépassent généralement le chiffre 2, et s'élèvent jusqu'à 8 pour le mica et la paraffine; mais ce sont surtout les liquides qui atteignent les chiffres les plus élevés, soit 40 pour l'eau et 111 pour un mélange en parties égales d'alcool éthylique et d'eau.

169. Capacité des conducteurs industriels. — Les câbles et fils conducteurs employés dans l'industrie se comportent non seulement comme des conducteurs chargés, mai encore comme de véritables condensateurs.

Les câbles sous-marins, notamment, peuvent être considérés comme des condensateurs cylindriques dont les surfaces conductrices ou *armatures* sont constituées, l'une par le cuivre formant l'âme intérieure du câble, l'autre par l'eau de l'Océan, tandis que le diélectrique est formé par l'enveloppe de gutta-percha.

Les premiers courants lancés dans ces câbles sont emmagasinés à l'état statique, et l'on ne peut transmettre le signal télégraphique qu'après le temps nécessaire pour opérer la charge du câble.

Valeur de la capacité d'un cable. — La capacité d'un condensateur cylindrique ou d'un câble se déduit facilement des considérations suivantes.

La capacité du condensateur sphérique est :

$$C = \frac{R \times r}{R - r} = \frac{R^2}{d}$$

en désignant par d l'intervalle entre les deux sphères et supposant, d'autre part, que cet intervalle est assez petit pour que les rayons des deux sphères puissent être considérés comme égaux. On peut encore écrire :

$$C = \frac{4\pi \times R^2}{4\pi d} = \frac{S}{4\pi d}$$

Considérons maintenant un condensateur plan (fig. 240) constitué par deux plans métalliques parallèles situés à une petite distance l'un de l'autre ; la capacité de ce système aura la même expression. En effet, il est évident que la capacité de l'unité de surface de la sphère de rayon R, est :

$$C_1 = \frac{1}{4\pi d}$$

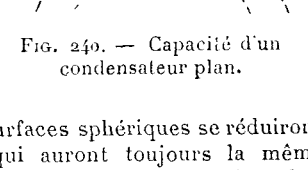


Fig. 240. — Capacité d'un condensateur plan.

c'est-à-dire qu'elle reste la même quel que soit le rayon de la sphère, et en particulier si ce rayon devient infini ; dans ces conditions les surfaces sphériques se réduiront aux deux plans considérés, qui auront toujours la même capacité par unité de surface et, par suite, une capacité totale :

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

Cette capacité ne dépend que de la surface S des deux plans et de leur distance d ; or, on ne changera aucun de ces éléments en recourbant ces plans de manière à leur donner la forme et la position de deux cylindres concentriques ; la surface R aura alors pour expression :

$$S = 2\pi \times r\,l$$

en désignant par l et r la longueur commune des cylindres et le rayon du cylindre intérieur ; la capacité deviendra alors :

$$C = \frac{S}{4\pi d} = \frac{2\pi r\,l}{4\pi d} = \frac{r\,l}{2\,d}$$

Cette formule donne la capacité pour un diélectrique formé d'une couche d'air ; dans le cas d'un isolant de gutta-percha par exemple, il faudra multiplier par $K = 3$.

Soit à calculer la capacité par kilomètre, d'un câble pour lequel le rayon de l'âme intérieure serait de 0m,2, et celui de l'en-

veloppe extérieure de $0^c,6$; la valeur de d sera alors de $0^c,4$.

Comme la formule ci-dessus est établie dans l'hypothèse où l'épaisseur du diélectrique est négligeable vis-à-vis du rayon de la sphère intérieure, elle ne paraît pas applicable dans le cas actuel; cependant nous obtiendrons une approximation suffisante, en prenant pour r la moyenne des rayons, soit $0^c,4$: la formule deviendra alors :

$$C = \frac{K \times r \times l}{2\,d} = \frac{3 \times 0.4 \times 100.000^c}{2 \times 0.4} = 150.000$$

la valeur exacte serait 136.500 unités C G S électrostatiques.

Les lignes aériennes forment également un condensateur avec la surface du sol; la capacité de 1 kilomètre de fil télégraphique suspendu est égale à 6000 unités.

170. Effets de la capacité.— Nous pouvons maintenant nous rendre compte de l'influence de la capacité d'un circuit sur le fonctionnement d'un courant alternatif. Ainsi que nous l'avons vu (§ 166), la capacité développe une force électromotrice antagoniste, qui a pour effet de diminuer l'intensité I du courant, comme la force électro-motrice de self-induction, *mais elle détermine une avance de la phase* du courant par rapport à la force électro-motrice, au lieu du retard causé par la self-induction.

Lorsqu'on introduit subitement une force électro-motrice constante dans un circuit doué de capacité, la charge va en croissant jusqu'à une certaine limite acquise au bout d'un temps qui dépend de la capacité et de la résistance du circuit, comme la constante de temps de la self-induction dépendait du coefficient de self et de la résistance; d'autre part, le courant va continuellement en diminuant jusqu'à zéro.

On voit donc que la force contre-électro-motrice du condensateur, qui croît avec la charge, met un temps appréciable pour atteindre la valeur de la force électromotrice agissante, celui-ci correspondant d'ailleurs à la fin de la charge.

Quand la force électro-motrice du circuit est alternative, le même phénomène se produit ; mais au bout d'un

temps très court, après quelques périodes, cette influence devient négligeable, et l'on peut admettre que la force contre-électro-motrice du condensateur atteint à chaque oscillation l'amplitude de la force électro-motrice appliquée au circuit; il peut même arriver que la tension du condensateur devienne supérieure à cette force électro-motrice, dans le cas de valeurs très petites de la capacité et de la résistance.

Or, lorsque la force électro-motrice agissante augmente le plus rapidement, elle doit produire le courant de charge maximum correspondant à un accroissement maximum du potentiel du condensateur ; mais c'est au passage du zéro de la courbe que la force électro-motrice a ses variations les plus grandes, puisqu'alors la courbe s'élève presque en ligne droite ; dans le voisinage du maximum au contraire, les variations de la force électro-motrice sont très faibles. Donc le maximum d'intensité du courant de charge correspond au zéro de la force électro-motrice et inversement ; par suite, l'intensité du courant présente une avance de 90 degrés sur la force électro-motrice effective.

Valeur de l'impédance de capacité. — Adoptons le même mode de représentation des forces électro-motrices effective et agissante et de la force électro-motrice de capacité (fig. 241). Nous devrons porter cette dernière en dessous de A O, puisqu'elle est en avance sur la force électro-motrice effective ; O D représentera comme précédemment la force électro-motrice résultante ou agissante qui devra vaincre la résistance ohmique et la force électro-motrice du condensateur. Cette résultante fait avec O A un angle φ qui dépend de la résistance et de la capacité du circuit.

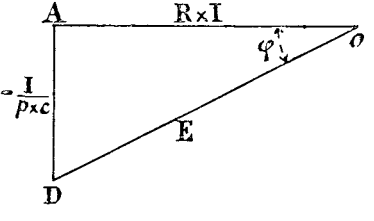


Fig. 241. — Détermination graphique de l'impédance de capacité.

On remarquera qu'un condensateur de faible capacité exi-

gera un haut potentiel pour emmagasiner une charge déterminée et donnera lieu, par suite, à une force contre-électromotrice très grande, car $q = v\,c$; l'effet est donc l'inverse de celui de la self-induction qui produit une force électro-motrice proportionnelle à L :

$$e_1 = \frac{2\pi}{T} \times L \times I = p \times L \times I$$

Par suite, on aura par analogie, pour la force contre-électromotrice du condensateur :

$$e = -\frac{1}{pC} \times I = -\frac{I}{p \times C}$$

c'est-à-dire que les choses se passent comme si le circuit possédait une self-induction égale à l'inverse de la capacité, ou plutôt que l'on eût :

$$p \times L = -\frac{1}{p \times C}$$

en tenant compte du signe moins, puisque A D est dirigé en sens contraire.

Le triangle rectangle nous donne comme précédemment :

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{p^2 \times C^2}}}$$

L'impédance ou résistance apparente est alors égale à :

$$Ra = \sqrt{R^2 + \frac{1}{p^2 \times C^2}}$$

Le terme $\frac{1}{p \times C}$ prend le nom de *réactance de capacité* ou *capacitance*.

La formule d'intensité instantanée sera :

$$i = \frac{E \times \left(K\sqrt{1 - M^2} + M\sqrt{1 - K^2}\right)}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{p^2 \times C^2}}}$$

La valeur de M sera par analogie :

$$M = \frac{1}{pC \times \sqrt{R^2 + \frac{1}{p^2 \times C^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 C^2 R^2}}$$

Si le décalage de la force électro-motrice agissante atteignait 90 degrés, M serait égal à 1, par définition, et l'on aurait :

$$\sqrt{1 + p^2 C^2 R^2} = 1 \text{ ou } p^2 C^2 R^2 = 0$$

Condition qui peut être remplie soit pour $C = 0$, soit pour $R = 0$; c'est-à-dire que si la résistance s'annule d'une part, la capacité a son effet maximum, et qu'une capacité nulle d'autre part, détermine le même décalage maximum de 90 degrés. Si, au contraire, la résistance ou la capacité sont infinies, M sera nul et la capacité n'aura aucun effet sur la circulation du courant.

171. **Effets de la self-induction et de la capacité combinées.** — Il reste à considérer le cas où le circuit présente à la fois de la résistance, de la self-induction et de la capacité; quatre forces électro-motrices seront alors en jeu et pourront être représentées comme précédemment (fig. 242).

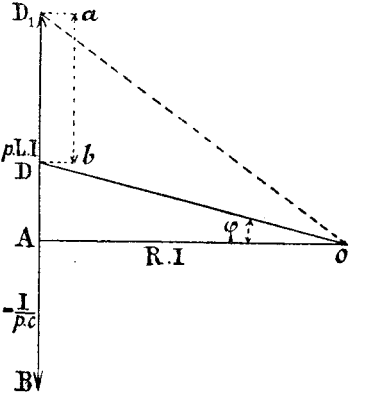


FIG. 242. — Détermination graphique de l'impédance de self et de capacité combinées.

Si le circuit n'avait pas de capacité, la force électro-motrice agissante serait $O D_1$, mais il faut retrancher de $A D_1 = p L I$, la force électro-motrice de capacité $A B = -\frac{I}{p C} = ab$ qui est directement opposée; le sommet du triangle s'abaisse ainsi en D et la force électro-motrice agissante est O D.

Si les forces électro-motrices de self et de capacité étaient égales, ab serait égal à $A D_1$ et le point D se confondrait avec A. On aurait alors :

$$p L I = \frac{I}{p C} \text{ ou } p L = \frac{1}{p C}$$

Ce que l'on peut écrire :

$$p^2 L C = 1 \text{ ou encore } p^2 = \frac{1}{L C}$$

autrement dit, le carré de la fréquence doit être égal à l'inverse du produit de la self et de la capacité, pour que leurs effets s'équilibrent. Ce fait donne le moyen d'annuler l'influence de la self-induction dans un circuit, en employant un condensateur dont la capacité répond à la relation ci-dessus.

L'intensité maximum sera donnée par l'expression :

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(p\,L - \frac{1}{p\,C}\right)^2}}$$

L'impédance devient :

$$p\,L - \frac{1}{p\,C} = \sqrt{\left(p\,L - \frac{1}{p\,C}\right)^2}$$

L'intensité instantanée est :

$$i = \frac{E \times (K\sqrt{1 - M^2} + M\sqrt{1 - K^2})}{\sqrt{R^2 + \left(p\,L - \frac{1}{p\,C}\right)^2}}$$

La valeur de M aura alors pour expression :

$$M = \frac{p^2\,L\,C - 1}{\sqrt{p^2\,C^2\,R^2 + (p^2\,L\,C - 1)^2}}$$

Si $p^2\,L\,C = 1$, cette expression devient nulle et l'angle φ de décalage égal à zéro.

Pour $M = 1$ et par suite $\varphi = 90$ degrés, on a :

$$\sqrt{p^2\,C^2\,R^2 + (p^2\,L\,C - 1)^2} = p^2\,L\,C - 1$$

Et en élevant au carré et réduisant :

$$p^2\,C^2\,R^2 = 0$$

Condition analogue à celle trouvée précédemment. Mais on peut encore avoir $M = 1$ dans le cas où L est très grand par rapport à R et où l'on peut négliger le terme $p^2\,C^2\,R^2$ devant le terme $(p^2\,L\,C - 1)^2$; on a alors en effet :

$$M = \frac{p^2\,L.\,C - 1}{\sqrt{(p^2\,L.\,C. - 1)^2}} = 1.$$

On remarque que les quantités L et C sont toujours accompagnées du terme p et que, par suite, les effets de la self et de la capacité varient avec la fréquence du courant alternatif.

Les effets dus à la self-induction et à la capacité sont inverses : la première retarde la phase du courant, la seconde la pousse en avant ; l'influence de la self augmente avec sa grandeur, celle de la capacité se fait sentir d'autant plus que la capacité est moindre.

On a comparé la self-induction à l'inertie de la matière et la capacité à l'élasticité des parois d'un réservoir. Le courant d'eau déterminé par une charge variable, ne suit pas immédiatement l'impulsion de cette charge, par suite de la force d'inertie ; de même la phase du courant est retardée par la self-induction du circuit. Par suite de l'élasticité des parois du réservoir interposé sur la conduite, le débit de l'eau peut atteindre son maximum avant la charge et le réservoir peut débiter lui-même en déterminant un courant de sens inverse, avant que la charge ait changé de signe ; ainsi le courant électrique atteint son maximum et change de sens avant la force électro-motrice agissante.

172. **Energie des courants décalés.** — La self-induction et la capacité des circuits déterminent, comme nous l'avons vu, un décalage entre le courant et la force électro-motrice agissante ; dans ce cas, on ne peut écrire :

$$W = E \times I = \frac{Emax. \times Imax.}{2}$$

Cherchons donc l'influence du décalage sur l'expression de l'énergie (fig. 243). Soit OI et OE les vecteurs représentant Emax. et Imax. avec leurs positions respectives déterminées par l'angle φ. A ce moment, les valeurs instantanées e et i sont représentées par les longueurs oa et ob et la puissance instantanée par :

$$w = e \times i$$

Or, on a :

$$e = Em. \times oa = Em. \times K;$$
$$i = Im \times ob$$

D'où :

$$w = Em. \times Im. \times K \times ob$$

Considérons maintenant les deux vecteurs OE_1 OI_1 en

avance de 90 degrés sur les deux précédents; les triangles rectangles égaux donnent :

$$oa_1 = Ea = \sqrt{1 - \overline{oa}^2}$$

$$ob_1 = Ib = \sqrt{1 - \overline{ob}^2}$$

puisque OE et OI sont pris pour unité d'après les conventions admises.

La puissance instantanée w_1, correspondant aux nouveaux vecteurs sera donc :

$$w_1 = \text{Em.} \times \text{Im.} \times \sqrt{1 - \overline{oa}^2} \times \sqrt{1 - \overline{ob}^2}$$

La somme des deux travaux instantanés sera par suite :

$$w + w = \text{Em.} \times \text{Im.} \times \left(\text{K} \times ob + \sqrt{1 - \text{K}^2} \times \sqrt{1 - \overline{ob}^2} \right)$$

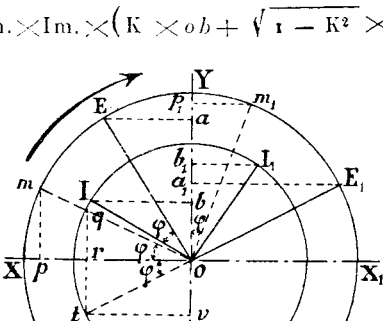


FIG. 243. — Energie des courants décalés.

Considérons le cas particulier où oI est sur oX; alors, $ob = 0$ et $oa = \text{K} = \text{M}$ (§ 162).

Dans ces conditions, l'expression ci-dessus se réduit à :

$$w + w_1 = \text{Em.} \times \text{Im.} \times \sqrt{1 - \text{M}^2}$$

Considérons encore oI sur oY, on aura $ob = 1$ et, par suite de l'égalité des deux triangles, mpo, m_1p_1o la valeur de oa deviendra :

$$op_1 = \text{K} = \sqrt{1 - \text{M}^2}$$

et le double travail instantané prendra encore la même valeur.

Nous trouverions ainsi que les travaux correspondant à tous les groupes de quatre vecteurs, deux à deux à angle droit, ont la même expression, et par suite une valeur constante qui ne dépend que de M et par suite de l'angle φ. Puisque tous ces travaux sont égaux, leur moyenne pour une phase complète aura la même valeur. Comme, d'autre part, cette expression se rapporte au travail de deux paires de vecteurs, elle nous donne le double du travail réel.

Par conséquent, le travail moyen ou la puissance aura pour valeur, la moitié de l'expression précédente, soit :

$$W = \frac{w + w_1}{2} = \frac{Em. \times Im.}{2} \times \sqrt{1 - M^2}$$

Si nous portons dans la formule les valeurs efficaces E et I qui sont telles qu'on a :

$$Em. = E\sqrt{2} \text{ et } Im. = I\sqrt{2}$$

il viendra :

$$W = E \times I \times \sqrt{1 - M^2}$$

Si le courant et la tension avaient la même phase, M serait nul et l'on retrouverait l'expression ordinaire de la puissance :

$$W = E \times I$$

Le décalage a donc pour résultat de réduire la puissance qui deviendrait nulle dans le cas d'une différence de phase de 90 degrés, pour laquelle M serait égal à l'unité.

On voit d'après cela, que pour évaluer la puissance d'un courant alternatif, il ne suffit pas de mesurer séparément à l'aide d'un électrodynamomètre et d'un électromètre, par exemple, l'intensité et la force électro-motrice ; le produit de ces quantités donnerait ce qu'on appelle les *watts apparents* et non les watts réels qui sont réduits en proportion du décalage.

On doit donc mesurer directement la puissance des courants alternatifs à l'aide du wattmètre ; encore faut-il que l'instrument et notamment la bobine mobile en dérivation ne présente pas de réactance notable.

L'emploi successif et concourant des appareils de mesure d'intensité, de voltage et d'énergie, permet de déterminer la valeur du coefficient $\sqrt{1 - M^2}$ auquel on donne le nom de *fac-*

teur de puissance. En effet le wattmètre donne directement la valeur de la puissance du circuit d'utilisation sur lequel il est installé soit :

$$W = E \times I \times \sqrt{1 - M^2}$$

l'on tire de là :

$$\sqrt{1 - M^2} = \frac{W}{EI}$$

ce qui détermine le facteur de puissance, les termes du second membre étant mesurés par les trois instruments. On voit que le facteur de puissance n'est autre chose que le rapport des watts réels aux watts apparents.

Composantes wattées et déwattées. — On remarquera que tout se passe comme si le courant, au lieu d'une intensité I, n'avait qu'une intensité $I \times \sqrt{1 - M^2}$ qui ne représente qu'une fraction de I; on peut donc se demander ce que devient l'autre partie de I qui ne concourt pas à la production du travail.

Si nous nous reportons à la figure précédente, le triangle rectangle *o r t* correspondant au vecteur *o t*, donne :

$$or = \sqrt{1 - M^2}$$

et le courant instantané sera :

$$i = I \times \sqrt{1 - M^2}$$

si nous supposons que $ot = oI$ représente l'intensité maximum; c'est donc la projection du courant *o t* sur la tension OX en avance d'un angle φ, c'est-à-dire la composante de l'intensité dans la direction de cette tension, qui produit le travail; l'autre composante *o v*, obtenue en terminant le parallélogramme des forces, est perpendiculaire sur la tension et ne fait aucun travail utile.

La première composante, qui est en concordance de phase avec la force électro-motrice, est la *composante wattée*, l'autre la *composante déwattée* du courant. Cette dernière sert à produire l'aimantation du circuit magnétique, qui ne consomme aucun travail, abstraction faite de l'énergie absorbée par hystérésis et qui ne peut être empruntée qu'à la composante wattée, génératrice de toute l'énergie consommée dans le circuit.

CHAPITRE XI

DYNAMOS A COURANTS ALTERNATIFS
DESCRIPTION
DE DIVERS TYPES D'ALTERNATEURS

173. **Propriétés générales des alternateurs.** — Les dynamos destinées à fournir des courants alternatifs aux circuits d'utilisation sont généralement désignées sous le nom d'*alternateurs*.

La génération des courants à l'intérieur de ces dynamos se produit exactement de la même manière que dans les dynamos à courant continu. Nous avons vu, en effet, que dans l'anneau Gramme, le courant change de sens dans chaque spire, chaque fois que la spire traverse le plan de commutation ; si donc on recueillait directement le courant comme il se forme dans la spire, on obtiendrait un courant changeant de sens deux fois par tour, si l'inducteur est bipolaire, et par conséquent un courant alternatif; dans une machine multipolaire il y aurait autant d'alternativités que de pôles, ou de périodes que de couples de pôles.

Les courants naissent donc toujours à l'état alternatif dans l'induit des dynamos, et si l'on peut obtenir des courants continus, c'est-à-dire ayant une intensité et un sens constants, c'est grâce à la transformation des courants primitivement engendrés dans l'induit, au moyen de commutateur collecteur.

Aussi, au lieu d'employer ce collecteur sectionné, don

les diverses lames ont pour effet, en se substituant les unes aux autres au contact des balais, de lancer toujours le courant dans le même sens, dans le circuit extérieur, on recueillera les courants engendrés dans l'induit, directement sur deux bagues pleines isolées, montées sur l'arbre, auxquelles aboutiront respectivement les deux extrémités du circuit induit.

Les machines à courants alternatifs sont toujours multipolaires, car il est nécessaire que les alternances se succèdent rapidement, au moins pour les courants destinés à l'éclairage, de telle sorte que le filament incandescent n'ait pas le temps de se refroidir, entre les maxima successifs de l'intensité. Si le nombre des pôles inducteurs est égal à 12 par exemple, il y aura 12 alternativités ou 6 périodes par tour, et il suffira de donner à l'organe mobile, inducteur ou induit, une vitesse angulaire de 7 tours par seconde, pour obtenir la fréquence de 42 périodes, qui doit d'ailleurs être considérée comme un minimum. On emploie le plus généralement des fréquences de 45 à 50 périodes et jusqu'à 150 périodes par seconde.

174. Classification des alternateurs. — On distingue actuellement deux grandes classes dans les alternateurs; ceux qui donnent des *courants alternatifs simples* d'une part; ceux qui produisent des *courants polyphasés* d'autre part.

Les constructions des deux classes de générateurs ne diffèrent pas sensiblement en principe, puisque les courants polyphasés sont constitués par l'ensemble de deux ou trois courants alternatifs simples. On conçoit donc, qu'étant donné un induit d'alternateur ordinaire, on puisse recueillir facilement sur cet induit des courants distincts, décalés d'un quart ou d'un tiers de phase, par une simple combinaison de connexions judicieuses des diverses bobines de l'enroulement.

A un autre point de vue, les alternateurs pourront se classer suivant deux types comportant soit un *induit sans fer*, soit un *induit à noyau de fer*.

La suppression du noyau de fer dans le premier type

d'alternateurs se rencontre plus fréquemment que dans les dynamos à courants continus, car elle est particulièrement justifiée par l'importance considérable que prennent les phénomènes d'hystérésis et les courants de Foucault dans les armatures de fer dont les enroulements sont parcourus par des courants à grande fréquence.

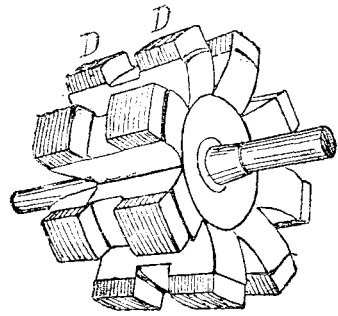


FIG. 244.— Fer tournant d'Œrlikon.

Les alternateurs peuvent encore être classés, comme les dynamos à courants continus, au point de vue des enroulements induits et former les classes d'induit *à anneau ordinaire*, *à anneau plat*, *à tambour* et *à disque*.

Enfin, l'organe mobile peut être, suivant les types, soit l'induit, soit l'inducteur. Dans un troisième type plus récent, l'induit et l'inducteur sont fixes et c'est la carcasse magnétique ou plutôt une partie de cette carcasse qui se déplace en faisant varier périodiquement la reluctance et, par suite, le flux du circuit magnétique. Comme exemple on a représenté (fig. 244) le fer tournant de l'alternateur d'Œrlikon que nous décrivons plus loin en détail.

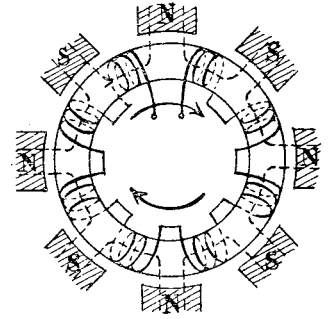


FIG. 245. — Induit d'alternateur à anneau.

TYPE A ANNEAU. — Il comportera un inducteur dont les pôles multiples seront disposés radialement et concentriquement à l'anneau, soit à l'extérieur (fig. 245), soit à l'intérieur de celui-ci. Dans ce dernier cas, l'induit est plus généralement fixe et l'inducteur mobile.

Toutes les bobines sont reliées en série et ne forment qu'un seul circuit, dont les extrémités A et B sont reliées respectivement aux bagues isolées formant collecteurs.

L'ensemble de l'inducteur présente ici autant de lignes neutres que d'espaces interpolaires, c'est-à-dire de pôles; d'autre part, il y a autant de bobines que de pôles; il en résulte que toutes les bobines se trouvent placées en même temps dans des positions identiques par rapport aux pôles voisins, soit dans l'axe de ces pôles par exemple, soit sur les lignes neutres.

Il est à remarquer, toutefois, que les bobines successives sont traversées par des flux magnétiques alternativement de sens contraire, comme le montrent les flèches placées sur les circuits pointillées; elles sont donc le siège de courants de sens inverse et les forces électro-motrices seraient opposées et s'annuleraient deux à deux, si l'on ne prenait soin de diriger l'enroulement ou les connexions des bobines successives, de manière à faire concorder les impulsions dans le même sens.

C'est ce qui est réalisé dans le montage du schema ci-dessus où l'enroulement des diverses bobines est alternativement dextrorsum et sinistrorsum.

On arriverait au même résultat en enroulant toutes les sections dans le même sens (fig. 246), mais en reliant le bout finissant de la première bobine au bout finissant de la seconde, puis le bout commençant de la seconde au bout commençant de la troisième et ainsi de suite.

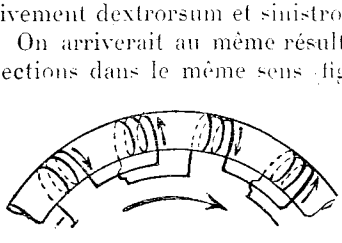


Fig. 246. — Bobines enroulées dans le même sens.

On voit qu'ainsi, comme dans le premier cas du reste, les impulsions des forces électro-motrices de sens inverse dans l'intérieur des bobines successives, ont une action concordante pour faire circuler le courant dans le même sens, dans l'ensemble du circuit.

Système a anneau plat. — Celui-ci comporte un induc-

teur formé d'une double couronne d'électros, montés sur deux flasques circulaires, placées en regard sur le même bâti.

Ces deux couronnes laissent entre elles un espace relativement étroit dans lequel tourne l'anneau plat de l'induit ; les pôles sont alternativement Nord et Sud sur une même couronne fig. 247 , mais ce sont des pôles de même nom qui se font vis-à-vis, de part et d'autre de l'induit. Le flux magnétique forme donc deux séries de circuits qui restent cantonnées dans chacune des moitiés de l'épaisseur de l'anneau, de part et d'autre de l'axe X Y.

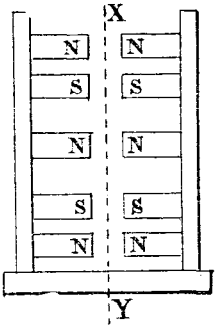


Fig. 247. — Induit à anneau plat.

Disposition en tambour. — Elle comporte des bobines aplaties disposées sur la surface du noyau. Ces bobines sont plus larges que la jante de l'induit, *afin qu'une fois mises en place*, on puisse rabattre les extrémités sur les joues de l'armature et, par ce moyen, les fixer solidement comme il convient.

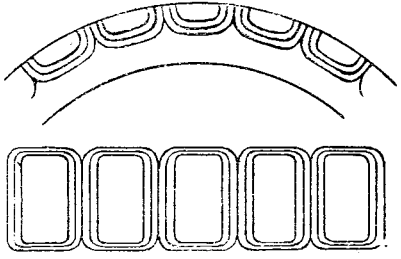


Fig. 248. — Enroulement en tambour.

Dans le cas d'un inducteur mobile et d'un induit fixe fig. 248), l'enroulement induit est fait suivant le système à tambour; il est généralement logé dans des cannelures ménagées sur la face intérieure d'une carcasse annulaire qui entoure l'inducteur mobile. D'autres fois, les cannelures sont remplacées par des saillies, formant de véritables

projections polaires, sur lesquelles se font les enroulements induits.

Induit a disque. — Il est caractérisé par l'épaisseur très réduite des bobines, qui sont montées à la périphérie d'un disque, de manière à former une couronne complète. Ce disque tourne entre deux séries d'électros disposés comme dans les inducteurs des anneaux plats, mais avec cette différence que les pôles de nom contraire se trouvent face à face (fig. 249).

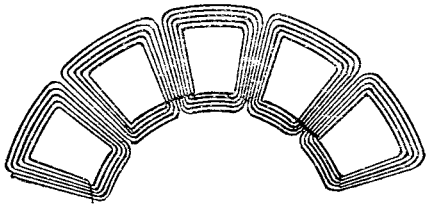


Fig. 249.— Induit à disque.

L'entrefer est, en effet, réduit au minimum, et le flux peut traverser assez facilement l'épaisseur de l'induit, qui d'ailleurs, vu cette circonstance, est dépourvu de noyau de fer. On supprime ainsi radicalement les pertes dues aux courants de Foucault et à l'hystérésis, mais la reluctance du circuit magnétique inducteur est plus grande, et la dépense d'excitation pour obtenir un flux d'induction égal s'en trouve augmentée d'autant.

Enroulement enchaîné. — Les alternateurs à courants polyphasés comportent en outre un bobinage spécial, que l'on peut désigner sous le nom d'*enroulement enchaîné* (fig. 250). En effet, dans cette disposition, les bobines des différents circuits empiètent les uns sur les autres, de telle sorte que, dans le *système triphasé*, par exemple, une bobine de phase intermédiaire est chevauchée par une de phase en retard et par une de phase en avance. Ces bobines sont le plus souvent encastrées dans des canelures du noyau induit. Les diverses bobines sont donc enchevêtrées, pour ainsi dire, comme les anneaux d'une chaîne.

Dans le schéma (fig. 250) qui représente la projection horizontale d'une partie de l'anneau, chaque bobine est figurée par une seule spire, et l'enroulement de chaque

circuit progresse en zigzag sur le pourtour de l'armature. On voit que la distance angulaire des deux brins d'une spire est égale à celle des axes de deux pôles consécutifs de nom contraire, et qu'à chaque pôle inducteur correspondent trois brins appartenant à chacun des trois circuits polyphasés. Mais si l'on considère, d'autre part, les bobines constituées chacune par l'ensemble des deux brins d'un même circuit, on reconnaît que les axes de trois bobines consécutives appartenant à trois circuits différents, occupent l'espace angulaire de deux pôles de même nom formant le circuit magnétique complet et divisent cet espace en trois parties égales ; les courants devront donc présenter entre eux une différence de phases d'un tiers de période.

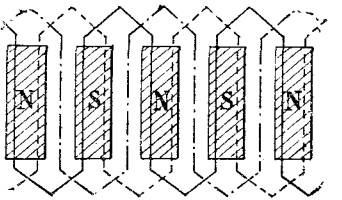


FIG. 250. — Enroulement enchaîné.

ENROULEMENT GRAMME TRIPHASÉ. — La disposition précédente se rapproche du type d'enroulement en tambour ; on peut aussi utiliser l'*enroulement Gramme* en combinant convenablement les connexions des bobines en trois circuits distincts. Il suffit pour cela de relier ensemble les bobines de même phase, c'est-à-dire celles qui sont semblablement placées, à chaque instant, dans le champ magnétique.

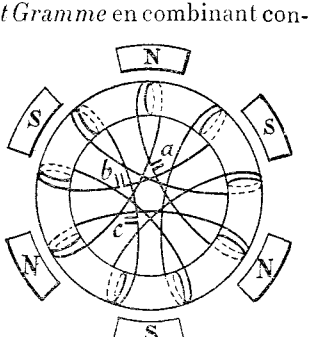


FIG. 251 — Enroulement Gramme triphasé.

On obtiendra ainsi, dans le cas d'une génératrice triphasée, la disposition ci-contre (fig. 251), dans laquelle les axes de deux bobines induites consécutives embrassent, sur l'anneau, un angle égal au tiers de la distance angulaire de deux pôles

consécutifs de même nom. En disposant deux séries de bobines décalées d'un quart de période, on obtiendrait des courants biphasés.

Les courants sont recueillis par des bagues isolées, auxquelles aboutissent les extrémités des circuits induits et qui sont en nombre égal aux conducteurs extérieurs qui, ainsi que nous le verrons plus loin, peuvent être réduits à trois, tant pour les courants triphasés que pour les biphasés.

Induit a pôles. — On utilisera de la même manière le type d'induit d'alternateur pourvu de saillies sur lesquelles s'enroulent les bobines. Cette disposition est représentée dans le schéma ci-contre. L'inducteur est constitué par un croisillon à quatre pôles, entouré d'un anneau portant huit noyaux de bobines induites en saillie sur la périphérie intérieure. Dans la figure 252, les pôles de l'inducteur se trouvent devant les quatre bobines du circuit n° 1, qui sont alors traversées par le flux maximum coupant les fils induits normalement; tandis que les bobines du circuit n° 2, situées dans la ligne neutre des champs magnétiques, ne sont pas soumises à l'induction; les forces électro-motrices qui prennent naissance dans les deux circuits sont donc décalées d'un quart de phase.

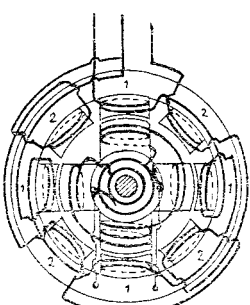


Fig. 252. — Induit à pôles.

On établirait de la même manière une génératrice à courants triphasés, en portant à trois le nombre des projections de l'induit, dans l'intervalle correspondant à chaque champ magnétique.

Cette disposition, comme toutes celles dans lesquelles l'induit est fixe, dispense d'établir des bagues collectrices: les extrémités des circuits sont reliées aux bornes fixes de la machine. Toutefois, le courant continu qui alimente

les inducteurs devra nécessairement accéder à cet organe mobile par des bagues et des frotteurs reliés au circuit de l'excitatrice.

Enroulement fermé polyphasé. — On peut encore obtenir des courants polyphasés d'une dynamo ordinaire à enroulement fermé, en reliant à des bagues isolées les différents points de l'enroulement qui occupent dans les champs magnétiques inducteurs des positions correspondant à des différences de phases déterminées.

Considérons, en effet, un anneau Gramme recouvert de son enroulement sans fin et relions à trois bagues (fig. 253) les points *a*, *b* et *c*, situés à un intervalle angulaire d'un tiers de circonférence, l'un par rapport à l'autre.

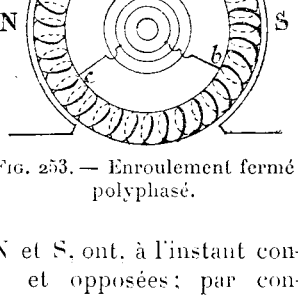


Fig. 253. — Enroulement fermé polyphasé.

Il est évident que les points *c* et *b*, semblablement placés par rapport aux pôles N et S, ont, à l'instant considéré, des tensions égales et opposées; par conséquent la différence de tension entre ces deux points est nulle. Au contraire, la différence de tension entre les points *c* et *a* d'une part, *b* et *a* d'autre part est voisine du maximum, puisque la tension de *a* est nulle: ces différences de tension seront d'ailleurs de signe contraire, puisqu'elles sont engendrées dans les demi-cadrans opposés. On conçoit donc que l'on obtiendra ainsi trois forces électro-motrices et trois courants décalés d'un tiers de période; car en se reportant aux courbes représentatives des courants triphasés, on voit que la valeur nulle de l'un des courants est dans le voisinage des maxima positif et négatif des deux autres courants.

On peut également obtenir de la même manière des courants biphasés.

Système a reluctance variable. — Il existe enfin un type d'alternateur à inducteur et induit fixes, dans lequel

le seul organe mobile est constitué, soit par une couronne dentée, soit par des pièces polaires séparées qui viennent s'interposer, en tournant, dans le circuit magnétique, et font ainsi varier la reluctance et, par conséquent, le flux embrassé par les bobines induites ; c'est pourquoi on désigne aussi ces machines sous le nom d'*alternateurs à reluctance variable ou à fer tournant*.

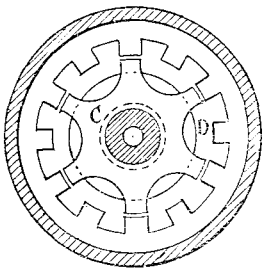


FIG. 254. — Alternateur à fer tournant.

Imaginons une demi-caisse de tambour en tôle, portant intérieurement des projections radiales sur lesquelles sont enroulées les bobines induites (fig. 254) ; sur le fond du tambour est fixée la bobine inductrice D, dont le plan est perpendiculaire à l'axe. Un cylindre de fer ou d'acier *a* est manchoné sur l'arbre de l'alternateur, et il porte un croisillon de tôle à six branches C.

Le flux engendré par la bobine inductrice se répand dans la masse du tambour, passe par les projections polaires à travers les bobines induites, et se referme par les branches de l'étoile mobile et par le manchon *a*.

Comme le nombre des bobines induites est double de celui des branches polaires de l'étoile, il arrive que chacun des noyaux induits se trouve successivement en regard d'un bras ou d'un creux de l'étoile, ce qui modifie la reluctance du circuit magnétique et, par suite, l'intensité du flux à travers chaque bobine.

Dans ce système, on supprime donc tout contact mobile, collecteurs et balais, et la dépense d'excitation est notablement diminuée : car la bobine inductrice étant généralement unique, le champ magnétique est concentré dans une seule pièce de très grand volume, qui présente une perméabilité supérieure et réduit les pertes dues aux dérivations magnétiques.

175. **Collecteurs.** — Comme nous l'avons vu, le collecteur des machines à courant alternatif et polyphasé est constitué généralement par deux ou un plus grand nombre de bagues montées sur l'arbre (fig. 255). Ces bagues sont serties dans des anneaux en bois ou toute autre matière isolante; les extrémités des circuits y aboutissent, et la communication se fait avec le circuit extérieur par l'intermédiaire de deux balais. Dans une autre disposition, les balais sont remplacés par des anneaux en deux parties, à l'extérieur desquels tournent les bagues calées sur l'arbre

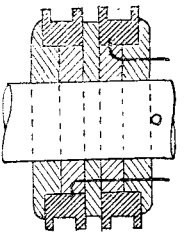


FIG. 255 — Bagues collectrices.

Il n'y a donc pas de collecteurs sectionnés comme dans la machine à courant continu, point d'étincelles résultant de ce sectionnement, et, partant, point de calage spécial des balais. On peut donc distinguer immédiatement, à l'aspect seul du collecteur, une machine à courant continu d'un alternateur.

De ce fait la construction de l'alternateur se trouve notablement simplifiée; la suppression du collecteur sectionné a surtout des avantages marqués dans le cas des machines à haute tension, qui seraient impraticables au delà de 2000 volts, par suite de la production des étincelles excessivement violentes, qui brûlent rapidement le collecteur et les balais des machines à courant continu. C'est une des raisons principales qui font adopter les courants alternatifs lorsqu'on doit effectuer le transport de l'énergie électrique à haute tension.

176. **Excitation.** — Le mode de génération des courants dans les alternateurs, comme dans les dynamos à courant continu, nous montre que les pôles inducteurs doivent toujours conserver la même polarité, puisque cette condition a été admise implicitement dans la théorie exposée.

Il faut *donc nécessairement que les inducteurs soient* excités par des courants continus, seuls capables de fournir l'aimantation fixe et constante qui est indispensable.

On empruntera généralement le courant voulu à une dynamo excitatrice à courant continu. Cette dynamo peut être complètement distincte de l'alternateur, mais elle est souvent montée sur le bâti de celui-ci.

Cette excitation séparée est commode en raison de la facilité de réglage du courant excitateur, par l'interposition de rhéostats dans le circuit de connexion, ou même dans le circuit de l'inducteur si l'excitatrice est une dynamo schunt.

On peut toutefois utiliser également l'auto-excitation, en redressant une partie du courant de l'alternateur au moyen d'un commutateur approprié monté sur l'arbre. Soit, par exemple, un alternateur à six pôles (fig. 256) ; le commutateur se composera d'une sorte de collecteur à six lames isolées, monté sur l'arbre de la machine. Ces lames sont reliées trois par trois, comme l'indique la figure, et chaque groupe ainsi formé est mis respectivement ment en communication avec chacune des extrémités du circuit inducteur.

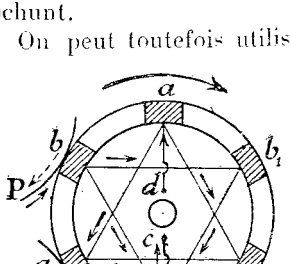


FIG. 256. — Commutateur redresseur.

Deux balais P et Q, mis en relation avec une dérivation prise sur l'enroulement induit, frottent sur le commutateur, de telle sorte qu'ils sont dans le même temps en contact, l'un avec une lame du premier groupe, l'autre avec une lame du second.

A un moment donné, le courant ayant le sens des flèches pleines, passera du balai P à l'inducteur et au balai Q, par les connexions c et d ; un instant après, le courant suit le sens des flèches pointillées, mais alors la lame a_2 s'est substituée à la lame b et le courant conservera le même sens qu'auparavant dans les connexions du commutateur t dans l'inducteur.

177. **Couplage des alternateurs.** — Le couplage en série des alternateurs n'offre pas d'intérêt pratique, puisque ces machines sont particulièrement propres à donner par elles-mêmes de hautes tensions.

On conçoit d'ailleurs que ce couplage présenterait de sérieuses difficultés par suite des considérations suivantes :

Supposons qu'à un moment donné deux machines, que nous désignerons par A et B, tournent à la même vitesse et en concordance de phases; la force électro-motrice totale est égale à la somme des forces électro-motrices individuelles de chacune d'elles, et la puissance de l'ensemble est aussi double de celle que développe chacune des machines.

Mais si, pour une raison quelconque, l'une des machines, A par exemple, se ralentit légèrement, la phase de la force électro-motrice de A se rapprochera de celle du courant commun aux deux induits, et les watts réels fournis par cette machine seront plus grands que ceux relatifs à B, en raison de la différence de leurs facteurs de puissance.

La première machine étant plus chargée de ce fait, tendra à tourner encore moins vite; en même temps, la résultante des deux forces électro-motrices décalées déterminera un retard croissant du courant, qui s'écartera plus de la tension de B que de celle de A, de telle sorte que la machine B, déchargée d'autant, ira en croissant de vitesse. L'écart des vitesses augmentera donc jusqu'à ce que les machines soient en complète opposition de phases.

On peut encore considérer que, dans ces circonstances, la machine B joue le rôle de réceptrice vis-à-vis de la machine A, plus puissante, qui tourne comme génératrice; c'est ainsi, du reste, que se fait la transmission d'énergie entre deux alternateurs placés aux extrémités d'un même circuit. La génératrice produisant une puissance $E \times I$ et la réceptrice développant une puissance $e \times I$ qui se transforme en travail moteur, la puissance disponible sur le circuit sera seulement :

$$W = (E - e) \times I$$

Dans le cas qui nous occupe, la dynamo B reçoit donc une double impulsion du moteur mécanique qui l'actionne et de l'énergie électrique que lui fournit la dynamo A. Pour ces diverses raisons, l'écart des vitesses de B et de A va en croissant, et il en est de même de la différence de phase, qui augmente de plus en plus jusqu'à ce que la force électro-motrice de A soit directement opposée à celle de B. A ce moment, si E est égal à e, on voit que la puissance transmise au circuit d'utilisation est nulle.

Les machines continuent alors à fonctionner dans ces conditions, et si l'on cherche à rompre cet état d'équilibre stable, elles y reviendront d'elles-mêmes et tourneront alors d'un mouvement synchrone.

On ne peut donc pas pratiquement coupler les alternateurs en série.

Le même raisonnement nous montre au contraire que le couplage en quantité peut se faire aisément et se maintenir d'une manière tout à fait stable. En effet, le montage en quantité consiste justement à mettre les forces électromotrices en opposition en reliant entre eux les pôles de même nom. S'il en est ainsi et que les forces électromotrices soient égales, les deux dynamos déverseront leurs courants dans le circuit extérieur par les points de connexion a et b (fig. 257).

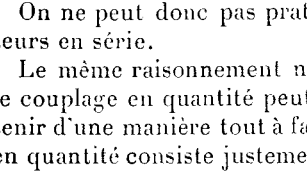


FIG. 257. — Couplage en quantité.

Les dynamos tourneront alors d'un mouvement synchrone ; mais si la vitesse de A vient à augmenter, les deux forces électro-motrices n'étant plus en opposition, donneront lieu à une résultante et à un courant dont les phases seront plus voisines de la machine en avance ; la puissance de A croîtra en conséquence et cette machine tendra à envoyer un courant dans la dynamo B, dont la vitesse s'accélérera.

L'augmentation de vitesse de A sera combattue en

même temps par son augmentation de charge, et le synchronisme des deux vitesses se rétablira automatiquement.

On ne doit pas toutefois introduire un alternateur en dérivation sur un circuit alimenté par un ou plusieurs autres alternateurs, avant de s'être assuré que, non seulement sa vitesse et son voltage sont les mêmes que ceux des autres dynamos, mais encore que sa force électromotrice est à peu près en concordance de phase avec celle du circuit considéré.

Il faut notamment que les connexions soient faites entre les pôles qui présentent à cet instant le même signe, sans quoi le courant se fermerait en court-circuit à travers les génératrices et brûlerait les machines.

On se sert à cet effet de *synchroniseurs* ou *indicateurs de phases.*

Le principe de ces indicateurs consiste dans l'emploi de deux lampes montées en série sur l'un des pôles du circuit général et sur l'un de ceux de l'alternateur dont on veut opérer le couplage.

Si les deux pôles sont, à l'instant considéré, de même signe et en concordance de phase, les forces électromotrices étant opposées, il ne passera aucun courant dans les lampes, qui resteront éteintes; si les pôles sont de signe contraire, les forces électro-motrices seront en série et les lampes s'allumeront.

Il faudra donc relier ensemble les pôles des dynamos en connexion avec les lampes, dès que celles-ci s'éteindront, puis l'on mettra les lampes hors circuit. Les machines se trouveront alors montées en quantité, et la concordance voulue se maintiendra dès lors indéfiniment.

Quand les dynamos sont à haute tension, on est obligé d'avoir recours à de petits transformateurs intermédiaires, T_1 et T_2 (fig. 258), appareils que nous étudierons ailleurs, et qui comportent, comme les bobines de Ruhmkorff, deux circuits, l'un primaire à haute tension, en dérivation sur les pôles des dynamos A et B, l'autre secondaire à basse tension. Les lampes L_1 L sont ici en série sur les circuits secondaires, qui peuvent être connectés de telle sorte que

la concordance de phases coïncide, soit avec le maximum d'intensité lumineuse, soit avec l'extinction des lampes.

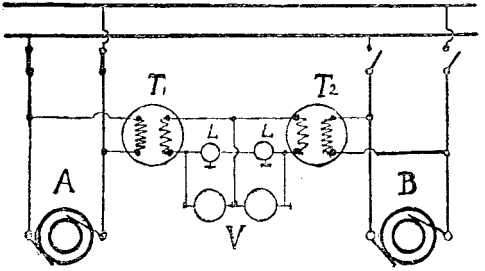


Fig. 258. — Accouplement de deux alternateurs.

Les voltmètres V servent à constater l'égalité de voltage des dynamos.

Nous décrirons maintenant quelques types usuels de dynamos à courants alternatifs.

178. **Alternateur Ferranti.** — Cet alternateur est pourvu

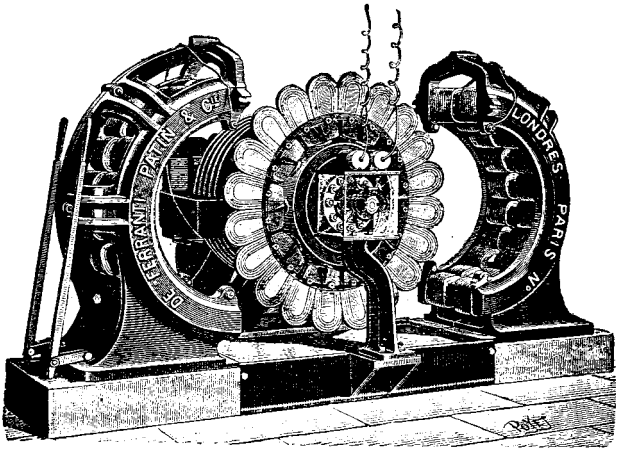


Fig. 259. — Alternateur Ferranti.

d'un induit sans fer; il appartient donc au type des machines avec induit à disque, tournant entre deux cou-

ronnes d'électros, à pôles de même nom, en regard.

La carcasse magnétique (fig. 259) est constituée par deux flasques en fonte annulaires, sur les faces intérieures desquelles sont plantés les noyaux en fer des électros. Ces flasques sont reliées extérieurement par des entretoises venues de fonte avec la carcasse et maintenues ensemble par des boulons. La culasse ainsi formée peut d'ailleurs se séparer en deux parties, suivant un plan vertical passant par l'arbre de la machine; ces demi-culasses sont rapprochées et boulonnées en temps ordinaire, mais on peut les écarter l'une de l'autre, en les déplaçant à l'aide de leviers sur leurs glissières, de manière à dégager l'induit pour le réparer au besoin.

L'espace libre entre les pièces polaires, qui constitue l'entrefer, est inférieur à 2 centimètres. C'est pourquoi l'induit se présente sous l'aspect d'un disque très aplati dont les bobines induites forment le pourtour (fig. 260).

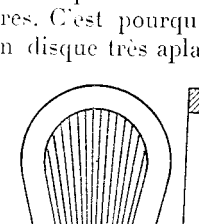


FIG. 260. — Détail d'une bobine induite.

Celles-ci comportent un noyau en bronze, sur lequel est enroulé un conducteur à ruban de cuivre nu, qui est placé en même temps qu'un ruban de fibre blanche vulcanisée, de manière à isoler les différentes spires. Le noyau de bronze est divisé par des rainures, pour éviter les courants de Foucault. Ces diverses bobines sont montées, côte à côte, sur une couronne en bronze calée sur l'arbre, dont elles sont isolées par des pièces de porcelaine.

Il y a autant de bobines induites que de couples d'électros; ces bobines sont connectées deux à deux en quantité et tous les groupes sont reliés en une série, pour ajouter leurs tensions. Les extremités du circuit aboutissent à deux bagues; leurs frotteurs sont constitués par des anneaux divisés, dont les deux parties sont appliquées par des ressorts sur le pourtour des bagues; ces anneaux sont soudés aux conducteurs du circuit extérieur.

Comme cette machine est destinée à produire des courants à haute tension, de plusieurs milliers de volts, il convient de rendre inaccessible toutes les parties conductrices non recouvertes d'isolants : c'est pourquoi le collecteur est enfermé dans une cage de verre d'où émergent

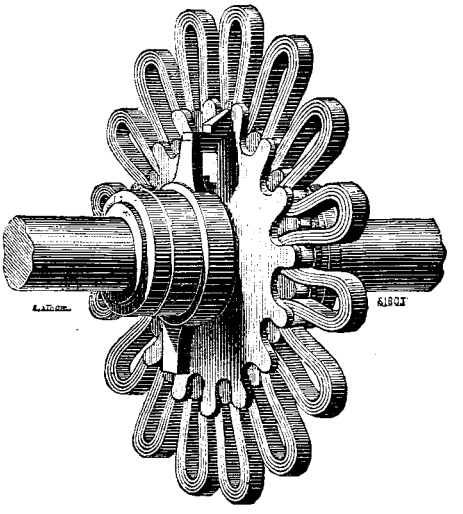


Fig. 261. — Induit Ferranti étoilé.

seulement les conducteurs extérieurs recouverts d'enveloppes isolantes.

Pour les dynamos à tension moins élevée, M. Ferranti construit un induit dont l'enroulement est formé d'un circuit unique, constitué par la superposition de quatre couches de rubans de cuivre et de fibres isolantes, de manière à former une sorte de couronne étoilée (fig. **261**). Les boucles sont prises par leurs extrémités inférieures entre deux plateaux portant des projections radiales, et sont arrêtées par des entretoises réunissant les extrémités des projections, d'un plateau à l'autre.

Dans cette disposition, il doit y avoir deux fois plus de

champs magnétiques N S que de boucles L, ou encore autant de champs que de branches de boucles (fig. 262). En effet, comme les champs inducteurs changent alternativement de sens, il est nécessaire que deux champs consécutifs correspondent à chacune des branches d'une

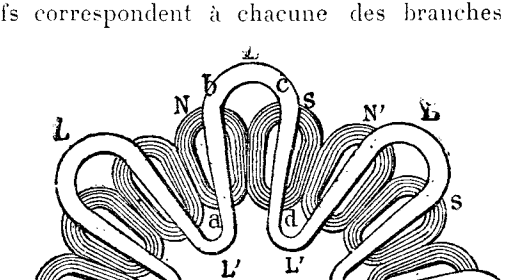


Fig. 262. — Schéma de l'inducteur et de l'induit.

boucle, pour y développer des forces électro-motrices concourantes et non opposées.

Cet enroulement ne saurait convenir à l'obtention des hautes tensions, car il a pour effet de rapprocher des spires à des potentiels très différents qui, dans ce cas, prendraient une valeur élevée capable de déterminer des étincelles, d'une spire à l'autre, à travers les isolants.

Nous citerons également, pour mémoire, l'alternateur Siemens, qui est le type classique des induits sans fer et qui ne diffère essentiellement de la machine Ferranti que par les bobines induites, qui sont montées sur des cylindres en bois, munis de joues évidées en maillechort.

Les champs inducteurs de ces machines sont excités par des dynamos séparées à courant continu ; l'excitatrice de la dynamo Ferranti est montée sur le même arbre que l'induit de l'alternateur.

179. **Alternateur Ganz du Creusot.** — Dans ce système, l'inducteur mobile tourne à l'intérieur de la couronne

constituant l'induit fixe ; l'enroulement des spires induites est fait sur des bobines plates, fixées sur la face intérieure de la carcasse de l'induit.

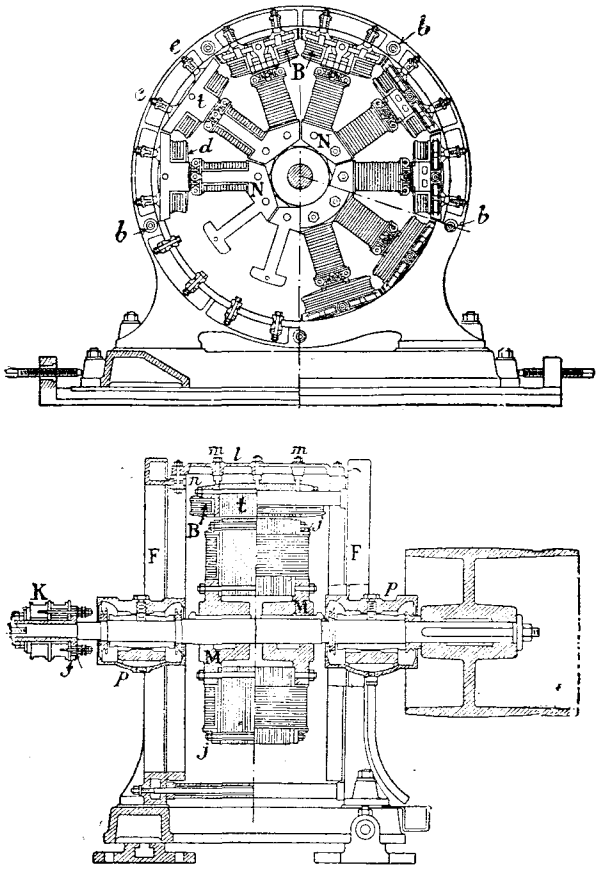


Fig. 263. — Alternateur Ganz (coupe et élévation).

Les deux flasques en fonte E, qui constituent la carcasse de cet organe, sont boulonnées sur un bâti général placé

sur des glissières; ces flasques sont réunies ensemble, de distance en distance, par de forts boulons transversaux *b;* c'est entre ces flasques que sont suspendues les bobines induites B (fig. 263).

Les noyaux de ces bobines *t* sont composés de feuilles de tôle, découpées en forme de T et assemblées par des boulons transversaux. Les bobines, enroulées d'avance, sont enfilées sur la projection radiale formée par la courte branche du T et maintenues en place par une bague *d* coincée sur la face polaire du noyau.

Chaque noyau est soutenu par deux entretoises de fonte *e*, qui prennent leurs points d'appui et sont boulonnées sur les rebords intérieurs des flasques. Ces entretoises sont pourvues de renflements *m* formant douilles, à l'intérieur desquelles s'engagent trois boulons qui vont se visser, d'autre part, dans autant de pièces de bronze *n* découpées suivant le profil des tôles; l'une de ces pièces est intercalée au milieu du paquet de tôles, les deux autres servent de joues latérales au noyau; le boulon qui traverse cet ensemble parallèlement à l'arbre, rend le tout solidaire des entretoises et de la carcasse générale. Ces bobines sont donc facilement amovibles, car les noyaux sont fixés séparément, bien qu'ils soient juxtaposés et forment par leur ensemble, une couronne complète entourant l'inducteur.

Les noyaux des bobines inductrices N sont formés de tôles profilées en forme d'U, à branches écartées dont chacune porte une bobine : ces tôles sont serrées et maintenues par des boulons, entre les brides de deux moyeux en fonte M calés sur l'arbre; les bobines enfilées sur les noyaux sont retenues par des joues en bronze *j*, fixées au moyen de boulons, sur l'extrémité polaire des noyaux.

Il y a autant d'électros que de bobines induites; leur nombre varie de 6 à 40, suivant la puissance des alternateurs qui varie de 10 à 360 kilowatts.

La figure montre la section des collecteurs K isolés entre eux et montés à l'extrémité de l'arbre, sur un manchon en fonte *f*, dont ils sont encore isolés par de la fibre ou de l'ébonite.

Les paliers p sont supportés par des traverses en fonte boulonnées, suivant le diamètre horizontal, sur les faces extérieures des flasques du bâti.

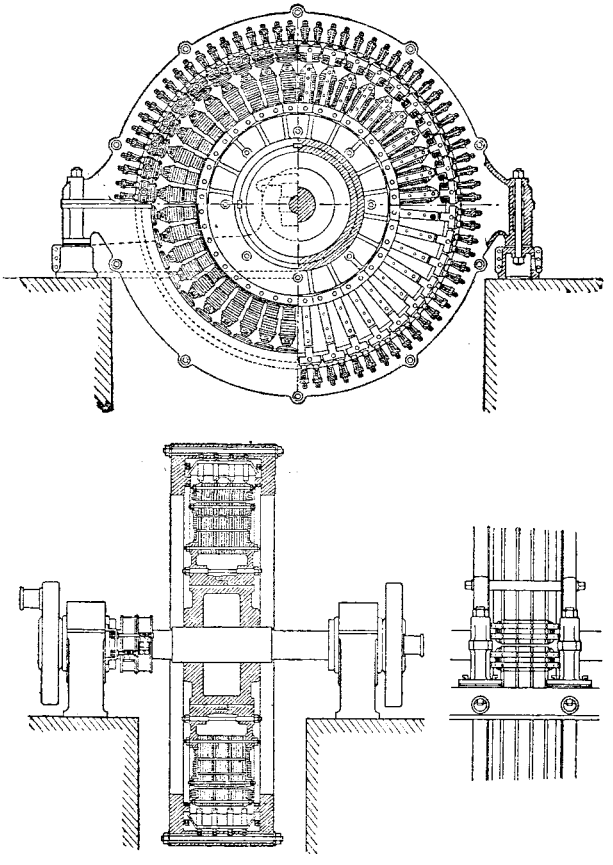


Fig. 264. — Alternateur Ganz de 400 kilowatts.

Nous reproduisons (fig. 264) le dessin d'une machine de même système, dont la puissance s'élève à 400 kilowatts à la tension de 3000 volts.

180. **Alternateur Farcot.** — Ce système, établi par MM. Huten et Leblanc et construit par la maison Farcot, est encore à inducteur mobile et induit fixe. L'enroulement en tambour est formé par des barres de cuivre insérées dans les canelures ménagées à la partie interne de l'armature fixe A (fig. 265).

Celle-ci est constituée par une carcasse en fonte annulaire, munie à la partie inférieure de pattes qui reposent sur des glissières ménagées dans le socle général en fonte S; ce dernier porte aussi les deux paliers *p*, ainsi que les douilles d'une longue vis à volant *v*, qui est en prise avec la carcasse de l'induit et permet de déplacer celle-ci sur ses glissières, pour dégager l'inducteur au besoin.

Le noyau de l'induit est formé de feuilles de tôles engagées dans l'enveloppe de fonte et serrées par une couronne, maintenue sur les bords de celle-ci par de nombreux boulons *d*.

Dans les rainures creusées à la périphérie intérieure du noyau de tôles, sont encastrées les bobines, composées chacune de deux enroulements, occupant quatre canelures consécutives *c*; ces diverses bobines sont reliées deux à deux par des barres de connexion extérieures *e*, et les extrémités de l'enroulement aboutissent à deux bornes *b* placées à la partie supérieure de la carcasse.

L'inducteur comprend des pôles radiaux *n*, constitués par des paquets de tôles de 2 millimètres d'épaisseur. Ces noyaux sont placés sur la jante d'une poulie en fonte F calée sur l'arbre, où elles sont serrées et maintenues par des couronnes saillantes D, appliquées sur les bords de la poulie. Les bobines B, enfilées sur ces noyaux, forment plusieurs groupes reliés en quantité, dont les circuits aboutissent à deux bagues *i*, qui reçoivent, d'autre part, le courant d'excitation.

On remarque, dans la région polaire des noyaux d'électros, des tiges transversales *t* qui sont en cuivre rouge et sont rivées, à leurs extrémités, à des cercles de cuivre. On réalise ainsi une sorte d'enroulement fermé sur lui-même, qui devient le siège de courants intérieurs dont le flux de

force est destiné à neutraliser, en partie, la réaction magnétique due au flux antagoniste développé par l'induit. Cette

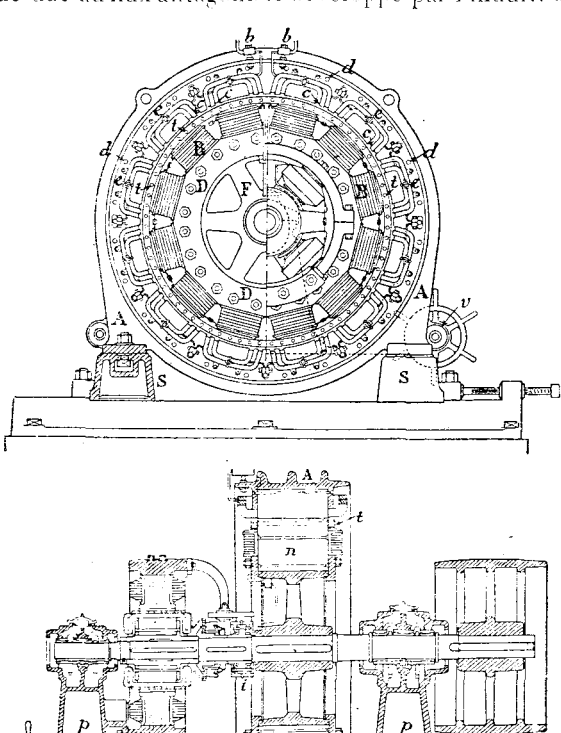


Fig. 265. — Alternateur Farcot (coupe et élévation).

disposition a l'avantage de maintenir entre plusieurs alternateurs couplés en quantité, le synchronisme qui serait troublé par la réaction d'induit.

Dans les machines de grande puissance, la carcasse de l'inducteur est constituée par le volant du moteur à vapeur qui actionne l'alternateur.

181. **Alternateur Mordey Victoria.** — C'est un alternateur à inducteur mobile, induit fixe et à disque, sans noyau de fer (fig. 266).

L'inducteur ne comporte qu'une seule bobine excitatrice

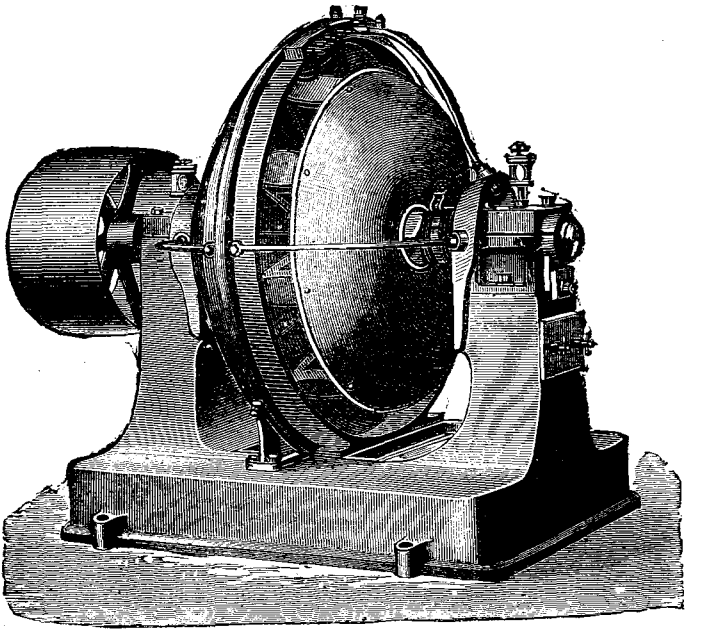


Fig. 266. — Machine Mordey.

et présente une forme toute particulière. Il se compose d'une poulie en fer ou en acier calée sur l'arbre et sur laquelle s'enroule ladite bobine (fig. 267) ; cette poulie porte, fixée sur ses joues, des sortes de pignons munis de doigts recourbés, qui constituent des expansions polaires ; celles-ci sont disposées de telle sorte que les doigts du croisillon

de gauche sont exactement en regard de ceux du croisillon de droite; l'intervalle laissé libre entre les bouts des doigts est à peine de 2 centimètres.

Il résulte de cette disposition que tous les pôles sont de même signe de chaque côté de l'induit, comme cela doit être quand il s'agit d'induits à disque.

Dans le vide interpolaire s'engagent les bobines induites très minces, en rubans de cuivre, d'une construction analogue à celle des bobines de l'armature Ferranti.

Ces bobines, qui ne contiennent pas de noyau magnétique, sont disposées à l'intérieur d'un anneau en bronze rigide qui est boulonné sur le socle général de la machine. Les bobines, de forme ovoïde, sont encastrées, par leur gros bout, dans des emboîtements métalliques montés sur la face intérieure de la carcasse en bronze. On peut aussi les enlever très facilement, au besoin, sans démonter la machine.

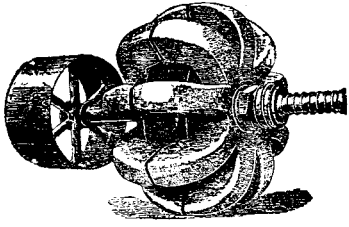


Fig. 267. — Inducteur Mordey.

Il y a deux fois plus de bobines induites que de couples de pôles, soit, par exemple, dix-huit bobines pour neuf couples, ou neuf doigts sur chaque pignon. Les extrémités du fil de la bobine inductrice sont reliées à deux bagues en bronze, où aboutit le courant inducteur produit par l'excitatrice à courant continu et à faible tension. Les bobines induites étant fixes, il n'y a pas de collecteur à la machine pour le courant à haute tension, ce qui est avantageux au point de vue de la sécurité des personnes et de la conservation de la machine.

On peut remarquer également que les doigts recourbés de l'inducteur, qui enveloppent l'induit, produisent une ventilation énergique qui refroidit très exactement les bobines induites.

La bobine unique de l'inducteur a pour effet, en concentrant la source de flux magnétique, de réduire la

dépense d'excitation, comme aussi celle du bobinage du système inducteur.

Cette machine, très bien étudiée, est aussi remarquable par la facilité avec laquelle on peut la coupler en quantité avec d'autres alternateurs de ce type, ce qui n'a pas lieu d'ailleurs pour tous les genres d'alternateurs.

L'induit de la machine Mordey peut se déduire en quelque sorte de celui de l'alternateur Ferranti, en sectionnant la couronne de bobines de celui-ci et en la retournant en dehors.

De même, si l'on fait tourner l'un des pignons de l'inducteur Mordey, par rapport à l'autre, d'un angle égal à la moitié de l'intervalle angulaire de deux doigts consécutifs, les doigts de l'un, suffisamment allongés, viendront s'intercaler entre ceux de l'autre, formant ainsi une couronne de pôles alternativement Nord et Sud. On obtiendra ainsi l'inducteur de l'*alternateur Alioth*, qui agit d'ailleurs sur un induit fixe à pôles.

182. **Alternateur d'Oerlikon**. — Cet alternateur est du type à reluctance variable, avec inducteur et induit fixes et fer tournant. L'enroulement induit est bobiné dans des rainures pratiquées sur la face intérieure des noyaux de l'armature (fig. 268).

Celle-ci se compose de deux anneaux en fer feuilleté disposés parallèlement, à l'intérieur d'une couronne en acier coulé formant carcasse extérieure; cette couronne est formée de deux demi-cylindres, dont l'inférieur repose sur le bâti, et l'autre, superposé, est facilement amovible. Les bobines forment des sortes de galettes qui sont fixées dans les rainures par des cales en bois, et sont isolées du noyau au moyen de feuilles de mica.

Dans l'intervalle laissé libre entre les deux anneaux, s'intercale la bobine excitatrice, dans un support en bronze maintenu par des encoches disposées à cet effet.

L'organe mobile est constitué par un moyeu en acier coulé, portant plusieurs bras venus de fonte et se terminant latéralement par deux expansions polaires, qui se trouvent respectivement au droit de chacun des anneaux

induits; sur les extrémités des pièces polaires sont encastrées des feuilles de tôle, qui forment des surfaces sectionnées pour éviter les courants de Foucault.

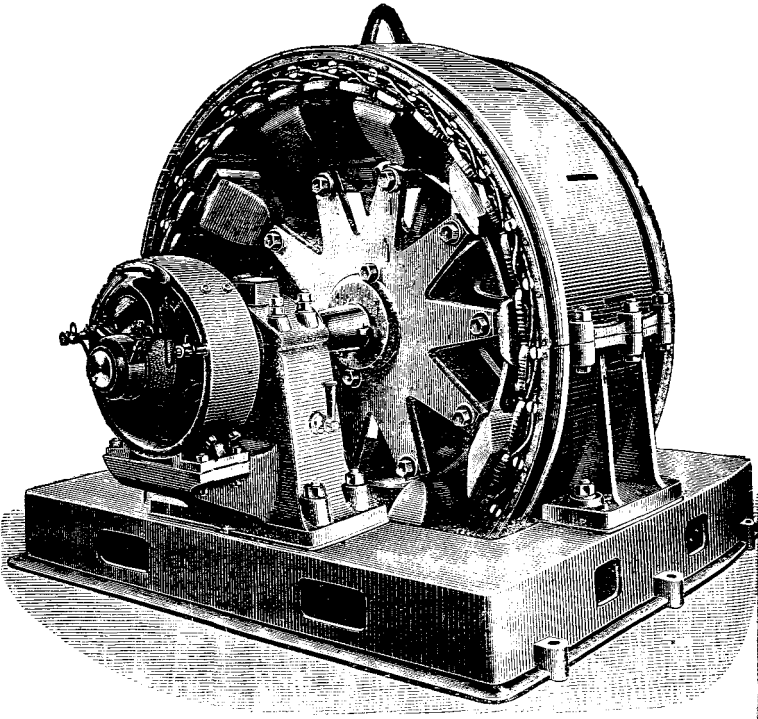


Fig. 268. — Alternateur d'Œrlikon.

Le flux engendré par la bobine excitatrice, traverse l'un des deux anneaux induits, et se présente à la périphérie intérieure, pour franchir l'entrefer qui le sépare de la pièce mobile; dans ces conditions, il est évident que le flux suivra les expansions polaires dans son mouvement de rotation, et qu'il traversera à chaque instant les noyaux des bobines induites qui se trouveront en face de ces pôles tournants; les bobines intermédiaires, correspondant à

l'intervalle angulaire des bras, ne seront à ce moment l'objet d'aucune induction ; les bobines seront donc traversées par un flux variable et deviendront le siège de courants alternatifs. Ceux-ci pourront être simples ou polyphasés, suivant le décalage des bobines dans le champ magnétique et leur mode de connexion en un circuit simple ou en plusieurs circuits déphasés.

Les ateliers d'Oerlikon construisent également des dynamos de grande puissance à axe vertical, destinées à être montées sur le prolongement de l'arbre des turbines hydrauliques.

183. **Alternateur Thury**. — Cette machine est, comme la précédente, à induit fixe, inducteur mobile et reluctance variable.

Le corps de la machine (fig. 269) est constitué par une carcasse d'acier K composée de plusieurs pièces et qui, dans son ensemble, présente une section suivant l'axe, en forme de C. La branche extérieure du C est formée d'une pièce annulaire, en deux parties boulonnées ensemble suivant le plan diamétral horizontal *h ;* la demi-couronne inférieure est fixée sur le socle, la seconde peut être enlevée pour découvrir l'armature et la bobine excitatrice E.

Celle-ci est fixée dans le fond du coude de l'U qui est formé par une pièce distincte, laquelle repose sur des glissières du socle et peut être retirée en arrière, afin de permettre l'enlèvement de la bobine inductrice.

La branche intérieure de l'U forme une troisième pièce qui est ajustée en porte-à-faux, sur le bord intérieur de la paroi précédente; elle est munie d'une roue dentée *r* engrenant avec un pignon, au moyen desquels on la fera tourner autour de l'axe, pour visiter, s'il est nécessaire, l'enroulement induit, sur tout le pourtour de l'armature.

C'est en effet sur cette branche qu'est fixé le noyau de tôle *p*, portant l'enroulement induit bobiné dans le système du tambour.

L'organe mobile D, en acier coulé, affecte la forme géné-

rale d'une cloche calée sur l'arbre de rotation. Les bords qui s'engagent entre les branches de l'U de la carcasse fixe, portent des dents en nombre égal à la moitié des

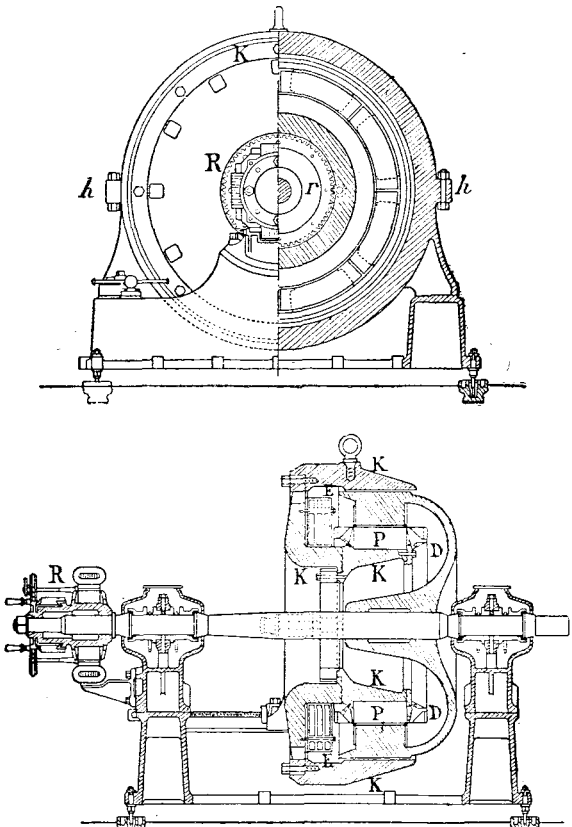


FIG. 269. — Alternateur Thury (coupe et élévation).

bobines induites. Le flux émané de la bobine inductrice se répand dans la branche extérieure de l'U et, suivant les

dents entraînées dans le mouvement de rotation, elle détermine l'induction dans les bobines successives.

On voit que, dans les machines de ce genre, le flux qui traverse les bobines émane pour ainsi dire d'un seul pôle et se referme directement sur l'inducteur par le noyau de l'enroulement induit. En raison de cette circonstance, on désigne aussi ce genre d'alternateur sous le nom de machine à *inducteur unipolaire*.

La figure montre l'excitatrice R, dont l'organe mobile est monté sur l'arbre de l'alternateur et l'inducteur fixe est supporté par une console vissée sur la colonne du palier.

184. Alternateur Ganz. Montage Scott. — Cet alternateur ne diffère pas essentiellement de celui d'Oerlikon décrit plus haut; il présente en effet deux induits enfermés dans un bâti circulaire d'acier et comprenant entre eux la bobine inductrice fixe B. Ce bâti, ainsi que les couronnes feuilletées de l'induit, sont en deux parties boulonnées ensemble, pour permettre la pose et l'enlèvement de la bobine excitatrice (fig. 270).

Les couronnes de l'armature portent des expansions polaires *p*, sur lesquelles sont enroulées les bobines induites.

L'organe mobile comporte un manchon d'acier A, calé sur l'arbre et muni de bras obliques qui sont pourvus d'expansions polaires, garnies de paquets de tôle de fer doux.

Le flux magnétique se répartit comme dans l'alternateur d'Oerlikon, et tout se passe comme si les pôles inducteurs entraînaient dans leur mouvement de rotation le faisceau des lignes de force à travers les bobines induites consécutives.

Les pôles inducteurs, par suite de l'obliquité des bras, sont décalés de manière à engendrer dans les deux induits correspondants des forces électro-motrices dont les phases diffèrent d'un quart de période. Néanmoins, par suite du mode d'accouplement des enroulements induits, on obtient sur le circuit extérieur un courant triphasé.

Le mode d'accouplement est représenté (fig. 271).

Les deux induits M et N, qui ont été juxtaposés sur le même plan pour la facilité de l'exposition, ont des nombres de

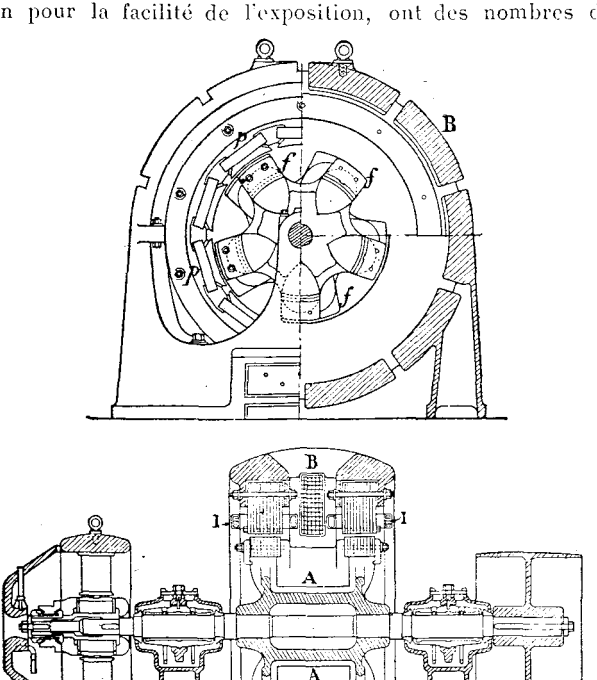


FIG. 270. — Alternateur Ganz-Scott (Coupe et élévation)

spires différents et tels qu'ils développent des forces électromotrices. E et 0,866 E; en outre, ces tensions sont de même fréquence et décalées entre elles d'un quart de période, ainsi que nous l'avons dit plus haut.

On relie l'une des extrémités de l'enroulement N au milieu de l'enroulement M, au point Q; il est facile de voir que dans

ces conditions il existe une différence de potentiel triphasée entre les bornes A, B et C.

Considérons d'abord les différences de potentiel entre le

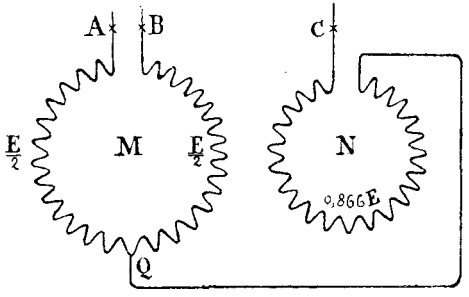


FIG. 271. — Montage des enroulements d'après le système Scott.

point commun Q et les trois bornes précitées; elles sont respectivement égales à $\frac{E}{2}$ pour les demi-enroulements de M et à 0,866 E pour l'enroulement de N compris tout entier entre Q et C; ces valeurs sont également les potentiels des bornes A, B et C, puisque rien ne serait changé si l'on mettait le point Q à la terre, c'est-à-dire au potentiel zéro.

Ces trois tensions pourront être représentées (fig. 272) par les trois longueurs Q *a*, Q *b* et Q *c*, puisque la force électromotrice 0,866 E, décalée de 90 degrés, doit être représentée par un vecteur perpendiculaire à ceux des forces électromotrices $\frac{E}{2}$.

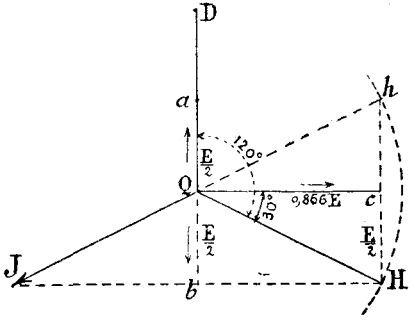


FIG. 272. — Détermination graphique de la transformation des phases.

Mais ce qui nous intéresse, ce sont les différences de potentiel A B, A C, B C.

Celle A B se compose de la force électro-motrice développée par l'enroulement total compris entre les points A et B, c'est-à-dire E; soit $Q\,d = E$ le vecteur représentatif sur le diagramme.

Pour avoir la différence de potentiel entre B et C, il faut composer les potentiels de ces points par la règle du parallélogramme; les deux composantes sont $\frac{E}{2}$ et 0, 866 E $= \frac{\sqrt{3}}{2}$ E.

or le triangle rectangle Q c H nous donne :

$$\overline{Q\,H}^2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\,E\right)^2 + \left(\frac{E}{2}\right)^2 = \frac{3}{4}\,E^2 + \frac{E^2}{4} = E^2$$

D'où la résultante :

$$Q\,H = E$$

On sait aussi que $Q\,c = \frac{\sqrt{3}}{2}$. E n'est autre chose que l'apothème de l'hexagone régulier inscrit dans un cercle de rayon égal à E; donc l'angle h Q H est égal à 60 degrés, d'où c Q H = 30 degrés et enfin D Q H = 120 degrés, c'est-à-dire le tiers de la circonférence.

On démontrerait de même que la différence de potentiel entre A et c est encore égale à E et décalée de 120 degrés, par rapport aux deux autres tensions.

Ces diverses tensions sont donc toutes égales à E et présentent entre elles une différence de phases d'un tiers de période; elles constituent donc par leur ensemble un système de forces électro-motrices triphasées.

Ainsi l'alternateur Ganz, pourvu d'un enroulement du système Scott, tel que nous l'avons décrit, constitue un transformateur de courant diphasé en courant triphasé.

185. Alternateur Henrion. — C'est une machine à induit fixe et inducteur mobile, mais dont la bobine excitatrice unique est fixe; celle-ci, en effet, est suspendue dans la partie moyenne de la carcasse, et le fer inducteur tourne à l'intérieur de ladite, sans l'entraîner dans son mouvement de rotation.

La masse du fer tournant présente une double rangée d'expansions polaires, alternées comme dans le système

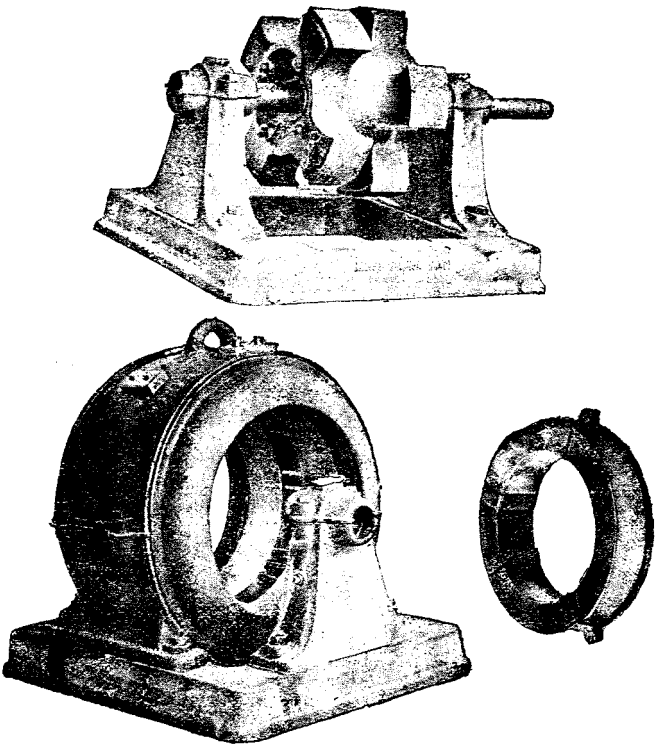


Fig. 273. — Alternateur Henrion.

d'Oerlikon, mais sans être enchevêtrées les unes dans les autres (fig. 273).

L'enroulement induit, en tambour, n'offre rien de particulier.

La disposition de la bobine fixe et du fer tournant présente, comme dans tous les systèmes analogues, l'avantage de supprimer les balais et collecteurs, et de n'avoir en

mouvement aucun enroulement à haute tension. On conçoit, en effet, que l'isolement et l'entretien de bobines soumises à des tensions de 5000 à 8000 volts sont particulièrement difficiles, dans le cas où ces circuits sont mobiles et que ces organes sont sujets à des détériorations mécaniques beaucoup plus graves.

186. **Alternateur Brown.** — Nous signalerons seulement les dispositions spéciales combinées par M. Brown dans certains types de ses alternateurs.

En ce qui concerne l'induit, le noyau est composé de tôles qui sont poinçonnées sur les bords intérieurs de l'anneau, de manière à constituer des fourreaux dans lesquels sont introduits, soit des fils, soit des barres de cuivre formant les bobines. L'enroulement s'effectue suivant le mode indiqué (fig. 274) ; les fils ou barres occupant deux fourreaux tels que *a b*, se recourbent sur les faces extérieures de l'anneau, pour former un circuit continu.

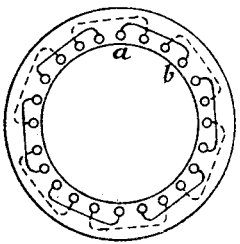


Fig. 274. — Induit Brown.

On obtiendra un courant alternatif simple ou des cou-

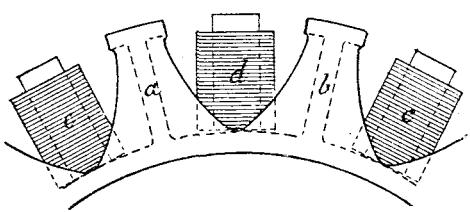


Fig. 275. — Inducteur Brown.

rants polyphasés à deux ou trois phases, suivant le groupement des bobines en un, deux ou trois circuits, qui, dans le cas des courants polyphasés, devront former des séries décalées l'une par rapport à l'autre d'un quart ou d'un tiers de l'espace interpolaire.

Un *type d'inducteur* employé par M. Brown mérite aussi une mention spéciale (fig. 275). La culasse de l'inducteur porte, venues de fonte avec elle, des projections polaires *a*, *b*. Celles-ci ne sont munies d'aucun enroulement; on rapporte ensuite entre les dents ainsi formées des noyaux *c*, *d*, *e* qui portent les bobines inductrices. Dans les machines puissantes, les enroulements sont faits d'un ruban de cuivre qu'on enroule sur champ, en isolant les spires entre elles, par du papier ou de la fibre interposés.

Toutes les bobines donnent la même polarité à leur noyau, et les pièces polaires dépourvues de bobines forment la seconde série de pôles. L'ensemble constitue donc une couronne de pôles alternativement de noms contraires.

187. **Régulation des alternateurs.** — La distribution des courants alternatifs doit se faire comme celle des courants continus, soit avec une intensité efficace constante, soit avec une tension constante; il faut donc régler à cet effet l'intensité du courant ou le potentiel de la machine.

Le principe est toujours le même, d'ailleurs : on agit à l'aide d'un rhéostat ou par un compoundage convenable sur l'excitation du champ inducteur.

Dans ce cas particulier des alternateurs, on règle le courant de la machine excitatrice qui alimente le champ de l'alternateur, à l'aide d'un rhéostat intercalé dans le circuit.

Le compoundage exige que l'alternateur soit une machine auto-excitatrice, c'est-à-dire que l'enroulement inducteur complémentaire soit excité par une partie du courant de l'alternateur, convenablement redressé. Le second enroulement peut d'ailleurs être alimenté par une excitatrice séparée à courant continu.

On obtient aussi une régulation spéciale aux courants alternatifs, en insérant dans les circuits qu'il s'agit de régler des bobines de self-induction ou de réactance.

Nous avons vu en effet que la self-induction détermine une force électro-motrice antagoniste, qui a pour effet de réduire la force électro-motrice principale ou le courant.

Ces bobines étant montées sur des carcasses de fer laminé, on peut faire varier à volonté l'influence de la self-induction, soit en modifiant la reluctance du circuit magnétique par l'emploi de noyaux mobiles que l'on enfonce plus ou moins dans la bobine, soit par la réaction de circuits antagonistes disposés sur le même circuit magnétique.

On règle ainsi comme il convient l'intensité ou la force électro-motrice du courant d'utilisation.

Dans la seconde partie de cet ouvrage, consacrée aux applications industrielles de l'électricité, nous exposerons d'ailleurs en détail les divers procédés de régulation employés dans les distributeurs d'énergie par courants continus et alternatifs.

FIN

Lyon. — Imp. A. Rey, 4, rue Gentil. — 21597.