

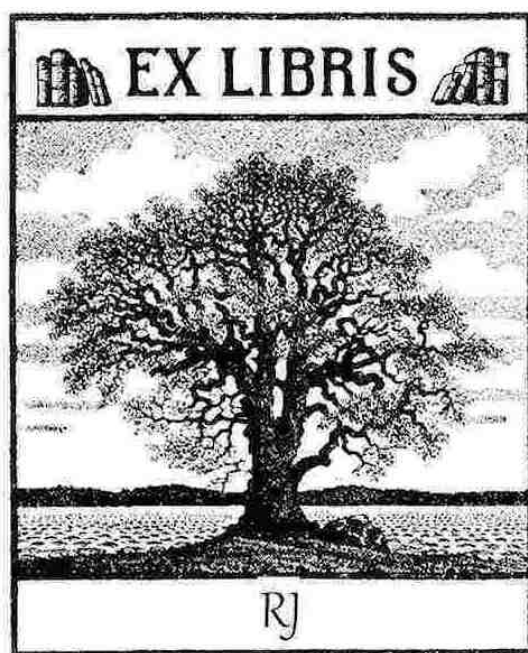
ALFRED
SOULIER

MACHINES DYNAMO- ÉLECTRIQUES

MANUEL DE L'ÉLECTRICIEN



GARNIER FRÈRES PARIS



Numérisé en Juillet 2025 par F1CJL , 300dpi

MANUEL DE L'ÉLECTRICIEN

TRAITÉ PRATIQUE
DES MACHINES
DYNAMO-ÉLECTRIQUES

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR :

Traité pratique d'électricité. — 144^e mille. — Sonneries, téléphones, éclairage, rayons X, télégraphie sans fil, dictionnaire des mots techniques. 1 volume in-16, illustré, broché.

Installations électriques. — 125^e mille. — Outillage, appareillage, canalisations, mesures électriques, transformateurs, etc. 1 volume in-16, illustré, broché.

Manuel de l'électricien. — 88^e mille. — Machines dynamos-électriques, construction, installation, entretien, dérangements. 1 volume in-16, illustré, broché.

Les moteurs électriques. — 80^e mille. — Moteurs à courant continu, moteurs à courant alternatif, mise en marche, traction électrique, montage, bobinage, réparations, entretien, adaptation des moteurs aux machines-outils, etc. 1 vol. in-16, illustré, broché.

Les applications industrielles de l'électricité. — 50^e mille. — Eclairage, transmission de la force à distance, tramways et chemin de fer électriques, électrochimie, etc. 1 vol. in-16, illustré, broché.

Le courant continu. — 40^e mille. — Le courant électrique, les piles hydro-électriques, les aimants, circuit magnétique, etc. 1 volume in-16, illustré, broché.

Les courants alternatifs. — 36^e mille. — Notions fondamentales, calculs des appareils à courants alternatifs, courants alternatifs polyphasés; etc. 1 vol. in-16, illustré, broché.

Les accumulateurs électriques. — 25^e mille. — Comment ils sont faits, comment on les recharge, comment on les entretient. 1 volume in-16, illustré, broché.

Traité de galvanoplastie. — 27^e mille. — Chromage, cuivrage, niquelage, argenture, dorure, reproduction des objets, moulages, recettes pratiques, etc. 1 volume in-16, illustré, broché.

Recueil de plans de pose et schémas d'électricité industrielle. — 40^e mille. — Sonneries, téléphones, lumière, minuterie, dynamos et moteurs à courant continu, alternateurs, transformateurs, commande à distance des moteurs, etc. 1 volume in-8^o oblong, cartonné.

L'électricité sans algèbre. — 34^e mille. — Cours complet et pratique accessible à tout le monde. 1 vol. in-16, illustré, relié.

Manipulations d'électricité. — 11^e mille. — Recueil d'expériences faciles à réaliser concernant le courant continu et les courants alternatifs, etc. 1 vol. in-16, illustré cartonné.

Formulaire pratique d'électricité. — 1 volume in-16, illustré, cartonné.

ALFRED SOULIER

INGÉNIEUR ÉLECTRICIEN

Ex-Inspecteur de l'enseignement technique

Expert près la Cour d'Appel

Rédacteur en Chef de la "Revue générale de l'Électricité"

TRAITÉ PRATIQUE DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

MANUEL DE L'ÉLECTRICIEN

**CONSTRUCTION DES MACHINES - INSTALLATION
ENTRETIEN-DÉRANGEMENTS**

VINGT-ET-UNIÈME ÉDITION REMISE A JOUR ET AUGMENTÉE



PARIS

LIBRAIRIE GARNIER FRÈRES

6, RUE DES SAINTS-PÈRES, 6

PRÉFACE

Les machines dynamo-électriques étaient à la fin du siècle dernier d'un usage si répandu, qu'il n'existait pour ainsi dire pas d'usine où l'on n'ait prévu, à côté de la machine à vapeur ou de la turbine, la place d'un ou de plusieurs de ces générateurs d'électricité si commodes et si utiles.

Le plus souvent, on les employait pour éclairer l'usine le soir; d'autres fois, pour transmettre l'énergie dans des ateliers lointains ou, enfin, dans des cas plus rares, pour recouvrir de nickel ou d'autres métaux une grande quantité d'objets et d'instruments que le contact de l'air oxyderait. Il faut ajouter qu'actuellement, sur toutes les voitures automobiles, sur les camions, avions, etc..., on trouve de petites machines dynamo-électriques qui ont pour but de maintenir chargées les batteries d'accumulateurs indispensables aujourd'hui pour l'éclairage, le démarrage ou la conduite même du véhicule.

Enfin, on emploie beaucoup comme machines de secours des groupes électrogènes qui comportent un moteur thermique actionnant directement une dynamo à courant continu ou un alternateur. Pour assurer à ces machines un bon fonctionnement et une marche irréprochable, il est nécessaire, sinon d'en connaître la théorie complète, du moins d'en comprendre le fonctionnement et d'observer certaines précautions dictées par la pratique.

Nous avons essayé de rassembler le mieux possible, dans le présent ouvrage, des notions simples et des renseignements utiles, qui familiariseront vite le lecteur, croyons-nous, avec ces machines si mystérieuses pour le profane.

C'est à l'industriel soucieux de ses intérêts, au mécanicien intelligent et au jeune électricien débutant que nous nous adressons; ils ne trouveront dans ces quelques pages ni calculs compliqués ni théories arides, mais un exposé rapide du fonctionnement des machines, suivi des détails de construction des dynamos les plus modernes. D'autres chapitres traitant de l'installation, de l'entretien et des dérangements de ces mêmes machines passeront en revue les difficultés d'ordre pratique que l'on pourra rencontrer dans leur emploi.

Notre but sera atteint, si, comme nous l'espérons, ces explications sont comprises de tout le monde.

MANUEL DE L'ÉLECTRICIEN

PREMIÈRE PARTIE

LA PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE PREMIER

LES PILES ET LEURS COUPLAGES

Considérations générales.

Les appareils dont l'industrie dispose aujourd'hui pour la production de l'énergie électrique sont de deux sortes : *les piles électriques* et *les machines dynamo-électriques*.

Les piles ne conviennent guère qu'à de petites applications telles que les téléphones, les sonneries et les usages médicaux; le prix de l'énergie électrique qu'elles fournissent est trop élevé pour songer à les adapter à l'éclairage ou à la mise en marche de moteurs exigeant des courants intenses; on préfère employer dans ces cas les machines dynamo-électriques.

Piles. — On réalise facilement et simplement une pile en faisant plonger dans de l'eau acidulée sulfurique ou simplement de l'eau salée, une lame de zinc et une lame de cuivre en évitant qu'elles se touchent.

Il suffit de réunir ces deux lames par un fil métal-

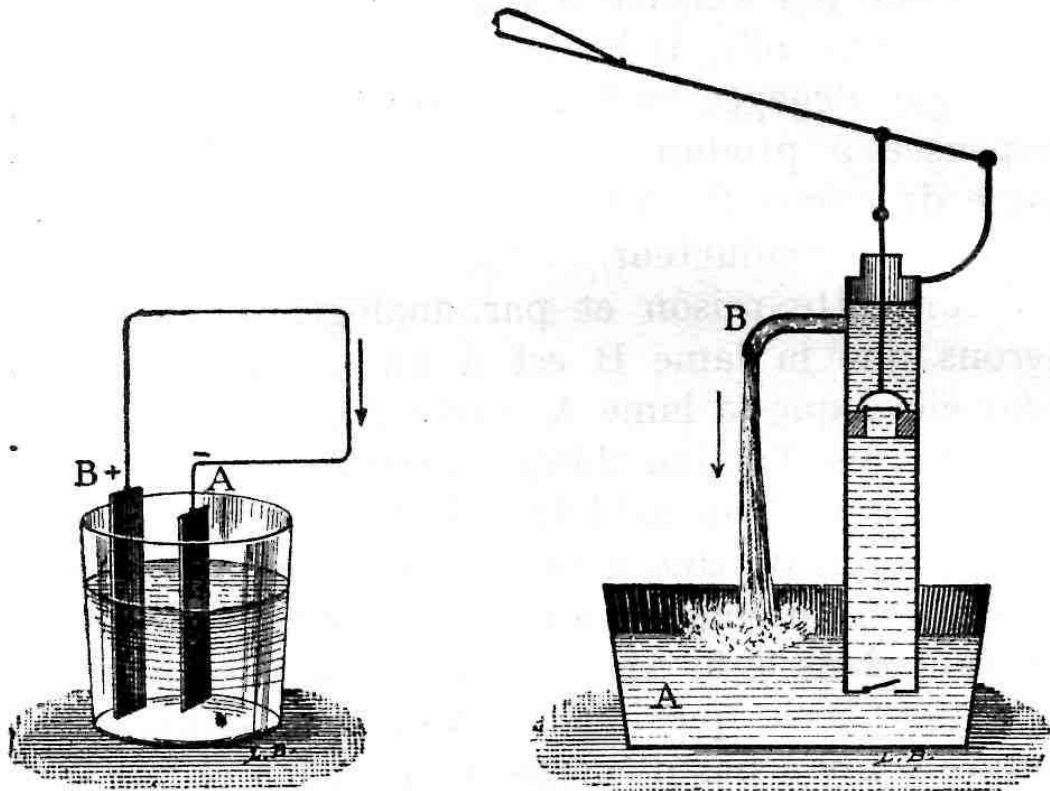


Fig. 1. — Principe du fonctionnement des générateurs électriques.

lique pour que ce fil soit traversé par un courant électrique allant de la lame non attaquée (le cuivre) vers la lame attaquée par le liquide (le zinc). Aucun de nos sens ne nous permet de percevoir l'existence d'un tel courant; cependant, si l'on tend le fil parallèlement à l'aiguille aimantée d'une boussole, on voit cette aiguille dévier et tendre à se mettre en croix avec le courant. Ce courant a une direction car, si nous intervertissons les attaches du fil avec la pile, l'aiguille dévie de l'autre côté.

On ne peut mieux assimiler la pile qu'à une pompe puisant constamment un liquide dans une cuve A et le déversant par l'orifice B. L'énergie qu'il faut dépenser sur le levier de la pompe est employée à élever l'eau et à produire la chute de ce liquide par l'orifice B (fig. 1).

Dans une pile, il en est exactement de même : l'énergie dégagée par la dissolution du zinc est dépensée à produire un courant s'écoulant de la lame de cuivre B, vers la lame de zinc A et à travers le fil conducteur.

Pour cette raison et par analogie, nous supposons que la lame B est à un niveau électrique *plus* élevé que la lame A. Cette *différence de niveau* a pour cause l'action chimique résultant de l'attaque du zinc par l'eau acidulée. Si nous remplaçons en effet la lame de zinc A par une lame de cuivre identique à la première, nous ne constaterons aucun courant dans le fil AB avec notre aiguille aimantée; cela tient à ce que l'acide étant sans action sur le cuivre il n'y a pas d'énergie mise en jeu et par suite pas de production de courant.

Ne l'oublions pas, toute production de courant électrique nécessitera une dépense d'énergie soit chimique dans les piles, soit mécanique dans les machines dynamo-électriques.

Les électriciens appellent *différence de potentiel*, *tension* ou même *pression électrique*, la différence de niveau électrique qui existe entre la lame de cuivre et la lame de zinc, c'est ce qui correspond à la hauteur ou à la pression de l'eau s'écoulant de B vers A.

La cause qui produit cette différence de potentiel est appelée *force électro-motrice* de la pile, elle varie

4 LA PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

si on change les substances mises dans la pile, elle n'est pas la même suivant que l'on emploie de l'eau acidulée sulfurique ou de l'eau salée et on le conçoit très bien, car l'action chimique n'est pas la même dans les deux cas.

La lame de cuivre B qui est au niveau électrique ou au *potentiel* le *plus* élevé porte le nom de *pôle positif* de la pile, que l'on désigne par le signe + qui veut dire *plus*.

La lame de zinc A qui est au niveau électrique le moins élevé porte le nom de *pôle négatif* de la pile que l'on désigne par le signe — qui veut dire *moins* (1).

Ce générateur très simple, comme on le voit, n'est pas très employé à cause de la trop vive attaque du zinc par l'acide sulfurique; on lui préfère d'autres piles telles que la *pile Leclanché* qui ne consomme rien tant qu'elle ne fournit pas de courant et qui convient tout particulièrement aux sonneries électriques et aux téléphones. Dans certains cas on emploie d'autres modèles qui sont les perfectionnements de la pile que nous venons de décrire, mais nous ne nous étendrons pas davantage sur ces petits générateurs d'énergie électrique dont le principe seul nous est utile à connaître et va nous aider à suivre la marche du courant dans les machines dynamo-électriques. Le lecteur que la question des piles intéresse trouvera dans notre *Traité pratique d'électricité* la description, le montage et l'entretien des principaux de ces appareils.

(1) On devine que si l'on veut que le courant circule d'une façon continue, puisque nous admettons qu'il va du pôle positif au pôle négatif par le fil conducteur, il faut qu'il retourne du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur de la pile.

Couplage des piles. — Avant d'aborder l'étude des machines dynamo-électriques et de leurs enroulements, nous examinerons avec soin les différents modes de couplage des piles que l'on réalise rarement aujourd'hui avec elles, mais bien plus fréquemment

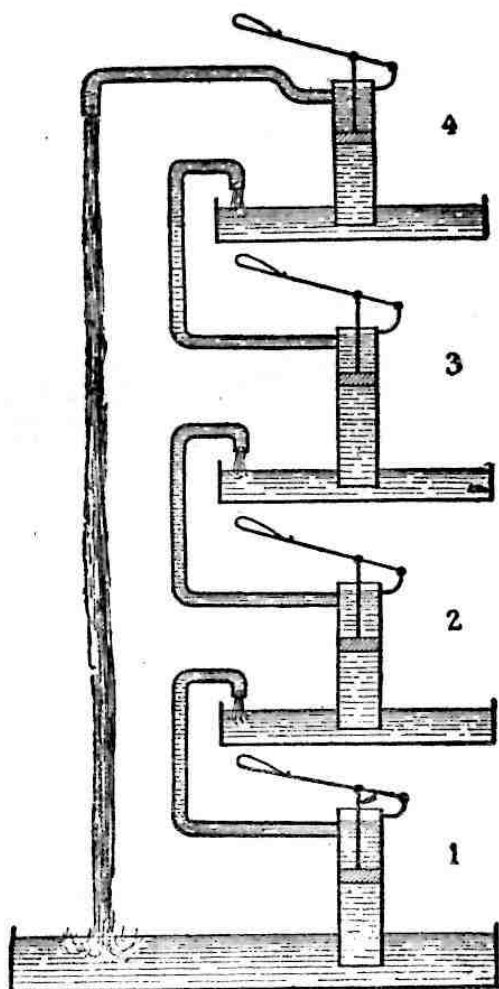


Fig. 2. — Pompes montées en tension.

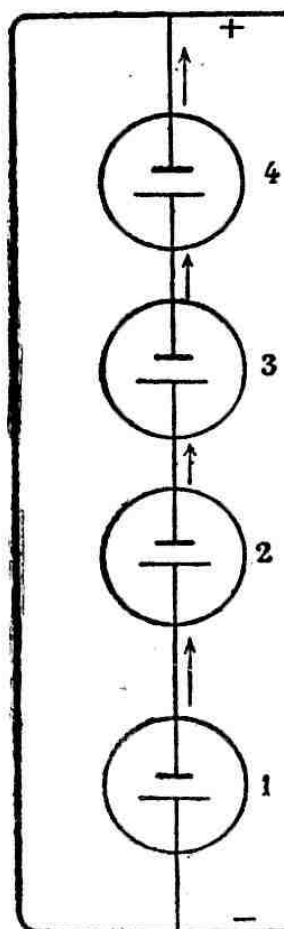


Fig. 3. — Piles montées en tension.

avec les machines. Une fois bien familiarisés avec ces groupements, l'étude des enroulements même très compliqués nous sera rendue très facile; aussi demanderons-nous au lecteur un peu de patience et d'attention.

1° *Couplage en tension ou en série.* — Considérons quatre pompes semblables, capables chacune d'élever

l'eau à 10 mètres de hauteur; supposons que l'on nous demande de remplir un bassin séparé par une hauteur verticale de 40 mètres d'une nappe d'eau intarissable (fig. 2). Si nous n'avons pas d'autre moyen, nous pourrions résoudre le problème en organisant nos quatre pompes comme l'indique la figure, c'est-à-dire, en les montant à la suite les unes des autres, en *série*, dirons-nous. Nous obtiendrons ainsi un courant d'eau élevé par les pompes que nous pourrions faire retomber en cascade vers le réservoir inférieur. Son débit, c'est-à-dire le nombre de litres fournis par seconde, ne pourra dépasser celui d'une seule pompe, mais la pression ou la différence de niveau totale sera quatre fois plus élevée que celle d'une pompe; cela se devine rien qu'en regardant la gravure; n'attachons cependant pas trop d'importance à ces comparaisons hydrauliques, car nous y trouverions des discordances, il ne faut y puiser que ce qui est nécessaire.

Avec les piles ou les machines il en est exactement de même, on réalise de hautes pressions ou de hautes tensions électriques en groupant les générateurs en *série*, c'est-à-dire en s'arrangeant de façon à ce que le courant produit par le premier traverse le deuxième, puis le troisième, etc.; pour cela un peu de réflexion est nécessaire. On se souvient (remarque, page 4) que le courant va à travers la pile du pôle négatif vers le pôle positif, nous allons donc nous arranger pour que le courant sorti de la première pile par le pôle positif rentre dans la deuxième par le pôle négatif et ainsi de suite.

Nous réaliserons ainsi le montage que l'on voit fig. 3 et dans lequel chaque élément de pile est

représenté par un cercle figurant le vase, au milieu un trait gros et court qui représente le pôle positif et à côté un trait fin et long qui est le pôle négatif. Le pôle positif du premier est relié au pôle négatif du second, le pôle positif du second au pôle négatif du troisième et ainsi de suite... Comme dans les pompes nous obtiendrons entre les éléments de pile extrêmes une différence de niveau, ou mieux de *potentiel* qui sera quatre fois celle que peut fournir un des éléments, mais on verra aussi que le débit (qui s'évalue en litres par seconde avec les pompes et qui sera ici l'intensité du courant) ne dépassera pas celui que peut fournir un élément, car le courant devant traverser tous les éléments de pile les uns après les autres sera juste celui qu'ils peuvent séparément laisser passer.

2° *Couplage en quantité ou en parallèle.* — Considérons un canal situé à 10 mètres de notre nappe d'eau et supposons que l'on nous demande d'y faire passer un courant d'eau très intense, c'est-à-dire représentant un nombre de litres par seconde bien plus grand que celui que peut fournir une de nos pompes.

La solution est simple et le lecteur l'a sûrement devinée, il suffira de disposer un grand nombre de pompes contribuant chacune à alimenter le canal.

Nous les grouperons en quantité ou en parallèle comme l'indique la figure, de sorte que le courant d'eau circulant dans le canal soit la somme des courants individuels fournis par chaque pompe (fig. 4).

La hauteur à laquelle l'eau a été élevée, autrement dit la différence de niveau, reste toujours celle que lui donne une des pompes, c'est-à-dire qu'elle est de 10 mètres.

Avec les générateurs électriques, le même cas peut

se présenter, on peut avoir en effet à faire circuler entre deux fils un courant beaucoup plus intense que celui que peut fournir une seule des piles ou machines employées. Dans ces conditions, on cou-

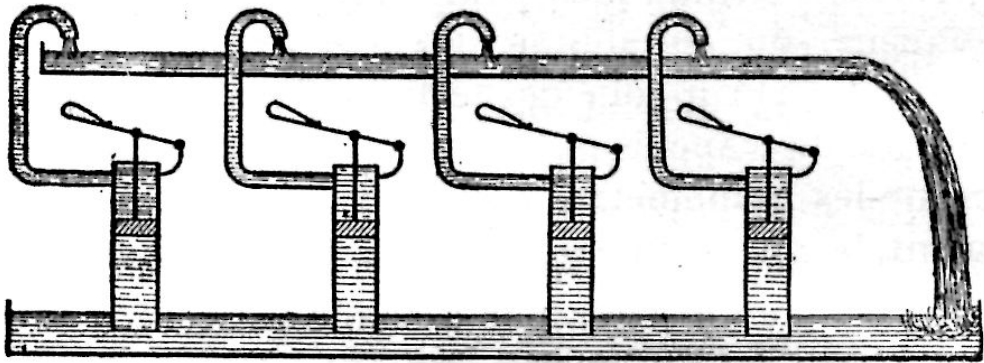


Fig. 4. — Pompes montées en quantité.

plera en *quantité* ou en *parallèle* un nombre suffisant de générateurs pour avoir le débit demandé, mais on devra avoir soin, pour que chacun d'eux fournisse du courant à la canalisation, de les grouper de

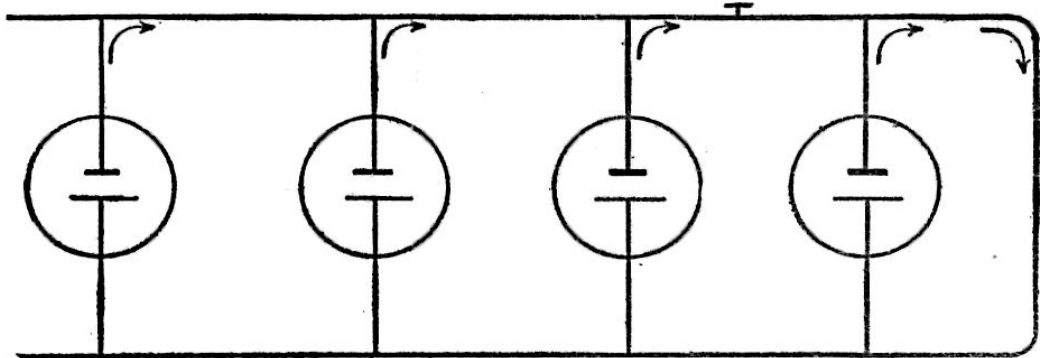


Fig. 5. — Piles montées en quantité.

façon à ce que les pôles positifs soient reliés *ensemble* et les pôles négatifs *ensemble* eux aussi (fig. 5).

Il faudra, de plus, que les générateurs aient avant le couplage la même *tension* ou pression électrique, sans quoi le courant fourni par le générateur à tension plus élevée s'écoulerait à travers celui qui a une plus faible tension.

On s'en assure à l'aide d'instruments spéciaux appelés voltmètres qui représentent ici les manomètres des chaudières vapeur.

De même, en effet, quand dans une usine une chaudière ne suffit plus pour alimenter les machines à vapeur, on en allume une deuxième, une troisième, etc. On a soin de ne les relier à la conduite générale de vapeur qu'elles doivent alimenter que lorsque les manomètres indiquent qu'il existe exactement la même pression dans la conduite générale et dans les chaudières que l'on veut coupler.

S'il en était autrement et si, par exemple, la pression dans ces dernières était trop faible au moment du couplage, la vapeur de la conduite générale rentrerait brusquement dans les générateurs et pourrait occasionner des accidents.

Il en est de même avec les générateurs électriques et c'est cette remarque qui, trop souvent oubliée, a conduit à des mécomptes dans les groupements en quantité des piles, accumulateurs ou même, comme nous le verrons, dans les enroulements des machines dynamo-électriques.

Générateurs mécaniques. — Le prodigieux essor des applications de l'électricité auquel nous assistons depuis quelque temps n'a réellement commencé que depuis que l'on a trouvé le moyen de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, c'est-à-dire quand on a inventé l'outil qui préside à cette transformation et qui n'est autre que la *machine dynamo-électrique* ou la *dynamo* comme on l'appelle ordinairement.

Les conséquences industrielles et économiques de cette découverte sont immenses. Depuis long-

temps en effet nous savons recueillir ou produire l'énergie mécanique; les moulins utilisant les chutes d'eau et les machines à vapeur sont depuis plus d'un siècle des outils qui nous sont familiers, la force motrice qu'ils nous procurent est à bas prix. De tels prix sont obtenus du reste, partout pour le cheval-heure lorsque l'énergie est fournie par la machine à vapeur, ils sont encore bien moindre avec les chutes d'eau.

Or, les constructeurs électriciens modernes étant arrivés à fabriquer des machines dynamo-électriques qui transforment près de 90 pour cent de cette énergie en énergie électrique, on voit que l'on peut avoir à bon compte le courant électrique.

Les multiples usages auxquels se prête l'électricité ont permis de résoudre une foule de problèmes jusqu'ici insolubles et ils laissent entrevoir un avenir qui fait rêver nos économistes.

L'utilisation de la houille blanche ou de ces glaciers éblouissants qui alimentent les cascades et les torrents d'une foule de régions et le transport à distance de cette énergie qui ne coûte plus que les frais d'établissement est le couronnement de l'invention de la dynamo.

Grâce à l'emploi du courant électrique, les grandes usines concentrées dans les grandes villes où se brûlait jadis d'énormes quantités de charbon disparaîtront au moins en partie, et l'on pourra voir, comme à Lyon, l'ouvrier travaillant chez lui avec un moteur électrique minuscule fournissant à son métier à tisser, sans bruit et sans odeur, l'énergie dont il a besoin.

Approchons-nous d'une de ces dynamos; que voyons-nous?

Des fils qui se déplacent devant un aimant ou

inversement; voilà tout le mécanisme. Mais qu'est-ce qu'un *aimant* ?

Avant d'entrer en détail dans l'étude complète de la machine dynamo-électrique, nos lecteurs comprendront que nous consacrons tout d'abord un chapitre aux aimants, c'est-à-dire au magnétisme. La connaissance des propriétés des aimants, la façon de les obtenir et de les utiliser, contribuera beaucoup à faire comprendre les perfectionnements successifs dont la machine dynamo-électrique a été l'objet depuis sa création.

CHAPITRE II

MAGNÉTISME

Notions générales.

Les anciens avaient découvert à *Magnésia*, dans l'Asie Mineure, une pierre qui avait la propriété d'attirer la limaille de fer ou d'acier.

Des barreaux d'acier trempé frottés avec ces pierres, dites *pierres d'aimant* ou *aimants naturels*, acquièrent la même propriété et forment des aimants *artificiels*.

L'étude des phénomènes manifestés par les aimants naturels ou artificiels constitue le *magnétisme*, nom emprunté à la ville qui en fut l'origine.

Pôles. — Vers l'année 1600, Gilbert reconnut que, dans un aimant, il existe toujours deux régions opposées dans lesquelles l'attraction est la plus grande; il donna le nom de *pôles* à ces deux parties de l'aimant.

On peut se rendre compte de l'existence de ces pôles en roulant un aimant dans la limaille de fer;

en le retirant ensuite, on s'aperçoit que la limaille forme des houppes aux deux extrémités.

Les deux pôles d'un aimant ne sont pas identiques; nous avons un moyen pour nous en assurer.

Suspendons l'aimant en son milieu à un fil de soie ou de coton sans torsion et abandonnons-le librement à lui-même loin de tout objet en fer ou de tout autre aimant, nous le verrons après quelques oscillations se diriger dans la direction nord-sud. Si nous marquons avec de l'encre ou à la craie le pôle qui se dirige vers le nord, nous aurons beau le dévier de sa direction, le mettre même vers le sud, il reprendra toujours sa direction primitive lorsque nous l'abandonnerons à lui-même.

C'est le principe même de la boussole dont se servent depuis longtemps tous les navigateurs pour s'orienter en pleine mer.

La première boussole était constituée par un bouchon en liège traversé par une aiguille aimantée, le tout flottant à la surface d'une cuve pleine d'eau.

De nos jours les boussoles sont formées par une aiguille d'acier aimanté portant une chape en son milieu, qui repose par l'intermédiaire d'une pierre fine sur une pointe aiguë. On réalise ainsi une suspension excessivement mobile et on peut enfermer le tout dans une boîte que recouvre une glace, à l'abri par conséquent des courants d'air et des intempéries.

Les boussoles marines sont en réalité un peu plus compliquées, mais nous ne nous étendrons pas davantage sur ces appareils et n'en retiendrons que le principe.

Les deux pôles d'un aimant n'étant pas identiques

ont reçu des noms différents. On appelle *pôle nord* celui qui se dirige vers le nord, il est généralement marqué d'un N ou autrement; l'autre pôle est appelé *pôle sud* et n'est généralement pas marqué.

Fantômes magnétiques. — Prenons un barreau aimanté ou un de ces petits aimants comme on en

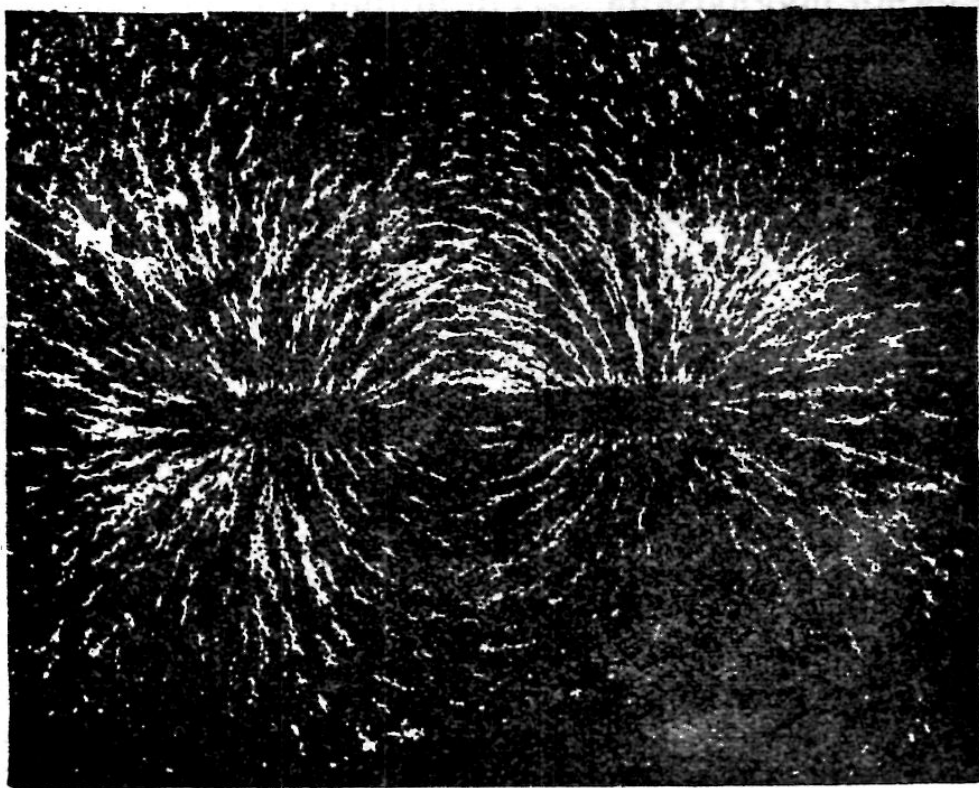


Fig. 6. — Champ magnétique d'un aimant droit.

trouve aujourd'hui dans tous les bazars; posons-le à plat sur une table et recouvrons-le d'une feuille de carton ou de papier fort. Saupoudrons au-dessus de la limaille de fer fine, nous verrons les grains de la limaille se grouper en filaments qui paraissent aller d'un pôle à l'autre en formant des courbes très régulières (fig. 6).

Ces lignes sont très importantes dans l'étude des machines-dynamos, on les appelle des *lignes de force*.

La limaille sert ici à nous révéler l'existence de ces lignes de force qui caractérisent tout aimant et que sans elle notre œil ne verrait pas. On peut déplacer l'aimant; les lignes de force se déplacent avec lui, ainsi qu'on s'en rendra compte avec la limaille de fer.

Champ magnétique. — On admet, et cela par pure convention, que les lignes de force sortent du pôle nord et rentrent dans le pôle sud.

L'ensemble des lignes de force qui entourent l'aimant et le caractérisent est appelé *champ magnétique*. Plus les lignes de force sont nombreuses dans un espace donné et plus le champ magnétique est intense. C'est généralement aux environs des pôles que les lignes de force paraissent converger et se réunir; c'est donc dans ces régions que le champ magnétique est le plus intense; cette remarque a son importance pour les applications des aimants, comme on le verra plus loin.

Nous avons dit précédemment que l'on admettait que les lignes de force sortaient du pôle nord et rentraient dans le pôle sud; elles cheminent donc à travers l'aimant du pôle sud vers le pôle nord et s'épanouissent à la sortie comme les fantômes nous le montrent.

Pour diminuer cet épanouissement, nous voyons qu'il suffira de rapprocher les pôles et pour cela de courber l'aimant en fer à cheval afin d'avoir les extrémités en regard (fig. 7); les lignes de force seront plus resserrées, puisque toutes chercheront à emprunter le chemin très court qu'on leur offrira.

Autrement dit nous aurons réalisé un champ magnétique plus intense entre les deux pôles

Mais il y a encore un autre moyen de concentrer les lignes de force.

Prenons un petit morceau de fer, mettons-le entre les deux pôles de notre aimant en fer à cheval.

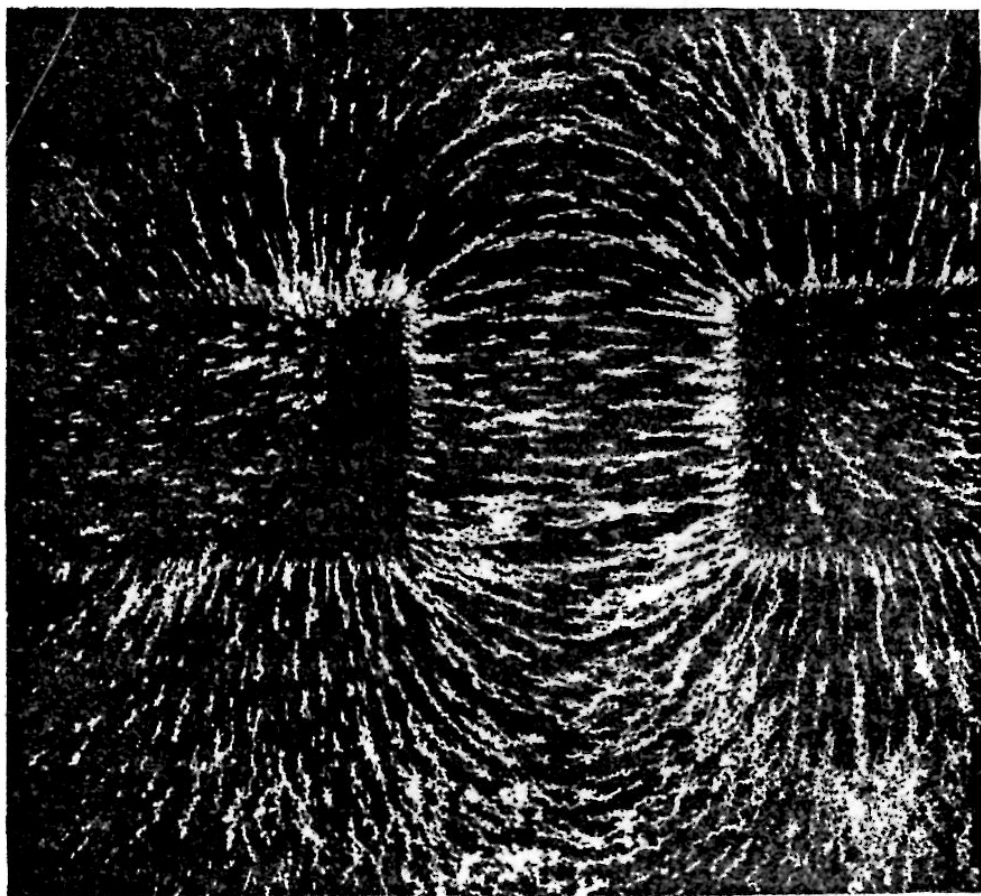


Fig. 7. — Champ magnétique entre deux pôles en regard.

Disposons au-dessus un carton et saupoudrons de la limaille de fer, afin de voir comment se dirigent les lignes de force.

Quelle n'est pas notre surprise de voir toutes les lignes converger pour passer par ce petit morceau de fer; ces lignes qui s'échappaient en gerbe dans notre premier aimant droit forment main-

tenant un pinceau très serré et très droit comme si on les avait fortement ligotées (fig. 8). Le fer doux a donc la propriété de les absorber, de les aspirer pour ainsi dire.

Réalisons cette expérience d'une autre manière en remplaçant le morceau de fer carré par un anneau en fer doux.

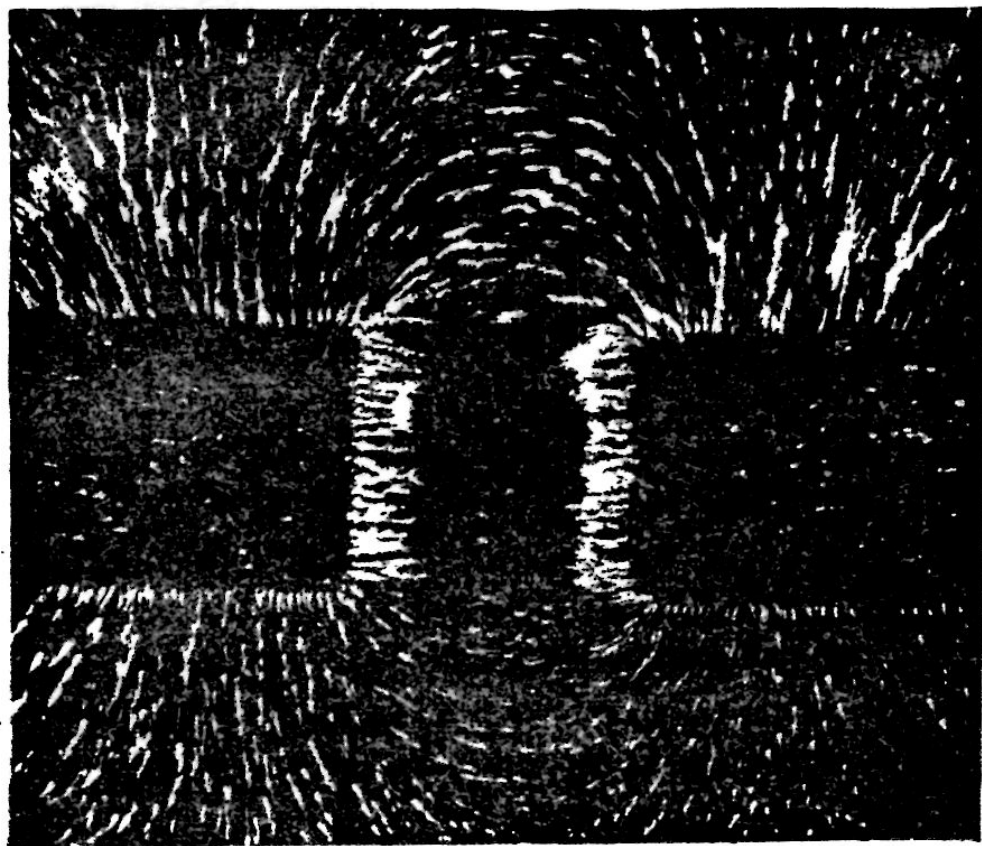


Fig. 8. — Le même champ magnétique avec fer.

Taillons notre aimant en fer à cheval de façon à ce que ses pôles arrondis en cercle puissent mieux enserrer notre anneau.

En saupoudrant de la limaille sur un carton que nous aurons disposé au-dessus, nous obtiendrons les fantômes représentés figure 9 qui est la reproduction d'une photographie de cette expérience; la figure 9

montre la distribution des lignes de force avant l'introduction de l'anneau, la figure 10 la répartition après.

On voit, comme précédemment, les lignes de force qui s'échappent de l'aimant se précipiter vers l'anneau en fer doux; on dirait qu'il leur offre un chemin

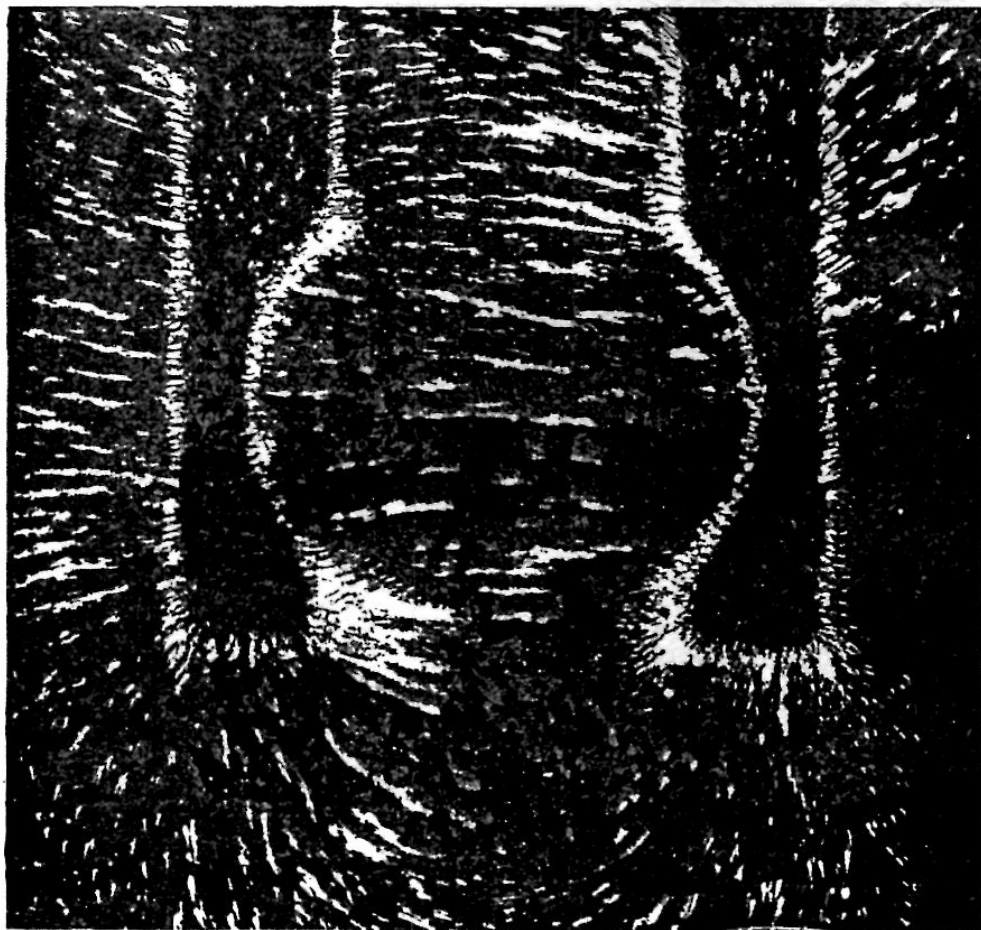


Fig. 9. — Fantôme d'un aimant en fer à cheval.

plus facile et c'est en effet ce qui se passe. Toutes les lignes ou à peu près, qui auparavant allaient d'un pôle à l'autre en suivant des chemins plus ou moins détournés, passent par l'anneau.

On verra plus loin que la connaissance de ce phénomène a permis d'augmenter singulièrement les effets des premières machines dynamo-électriques.

On exprime cette propriété du fer en disant que ce

métal est plus *perméable* aux lignes de force que l'air et que tous les autres corps; on peut en effet essayer

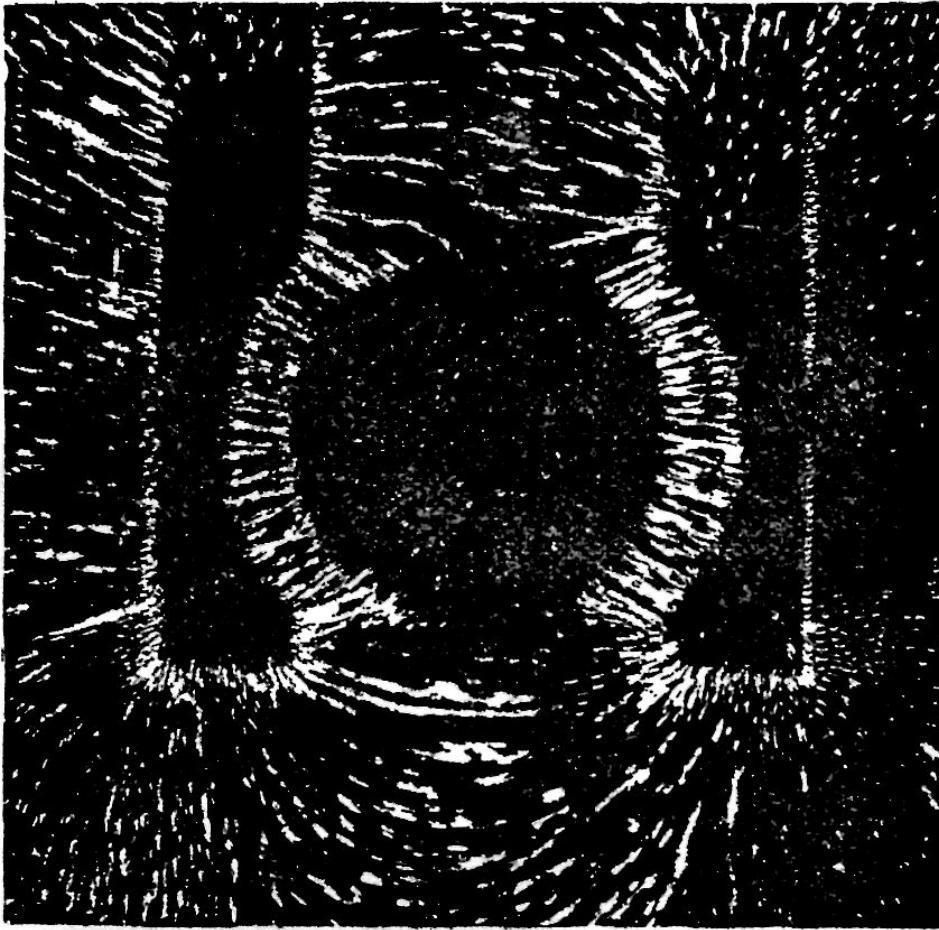


Fig. 10. — Fantôme du même aimant avec un anneau de fer entre les pôles.

avec les autres métaux : aucun ne présentera cette propriété d'une façon aussi marquée que le fer.

Procédés d'aimantation. — Nous pouvons dans l'expérience précédente, remplacer le fer par de l'acier trempé; nous constaterons que l'acier est presque aussi perméable que le fer aux lignes de force; mais, chose plus curieuse, si nous retirons notre aimant, nous verrons que le petit morceau

d'acier trempé retient une partie de la limaille; il est devenu à son tour un petit aimant.

En le suspendant à un fil pour reconnaître ses pôles, nous verrons que le pôle sud de ce petit aimant est celui qui était tourné vers le pôle nord de l'aimant en fer à cheval.

Quelques instants de réflexion vont nous montrer qu'il doit en être ainsi. Les lignes de force de l'aimant en fer à cheval sortent du pôle nord et rentrent dans le pôle sud du même aimant; or, sur leur trajet, elles rencontrent le morceau d'acier dans lequel elles déterminent un pôle sud à l'endroit où elles entrent et un pôle nord sur la partie d'où elles sortent.

Cette aimantation n'est pas très forte, mais elle n'a nullement affaibli notre aimant en fer à cheval qui pourra aimer autant de morceaux d'acier qu'on le voudra.

Pour aimer un morceau d'acier il suffira donc de le faire traverser par des lignes de force; c'est pour cela que les anciens, qui ne possédaient que les pierres d'aimants, ont pu réaliser d'autres aimants en frottant avec leur pierre des morceaux d'acier.

Comment peut-on expliquer ce phénomène?

Prenons une aiguille à tricoter et aimantons-la en la frottant sur une pierre d'aimant ou en la plaçant entre les pôles d'un gros aimant en fer à cheval. Nous constatons en la roulant dans la limaille que celle-ci s'attache aux deux extrémités.

Une fois aimantée, cassons-la en deux par son milieu. Roulons les deux morceaux dans la limaille, tous deux sont devenus des aimants; brisons encore en deux chacune de ces moitiés, toujours les nouveaux

morceaux formeront de nouveaux petits aimants et cela indéfiniment.

En reconstituant l'aiguille à tricoter, c'est-à-dire en assemblant à la suite les uns des autres les petits morceaux, et en les faisant toucher le mieux possible, nous verrons que tous ces petits aimants que nous avons obtenus si facilement reconstituent l'aimant primitif; en effet, en plaçant au-dessus un carton que nous saupoudrerons de limaille, nous verrons se dessiner les deux pôles primitifs de notre aiguille aimantée.

Cette expérience a permis de supposer, et c'est à Ewing qu'est due cette hypothèse, que les aimants sont formés d'une multitude de petits aimants dont les actions s'ajoutent pour créer l'aimant principal.

Comment sont-ils, ces aimants? — Ici la science ne peut répondre catégoriquement, car nous manquons de moyens d'investigation. Cependant les savants admettent que tous les corps sont formés de *molécules*, c'est-à-dire de corpuscules excessivement petits que le microscope le plus puissant ne peut voir, mais dont on reconnaît l'existence.

Ces molécules, quoique très près les unes des autres ne se touchent pas, laissant entre elles des intervalles appelés *pores*. On peut supposer que ces molécules représentent autant d'aiguilles, libres de tourner, auxquelles l'aimantation, c'est-à-dire le passage des lignes de force, donne une direction bien déterminée et les dispose comme les morceaux de notre aiguille aimantée cassée de tout à l'heure. De même que la réunion de tous ces morceaux dans le prolongement les uns des autres reconstituait l'aimant primitif, de même l'orientation de toutes les molécules ou petites aiguilles dans une direction

parallèle, transforme le barreau inerte auparavant en un aimant.

Ainsi donc, dans un morceau d'acier non aimanté, ces molécules ou plutôt ces aiguilles ont une position quelconque.

Le seul fait de faire traverser ce morceau d'acier par des lignes de force oriente ces petites aiguilles dans une direction bien déterminée qui subsiste lorsque ces lignes cessent d'agir.

Dans le fer doux il en est de même, mais avec

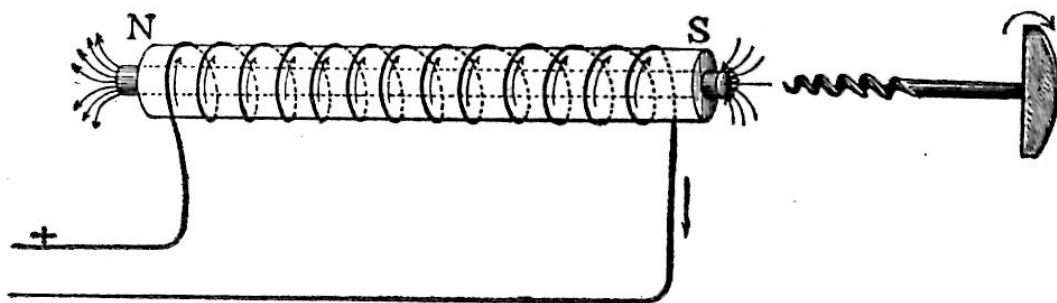


Fig. 11. — Aimantation par le courant électrique.

cette différence que lorsqu'on retire l'aimant ou qu'on supprime les lignes de force produisant l'aimantation, les aiguilles reprennent leur position primitive quelconque, comme si un ressort les rappelait. Et il est de fait qu'un morceau de fer doux cesse d'attirer la limaille de fer s'il n'est plus dans le voisinage d'un aimant.

Aimantation par le courant électrique. — Prenons un verre de lampe et enroulons autour un fil de cuivre recouvert de coton ou non, mais alors évitons que les spires successives se touchent entre elles (fig. 11).

Plaçons dans le tube de verre une aiguille à tricoter que nous voudrions aimanter et relions, pendant quelques instants, les deux extrémités du fil de cuivre

aux deux pôles de notre pile de la page 2 ou de tout autre générateur.

Nous constaterons avec surprise que ce simple passage du courant autour de l'aiguille à tricoter a suffi pour l'aimanter aussi bien, si ce n'est mieux, que son contact avec un aimant naturel ou artificiel.

Si à la place de l'aiguille à tricoter nous eussions mis une tige de fer doux, nous aurions pu voir la limaille ou de petits clous s'attacher avec énergie aux deux extrémités de la tige, tandis que le courant électrique circulait dans le fil. En rompant la communication avec la pile, toute aimantation disparaît et les clous, aussi bien que la limaille, se détachent du barreau de fer doux.

C'est là, semble-t-il, un gros inconvénient, puisque avec le fer doux nous obtenons des aimants très énergiques, mais qui ne sont que passagers.

Rassurons-nous, c'est au contraire une merveilleuse propriété, grosse en conséquences industrielles.

Plaçons notre barreau de fer entouré de fil dans une ville, à Marseille par exemple; transportons la pile à Paris et relierons les deux appareils par un double fil conducteur. Le courant parti du pôle positif de la pile à Paris, ira à Marseille, traversera la spirale de fil, ce qui aura pour résultat d'aimanter le barreau de fer doux, et reviendra par le deuxième fil au pôle négatif de la pile à Paris.

En interrompant à Paris le passage du courant, c'est-à-dire en détachant un des fils de la pile, on fera cesser l'aimantation que l'on fera naître de nouveau en envoyant du courant. Nous pourrions ainsi faire produire à l'appareil des signaux à distance; c'est le principe même de la télégraphie.

Mais nous allons en tirer un bien meilleur parti dans nos machines, comme on le verra.

Au lieu d'un barreau de fer doux droit, prenons un cylindre de fer courbé en *fer à cheval* et enroulons dessus notre fil de cuivre recouvert de coton en tours serrés de façon à en mettre le plus possible. Faisons ensuite passer dans ce fil le courant d'une pile très

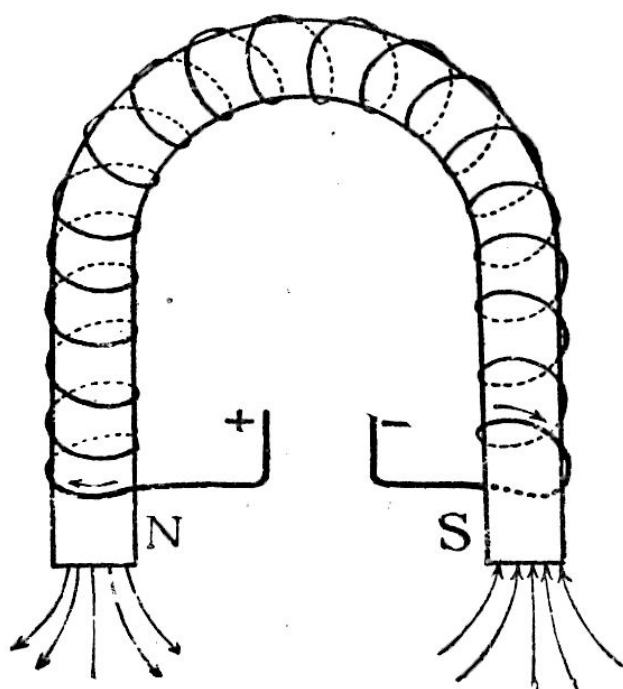


Fig. 12. — Électro-aimant en fer à cheval.

énergique, nous obtiendrons, tant que ce courant passera dans le fil, un aimant bien plus puissant que les aimants naturels, pouvant attirer et supporter des masses de fer beaucoup plus importantes qu'aucun aimant naturel ou artificiel de mêmes dimensions. L'appareil ainsi construit porte le nom d'*électro-aimant* (fig. 12).

Sens de l'aimantation. — Avant d'aller plus loin, on peut se demander où sera le pôle nord et où sera le pôle sud, puisqu'ici l'aimantation n'est obtenue avec le secours d'aucun autre aimant. Nous retrouverons facilement chaque pôle à l'aide d'une règle très simple, celle du *tire-bouchon* de Maxwell.

Tout le monde a manié un tire-bouchon, et on sait que cet appareil progresse en avant dans le bouchon

quand on tourne sa poignée dans le sens des aiguilles d'une montre.

Considérons le fil enroulé sur le tube de verre (fig. 11); le courant parti du pôle positif de la pile circule autour du tube dans le sens des flèches.

Placons à une des extrémités du tube, devant l'ouverture de droite S comme devant le goulot d'une bouteille, un tire-bouchon, et manions-le de façon à ce qu'il tourne comme le courant autour du tube dans le sens des flèches, on voit que ce sens correspondra au vissage et que le tire-bouchon avancera dans le tube.

Il en est exactement de même des lignes de force; elles tendent à traverser le tube en suivant le barreau de fer doux comme le ferait le tire-bouchon s'il avançait dans un bouchon.

Les lignes de force sortiront donc par N qui sera le pôle nord et rentreront par S qui sera le pôle sud.

Cette méthode d'une application facile et familière à tout le monde, permettra de connaître le *sens de l'aimantation* dans une bobine quelconque pourvu que l'on connaisse le sens du courant qui circule autour d'elle.

Hystérésis. — Jusqu'à présent, nous ne nous sommes préoccupés que d'aimanter un barreau de fer ou un barreau d'acier dans un sens déterminé toujours le même; mais examinons ce qui se passe quand nous aimantons une pièce de fer ou d'acier, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre.

Reprenons par exemple notre aimant en fer à cheval de la page 15 et retournons le morceau de fer ou d'acier que nous avons placé entre ses pôles, son

aimantation changera de sens, chaque fois que nous le retournerons.

Retournons-le un grand nombre de fois par seconde, il ne va pas tarder à s'échauffer. Pourquoi?

Précisément à cause de ces aimantations et désaimantations rapides dont il est le siège, et on va le comprendre.

Nous avons vu que l'on pouvait assimiler un aimant à un assemblage de petites aiguilles aimantées, toutes dirigées dans le même sens par l'aimantation qu'on leur a communiquée. Changeons le sens de cette aimantation et toutes ces aiguilles vont se retourner. Changeons encore un grand nombre de fois par seconde ce sens, les aiguilles oscilleront, mais avec un certain *retard* auquel on a donné le nom d'*hystérésis*. C'est ce déplacement continu des aiguilles ou molécules, sous l'action des changements d'aimantation qui échauffe le corps comme le ferait un frottement. Avec le fer très doux dont les molécules sont supposées très sensibles à l'action de l'aimantation, ce travail dû au frottement est moindre, et le fer s'échauffe peu, ce qu'on exprime en disant que la perte par *hystérésis* dans le fer est moindre qu'avec l'acier. Il y a en effet perte d'énergie, car cette chaleur qui se manifeste par une élévation de température du métal est empruntée à l'énergie qui produit les changements d'aimantation.

Cette perte d'énergie dépend, et on le devine, du volume du fer ou de l'acier, c'est-à-dire du nombre d'aiguilles mises en mouvement par les changements d'aimantation et ensuite de la fréquence de ces changements. On peut réaliser facilement et rapidement ces changements en envoyant dans le fil enroulé autour du tube de verre de la page 21 un courant

alternatif obtenu, soit en inversant rapidement la communication de ce fil avec les pôles de la pile, soit en se servant, comme source de courant, d'une de ces machines à courant alternatif si répandues aujourd'hui dans l'industrie.

En appliquant la règle du tire-bouchon de Maxwell, on voit que chaque fois que le courant électrique changera de sens, les pôles changeront de place dans le barreau de fer ou d'acier qui occupe le centre du tube.

Ces changements s'ils sont rapides échaufferont le fer d'une façon sensible; cette chaleur sera empruntée au courant qui fournit l'aimantation. Aussi conçoit-on que l'on cherche à diminuer dans les machines dynamos électriques, la perte par *hystérésis* qui diminue le rendement.

Mais l'*hystérésis* n'est pas le seul phénomène qui contribue à échauffer le fer ou l'acier, en donnant lieu à une perte; nous verrons qu'il y a aussi les *courants de Foucault*.

En résumé, nous nous rappellerons que chaque fois qu'un morceau de fer ou d'acier est le siège de changements de sens de son aimantation, il en résulte une perte d'énergie *proportionnelle* au volume de ce fer, au nombre de lignes le traversant, au nombre de cycles par seconde, c'est-à-dire de changements complets par seconde et enfin proportionnelle à un coefficient dépendant de la qualité du métal.

C'est ainsi que, toutes choses égales d'ailleurs, la plus faible perte d'énergie est observée avec du fer forgé très doux; par conséquent c'est lui que nous choisirons pour les appareils destinés à supporter de fréquentes variations d'aimantation, afin d'avoir un meilleur rendement.

CHAPITRE III

PRODUCTION DE COURANTS ÉLECTRIQUES AU MOYEN DES AIMANTS

Nous venons de voir que le fait de faire passer un courant électrique dans un fil conducteur enroulé autour d'un barreau d'acier ou de fer doux transformait ce dernier en un aimant.

On peut se demander si la réciproque ne serait pas vraie, et si en introduisant un aimant dans la bobine on ne ferait pas naître un courant dans le fil. C'est aussi ce que s'étaient demandé les savants du siècle dernier et ce fut à Faraday que revint l'honneur de réussir le premier cette expérience et de jeter la base d'une nouvelle catégorie de générateurs électriques.

Ayant introduit un aimant au centre d'une bobine en bois sur laquelle était enroulé un fil de cuivre recouvert de soie, il constata le passage d'un courant en reliant ce fil à un galvanomètre (1). Mais ce courant, à l'inverse de ce que l'on croyait, ne se produi-

(1) Le galvanomètre est un appareil très en usage dans les laboratoires qui permet de déceler la présence de courants excessivement faibles.

sait pas tant que l'aimant séjournait dans la bobine; on ne l'observait qu'au moment où on introduisait l'aimant, et au moment où on le retirait. De plus, tandis que le courant circulait dans un certain sens au moment de l'introduction de l'aimant dans la bobine, il circulait en *sens inverse* au moment où on le retirait.

Expérience. — Nous pourrions réaliser facilement cette expérience, si nous disposons d'un galvano-

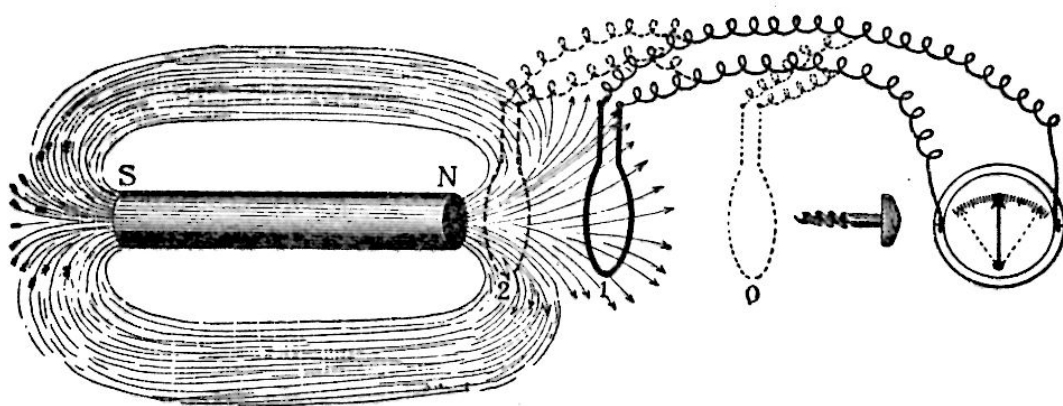


Fig. 13. — Expérience fondamentale.

mètre sensible (fig. 13) dont l'aiguille peut dévier dans les deux sens. Nous le relierons par des fils souples à une simple boucle de fil que nous approcherons d'un aimant NS. Faraday approchait l'aimant, mais on peut laisser l'aimant fixe et approcher la bobine, cela revient exactement au même.

A mesure que la boucle de fil s'approchera, nous verrons le galvanomètre dévier et signaler le passage d'un courant; si nous nous arrêtons, le galvanomètre reviendra au zéro. Éloignons la boucle de l'aimant et nous verrons aussitôt l'aiguille dévier de l'autre côté du zéro, montrant que le courant a changé de sens.

Examinons de près ce qui se passe :

Nous savons que tout autour de l'aimant circulent des lignes de force qui sortent de son pôle nord et rentrent par le pôle sud. La limaille de fer semée sur un carton, nous permettra de relever la disposition exacte de ces lignes et leur forme. Supposons que la figure 13 les représente à peu près exactement :

Tant que la boucle de fil est en O, aucune ligne ne la traverse, elle est hors du champ magnétique. Quand nous approchons la boucle en 1, nous voyons qu'elle commence à se laisser traverser par quelques lignes de force, et aussitôt le galvanomètre commence à dévier, puis quand elle arrive en 2, elle se rapproche du pôle N, et se trouve traversée par presque toutes les lignes de force aussi dans son passage de 1 en 2 nous constaterons, avec notre galvanomètre, un courant plus énergique que de 0 en 1. Ce phénomène se traduit, en langage ordinaire, par une loi qui est la suivante.

Toute variation du nombre de lignes de force embrassées par un circuit, donne naissance à un courant si ce circuit est fermé.

Ainsi que l'expérience le montre, le courant dure tant que dure la variation.

Sens du courant produit. — Si on détermine avec le galvanomètre le sens du courant produit, dans chaque cas on s'aperçoit que ce sens est tel qu'il tend toujours à *s'opposer* au déplacement ou à la variation des lignes de force (loi de Lenz).

Ainsi, par exemple, si dans notre expérience, nous appliquons la règle du tire-bouchon de Maxwell nous voyons que lorsque nous approchons la boucle du pôle nord il doit se produire un courant s'opposant au déplacement, c'est-à-dire produisant des lignes de

force de sens inverse de celles de l'aimant. Nous sommes conduits, comme on le voit, à visser le tire-bouchon; il ira alors à la rencontre des lignes de force qui sortent de l'aimant et cela nécessitera un courant dans la boucle tournant dans le sens des aiguilles d'une montre.

Quand nous retirons la boucle, toujours d'après la même loi, le sens du courant doit être tel qu'il tende à l'empêcher de s'éloigner de l'aimant; les lignes de force que produira ce courant devront, pour cela, être de même sens que celles de l'aimant, il faudra dévisser le tire-bouchon, ce qui veut dire que le courant circulera dans la boucle en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Nous entrevoyons maintenant la possibilité de construire une machine composée d'une boucle de fil s'approchant et s'éloignant d'un aimant; le courant qu'elle produira sera *alternatif*, c'est-à-dire qu'il ira tantôt dans un sens et tantôt dans un autre. Si nous cherchons à perfectionner notre machine et à augmenter le courant produit, nous verrons que si, au lieu d'une boucle de fil nous en disposons plusieurs, ou mieux une bobine sur laquelle nous aurons enroulé un fil long et fin faisant par conséquent beaucoup de tours, l'effet sera considérablement augmenté à en juger par la déviation du galvanomètre. De même si nous remplaçons l'aimant NS par un autre plus puissant, de même encore si nous réalisons un déplacement rapide.

Nous retiendrons de ceci que la force électromotrice ainsi obtenue est proportionnelle :

- 1° A la longueur de fil enroulé;
- 2° A l'intensité du champ magnétique;
- 3° A la vitesse de la variation.

Nous allons maintenant réaliser cette expérience d'une autre manière qui va nous amener à comprendre très facilement le fonctionnement des machines à courant continu, même avec les enroulements les plus compliqués.

Principe des machines. — Considérons un aimant en fer à cheval dont nous aurons convenablement

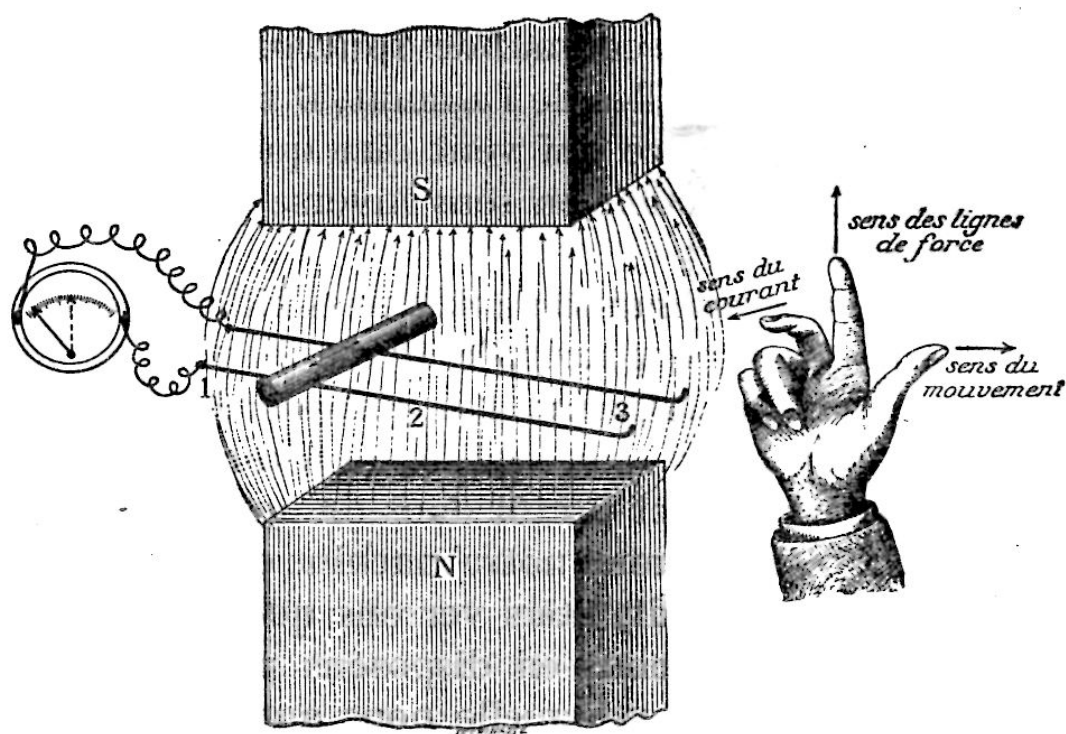


Fig. 14. — Sens du courant produit.

recourbé les deux pôles pour qu'ils viennent en regard l'un de l'autre (fig. 14).

Supposons le pôle nord en bas et le pôle sud en haut, les lignes de force vont en montant, les flèches indiquent suffisamment leur direction.

Disposons entre ces deux pôles deux rails en cuivre poli légèrement inclinés, sur lesquels nous pourrons faire rouler un cylindre de cuivre rouge également poli avec soin.

Jusqu'ici rien de bien compliqué et cependant c'est sur ce jeu d'enfant que repose toute la dynamo.

Relions les deux barres à un galvanomètre, posons le cylindre de cuivre en 1 et laissons-le rouler. La pesanteur va l'entraîner : il roulera sur les deux rails, passera en 2 et s'arrêtera en 3 où nous aurons disposé des butoirs.

Si nous observons le galvanomètre, nous le verrons dévier tant que durera ce déplacement.

En examinant de près ce qui se passe, on verra vite que nous avons réalisé ici sous une autre forme l'expérience précédente; en effet quand le cylindre est en 1, il est hors du champ magnétique, quand il roule de 1 en 2, on voit qu'il fait varier le nombre de lignes de force embrassé par le circuit formé par les rails, le rouleau et le galvanomètre, puis de 2 à 3 ce nombre varie encore, il va toujours en augmentant.

Le sens du courant produit doit être tel qu'il s'oppose à cette variation; il faudra pour cela que ce courant circule de façon à produire des lignes de force s'opposant à celles qui pénètrent dans le circuit, la règle du tire-bouchon indique le sens de la flèche comme sens du courant.

Cette expérience permettra de mieux matérialiser ce qui se passe et pourra peut-être permettre de mieux se rappeler comment le courant s'est produit.

Le galvanomètre nous montre que le courant dure tant que le rouleau *coupe* les lignes de force. On peut supposer que ces lignes de force opposent une certaine résistance mécanique au passage d'un conducteur faisant partie d'un circuit métalliquement fermé. C'est comme si elles représentaient de vrais filets matériels qu'on est obligé de *couper*. Il faut pour cela pousser le conducteur, c'est-à-dire dépen-

ser de l'énergie et c'est cette énergie qui se transforme et produit le courant.

Voilà donc bien matérialisée et rendue possible à nos yeux la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique (1).

C'est pour cela que nous avons incliné les rails, le moteur est ici la *pesanteur* qui oblige le cylindre à rouler et à couper des lignes de force, la poussée qu'il exerce pour les couper est consacrée à produire un courant qui circule dans la barre en mouvement.

Il y a une autre règle simple et facile qui nous permet de trouver instantanément le sens du courant dans un conducteur qui coupe des lignes de force, c'est la règle des *trois doigts*.

Disposons notre main droite comme l'indique la figure en écartant autant que nous le pourrons nos trois premiers doigts et en fermant les deux autres.

Tournons notre main pour que le pouce indique le sens du déplacement du conducteur (vers la droite dans le cas de la figure), dirigeons l'index dans le sens des lignes de force (vers en haut), il suffit de regarder le médius ou troisième doigt pour voir le sens du courant. On trouve qu'il va d'arrière en avant

(1) Il ne faudrait pas en conclure qu'il ne se produit des courants dans un circuit que tant que ce circuit coupe des lignes de force; c'est vrai dans les exemples que nous venons d'envisager, mais il est des cas où il se produit des courants induits sans qu'aucun conducteur se déplace, ni ne coupe aucune ligne de force. Nous citerons le cas de la bobine de Ruhmkorff et des transformateurs dans lesquels les circuits sont immobiles mais où il y a simplement variation rapide du nombre de lignes de force embrassées. Du reste, ainsi que nous l'avons indiqué, l'expérience du conducteur qui roule et qui coupe des lignes de force se ramène à celle d'un circuit qui embrasse un nombre variable de ces lignes. Si nous adoptons cette façon de voir pour ce qui va suivre, c'est pour plus de clarté, on ne doit pas oublier que tout se borne à des variations du nombre de lignes embrassées par les circuits considérés.

de la figure et c'est bien le résultat que nous a donné l'application du tire-bouchon.

Les deux moyens sont bons, mais dans bien des cas et en particulier dans ceux qui vont suivre, la règle des trois doigts sera d'une application plus facile.

DEUXIÈME PARTIE

LES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES A COURANT CONTINU

CHAPITRE PREMIER

ENROULEMENT EN ANNEAU

ENROULEMENT EN TAMBOUR

Principe des enroulements. — Reprenons notre anneau de fer doux de la page 19 (fig. 10) et disposons-le sur un axe, sur l'arbre d'un moteur à vapeur ou à pétrole par exemple, capable de l'entraîner à grande vitesse.

Supposons qu'il tourne entre les pôles N et S d'un aimant en fer à cheval dont nous aurons creusé les extrémités en demi-cercle afin de mieux envelopper l'anneau de fer doux.

Nous avons vu page 19 que si on étudie le fantôme magnétique d'un tel ensemble, toutes les lignes de force ou à peu près se dirigent vers l'anneau de fer doux qui semble les aspirer.

Dans la région comprise entre l'anneau et chaque pôle nous aurons un champ magnétique très intense à en juger par la grande quantité des lignes de force que la limaille nous révèle.

Disposons à plat sur notre anneau une série de

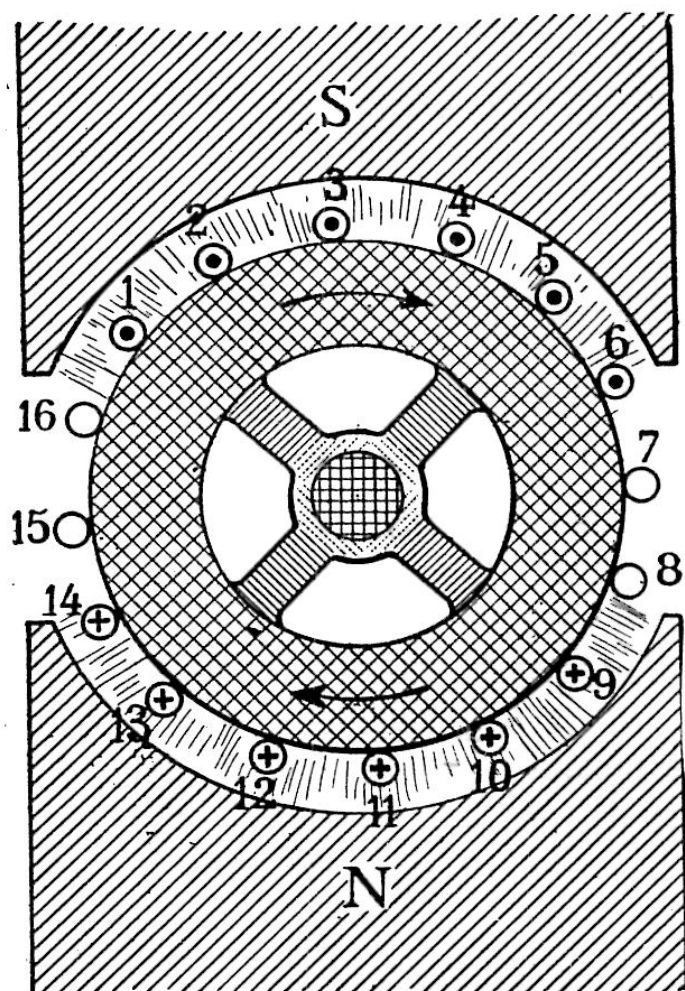


Fig. 15. — Principe des machines.

barres de cuivre rouge 1, 2, 3, 4, 5, 6, etc., 14, 15, 16, que nous fixerons solidement à la surface de l'anneau parallèlement à l'axe de rotation. Ces barres devront être enveloppées d'une gaine de coton ou de caoutchouc dans le but de les isoler.

Faisons tourner l'anneau et les barres qu'il supporte (fig. 15).

Chaque barre, la barre 1 par exemple, va repré-

senter le rouleau mobile de l'expérience précédente; elle coupera les lignes de force qu'elle rencontrera (1).

Cela suffit pour qu'elle se comporte comme une

(1) La présence d'un isolant autour de la barre n'empêche pas le phénomène de se produire, car les lignes de force traversent le coton ou le caoutchouc aussi bien que le carton sur lequel nous faisons nos fantômes.

véritable pile, car si on pouvait relier ses extrémités à un galvanomètre pendant qu'elle se déplace, on verrait comme précédemment un courant se manifester.

Quelle est la direction de ce courant?

Appliquons la règle des trois doigts. Disposons notre main *droite* devant la figure, tournons le pouce dans le sens du mouvement (vers la droite pour la barre 1), indiquons avec l'index le sens des lignes de force (de bas en haut), nous voyons le médus ou doigt suivant prendre une direction représentant un courant allant d'arrière en avant dans la barre 1, c'est-à-dire vers l'observateur. Marquons le sens de ce courant par un simple point (.) (ce point figurera la pointe d'une flèche qui percerait le papier, venant de derrière la figure vers l'observateur).

En examinant ce qui se passe pour les tiges 2, 3, 4, 5, 6, on voit qu'il en est exactement de même que pour la tige 1.

Les tiges 7 et 8 ne coupant pas de lignes de force puisqu'elles sont dans une région où il n'y en a pas, notre fantôme nous l'a montré, ne pourront fournir aucun courant.

Arrivons à la tige 9. Nous voyons que cette tige ne se dirige plus vers la droite mais bien vers la gauche. Pour appliquer la règle des trois doigts, nous devons mettre le pouce vers la gauche (sens du mouvement); l'index représentera toujours la direction des lignes de force qui vont comme tout à l'heure du pôle nord au pôle sud, mais notre médus nous indiquera un courant se dirigeant de l'avant vers l'arrière, c'est-à-dire que la flèche qui représenterait sa direction s'éloignerait de l'observateur, elle aurait

sa pointe derrière la feuille de papier et nous n'en verrions que la partie barbelée qui la termine; pour cette raison nous représenterons cette flèche par une croix (+).

Il en sera exactement de même pour les tiges 9, 10, 11, 12, 13 et 14, mais les tiges 15 et 16, qui ne coupent aucune ligne de force, ne pourront produire aucun courant et devront être considérées comme inactives.

Voilà toute la machine dynamo-électrique.

Examinons maintenant comment on peut recueillir ce courant que nous savons produire.

Chacune des barres 1, 2, 3, 4 et 5 peut être assimilée à une pile dont le pôle positif serait en avant de la figure et le pôle négatif derrière; couplons-les en série (page 5); pour cela relions le pôle positif de 1 (avant) au négatif de 2 (arrière), le positif de 2 (avant) au négatif de 3 (arrière) et ainsi de suite à l'aide d'un fil passant à l'intérieur de l'anneau (fig. 16).

Les barres 9, 10, 11, 12 et 13 peuvent aussi être assimilées à des piles qui auraient leur pôle négatif en avant et leur pôle positif en arrière. Couplons-les aussi en série de la même manière, nous aurons en fin de compte deux séries de piles qui fourniront des courants allant l'un vers l'autre. Réunissons-les par leurs extrémités voisines en utilisant les barres inertes 7 et 14, que nous relierons entre elles comme si elles étaient actives.

En étudiant la marche des courants dans ces deux moitiés de l'anneau, on voit qu'ils iront l'un vers l'autre et se rencontreront en 7 comme l'indiquent les flèches. Si c'étaient des courants d'eau, ils se détruiraient ou s'annuleraient, mais donnons-leur une issue en plaçant un balai métallique frottant

sur la barre 7. Les deux courants se réuniront en un seul sous ce balai et si nous leur offrons un chemin tel qu'un fil métallique pouvant les ramener en 14, ils s'empresseront de suivre le fil, leurs intensités s'ajouteront au lieu de s'annuler et nous pourrons en bénéficier puisque ce fil est extérieur à la machine.

Tel est le principe de l'anneau de Gramme avec lequel on a construit la première machine dynamo-électrique pratique.

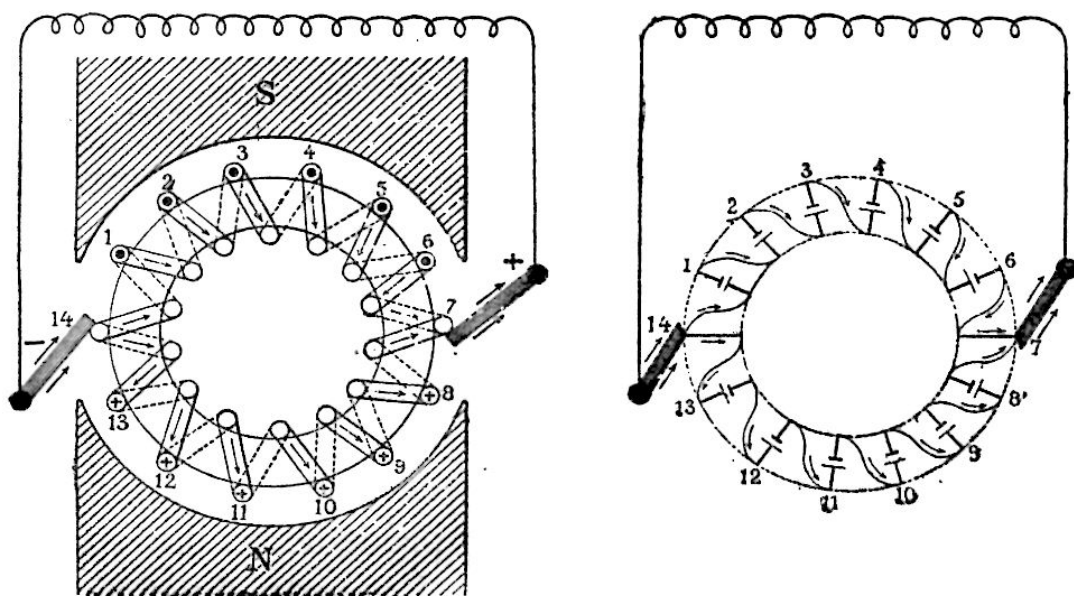


Fig. 16. — Principe des enroulements.

La figure 16 montre l'anneau dont les barres sont représentées par des piles couplées entre elles comme nous avons vu, ce qui fait mieux comprendre leur fonctionnement. La figure 17 représente l'anneau tel qu'on le construit et qui n'est autre que l'anneau de notre figure primitive dont les barres sont convenablement réunies entre elles par des fils passant à l'intérieur de façon à ce que les courants qu'elles produisent s'ajoutent dans chaque moitié. Deux frotteurs (fig. 16) appuient sur les barres inactives

(entre les pôles); ils servent à capter le courant qui provient de la réunion des deux courants circulant en sens contraire dans les deux moitiés de l'anneau.

Ce courant est continu et sa force électromotrice est d'autant plus élevée qu'il y a plus de barres (ou de piles) en série.

Définitions. — On appelle *induit* dans une machine dynamo-électrique la partie dans laquelle se développent les courants. On appelle *inducteurs* l'ensemble des aimants ou des électro-aimants qui fournissent le champ magnétique (1).

Description de l'anneau Gramme. — L'anneau Gramme tel qu'on l'employait (car aujourd'hui il a à peu près disparu pour faire place à l'enroulement en tambour) sur les machines dynamo-électriques, se composait d'un anneau de fer doux (fig. 17) sur lequel on enroulait une série de bobines de fil de cuivre isolé avec une couche de coton absolument comme les barres de la figure précédente. La partie du fil de ces bobines qui longe l'anneau du côté des pôles est seule *active*, chacun des fils de cette région peut être comparé à une des barres de la figure précédente. Les fils passant à l'intérieur de l'anneau sont au contraire *inactifs*, ils ne servent qu'à réaliser le montage en tension des barres comme nous l'avons vu tout à l'heure.

On pourrait recueillir les courants, circulant en

(1) Nous ne devons pas oublier dans ce qui va suivre que tout ce qui s'applique à la construction des machines dynamo-génératrices à courant continu s'applique aussi aux réceptrices ou aux moteurs, un moteur et une dynamo à courant continu étant absolument *identiques* et pouvant remplir l'une ou l'autre de ces fonctions.

sens inverse dans les deux moitiés de l'anneau, en faisant appuyer des balais métalliques sur les fils même de l'anneau, dans la région où il ne se produit pas de courant, c'est-à-dire entre les pôles, le fil se dénuderait par le frottement sous les balais et le contact pourrait se faire. Mais ce procédé, outre qu'il est barbare, conviendrait peu à la bonne conservation de l'anneau; aussi Gramme avait-il dès l'ori-

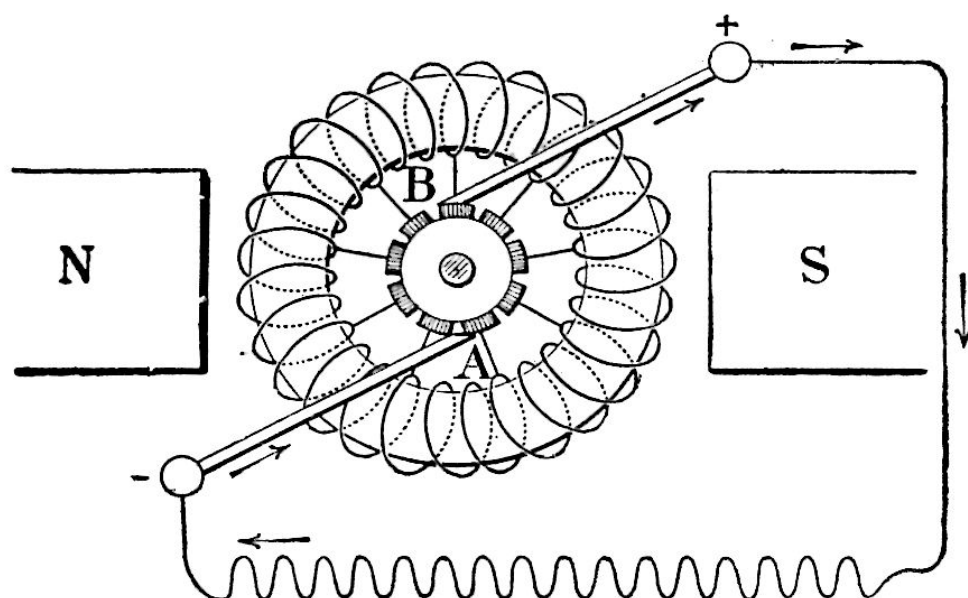


Fig. 17. — Enroulement en anneau avec collecteur.

gine muni sa machine d'une pièce appelée *collecteur* spécialement préparée pour recevoir les balais.

Cette pièce pourrait être constituée en autant de touches isolées qu'il y a de fils à la surface de l'anneau. Ces touches étant montées sur un cylindre et reliées chacune à un des fils de l'anneau, on aurait transporté sur une pièce plus robuste le frottement destructif des balais et le résultat cherché serait atteint.

En pratique ce serait trop compliqué, car il faudrait trop de touches; on préfère en mettre moins et ne relier les fils aux lames du collecteur que de 3

en 3 tours de fil, par exemple comme sur la figure 17 ou en espaçant davantage même si c'est nécessaire (fig. 18). De cette façon la construction du collecteur devient plus facile, il suffit de s'arranger de façon à ce que la différence de potentiel ou tension élec-

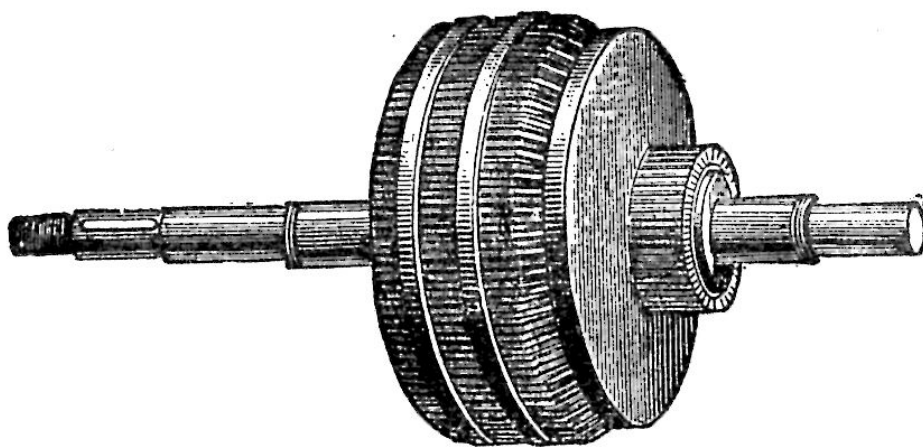


Fig. 18. — Anneau Gramme monté avec son collecteur.

trique entre chaque lame ne soit pas trop élevée à un moment quelconque pour que l'isolant qui les sépare puisse y résister.

Nous verrons plus loin à propos de la construction des collecteurs comment ce résultat est pratiquement atteint.

Enroulement en tambour. — Universellement employé aujourd'hui par presque tous les constructeurs, ce système d'enroulement, quoique plus compliqué en apparence que l'anneau Gramme, est en réalité bien plus facile à réaliser et surtout plus commode à réparer si on dispose de bobines faites d'avance comme c'est souvent le cas.

Pour nous rendre compte de ce mode d'enroulement, considérons toujours notre aimant NS, dont les extrémités sont convenablement arrondies de

façon à recevoir un anneau en fer doux mis en mouvement comme précédemment par une machine à vapeur.

Sur le pourtour de cet anneau et parallèlement à l'axe nous fixons solidement des barres de cuivre rouge 1, 2, 3, 4, etc., 11, 12, que nous aurons eu soin

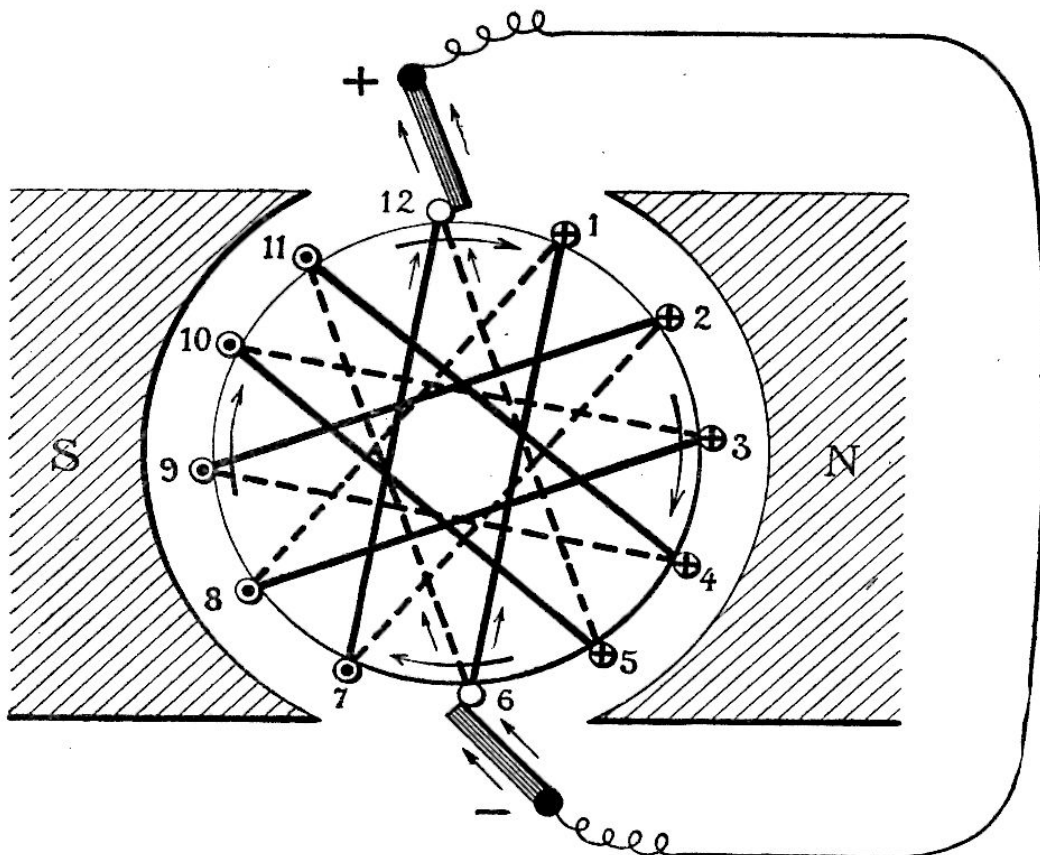


Fig. 19. — Principe de l'enroulement en tambour.

d'envelopper d'une gaine de coton ou de caoutchouc en vue de les isoler (fig. 19).

Nous savons que si nous faisons tourner l'anneau et les barres qu'il supporte dans le sens de la flèche, la barre 1 par exemple va couper constamment des lignes de force; elle sera comparable au rouleau de la page 32 et pourra fournir du courant, si pendant qu'elle se déplace on la relie par ses extrémités à un galvanomètre.

Il en sera de même de la barre 2, de la barre 3, etc.
Quel sera le sens du courant?

Appliquons la règle des trois doigts à la barre 1.

Nous avons des lignes de force qui vont de N vers S, — plaçons notre main droite de façon à indiquer cette direction avec l'index, tournons ensuite la main pour que le pouce soit dans le sens de la rotation (grandes flèches) le médius nous indique un courant qui s'éloignera de l'observateur, nous le marquerons par une croix (+) comme il a été convenu page 39.

Un essai du même genre nous montre qu'il en sera de même pour les barres 2, 3, 4, 5; nous les marquerons toutes avec une croix (+).

La barre 6 qui est entre les pôles ne coupe aucune ligne de force, elle sera inactive.

Dans la barre 7 le sens du courant est changé. En effet, les lignes de force vont toujours de N vers S mais le sens du déplacement se fait de bas en haut à cause de la rotation de l'anneau. En appliquant la règle des trois doigts, nous verrons que l'index reste toujours dirigé vers S, mais il nous faudra tourner péniblement la main de façon à ce que le pouce soit dirigé dans le sens de la rotation, c'est-à-dire de bas en haut. Le médius dirigé vers l'observateur nous montre que le courant viendra vers lui; c'est donc par un point que nous le représenterons (page 38).

Les barres 8, 9, 10 et 11 fourniront des courants de direction analogue, c'est-à-dire se dirigeant vers l'observateur; nous les représenterons par un point (.).

La barre 12 qui ne coupe aucune ligne de force sera inactive. Jusqu'à présent, tout se passe comme dans la figure 15; le couplage des barres va seul en faire la différence.

Nous avons vu précédemment que l'on pouvait

comparer les barres actives à autant d'éléments de pile, éléments que nous sommes libres de coupler comme bon nous semble.

La pratique montre que la force électromotrice ou la tension électrique fournie par chacune de ces barres ou piles élémentaires est *très faible*; pour avoir une tension un peu élevée nous sommes conduits à les monter en tension (page 5), car nous savons qu'avec ce groupement les tensions s'ajoutent.

Dans le bobinage en anneau, nous réunissons en tension deux barres voisines en reliant par un fil passant à l'intérieur de l'anneau l'extrémité avant d'une barre à l'extrémité arrière de sa voisine (page 40).

Mais nous pouvons faire autrement; ainsi, par exemple, au lieu de relier la barre 2 à ses voisines 1 et 3 nous allons la relier à la barre 9 située de l'autre côté. Nous devons relier le pôle — de 2 au pôle + de 9. Le pôle — de 2 est en avant (vers l'observateur) de même le pôle + de 9 est aussi en avant. Comme on le voit, la chose sera facile puisque nous aurons besoin d'un simple fil tendu suivant un diamètre.

Toujours pour que les tensions s'ajoutent nous monterons en série 9 avec 4 par exemple. Un instant d'attention nous montre que le négatif de 9 est en arrière de la figure, de même le positif de 4; nous les relierons par un fil qui coupera l'anneau sensiblement suivant un diamètre, mais sur la partie arrière que, pour plus de clarté, nous représenterons par un trait pointillé.

Nous relierons ensuite 4 avec 11 avec un fil passant en avant (comme pour 2 et 9), et ainsi de suite en englobant dans notre montage le plus de fils que nous pourrons.

Cependant, si nous continuons méthodiquement notre enroulement comme nous l'avons commencé, nous ne tarderons pas de nous apercevoir que par la force même des choses les directions des courants vont changer.

De 11 nous allons à 6 toujours en suivant méthodiquement notre enroulement, 6 est inactif et ne nous donnera rien, nous n'en tiendrons pas compte et relierons 6 avec 1, mais à partir de ce moment la direction du courant change, car le positif de 1 est en arrière, c'est comme dans l'enroulement à anneau quand on arrive entre deux pôles; pour achever le montage en tension nous relierons le positif de 1 (en arrière) avec le négatif de 8 également en arrière, puis le positif de 8 avec le négatif de 3 (en avant), le positif de 3 avec le négatif de 10 (en arrière), le positif de 10 avec le négatif de 5 (en avant); enfin 5 avec 12 qui est une barre inactive, 12 avec 7 et 7 avec 2. L'enroulement se termine donc très régulièrement.

A première vue, il paraît un peu compliqué, mais nous allons voir qu'on peut le comparer à l'anneau de tout à l'heure.

En effet, si on veut bien suivre avec soin la marche des courants, on verra en partant de la barre inactive 6, par exemple, deux chemins parcourus par des courants de sens inverse :

Un premier circuit... 6, 1, 8, 3, 10, 5 et 12.

Un deuxième circuit. 6, 11, 4, 9, 2, 7 et 12.

Toutes les barres ont été utilisées et chacun de ces circuits en renferme un même nombre.

Dans chacun d'eux le courant a une direction bien déterminée, car les tensions s'ajoutent, et ces courants

viennent se réunir en 12 et en 6, barres inactives comme dans notre anneau de tout à l'heure.

En appliquant deux balais, l'un en 12, l'autre en 6, sur les barres inactives et en réunissant ces balais par un fil conducteur, les deux courants qui allaient l'un vers l'autre en 12 s'élanceront par la voie commune que leur offre le balai et reviendront en 6 où ils se sépareront chacun dans leur circuit.

Cet enroulement est équivalent en somme à l'enroulement à anneau; seulement au lieu de réunir en tension toutes les barres situées dans une même moitié de l'anneau et sous un même pôle, on couple en tension des barres situées sous des pôles différents, en général symétriquement placées ou à peu près.

C'est un peu comme si nous montions en tension des piles réunies en tas en reliant l'une d'entre elles non pas avec sa voisine mais avec une pile quelconque du tas, puis cette dernière avec une autre non moins éloignée, etc.

On conçoit que malgré la complication qui en résulte on puisse arriver tout de même au résultat, à condition toutefois de faire attention et de ne pas se tromper.

Nous pourrions coupler aussi nos barres au petit bonheur, mais il ne faut pas oublier que pendant la rotation les rôles de chacune d'elles sont vite changés et telle barre qui sous le pôle sud était le siège d'un courant allant d'arrière en avant est le siège d'un courant allant d'avant en arrière quand elle arrive sous le pôle nord. Un couplage qui irait bien pour une position bien déterminée de l'ensemble n'irait plus pour une autre. Voilà pourquoi nous avons adopté ce mode régulier d'enroulement avec lequel, grâce

à sa symétrie, les choses restent les mêmes pendant la rotation.

En effet si l'anneau tourne, la barre 1 prend la place de 2, 2 la place de 3, etc., mais quels que soient les numéros des barres on voit que toujours les barres qui viendront à la place de 12 et de 6 seront inactives et que les mêmes phénomènes se reproduiront dans les autres barres.

Par le balai + nous recueillerons un courant continu fourni par les deux circuits dont peu importent les numéros de barre mais qui subsistent toujours.

Voilà tout l'enroulement en tambour si compliqué en apparence, si simple en réalité si on veut bien y réfléchir un peu.

Collecteur. — Au lieu de faire appuyer les balais sur les barres on les dispose sur un appareil particulier appelé collecteur, construit comme celui de l'anneau Gramme, en vue de résister aux frottements mieux que ne le feraient les barres elles-mêmes.

Ce collecteur est formé d'une série de lames en cuivre dur, disposées sur un cylindre entraîné par l'arbre et qui sont soigneusement isolées entre elles comme nous le verrons plus loin. Chacune d'elles est reliée par un fil à une barre ou à un groupe de barres comme on va s'en rendre compte.

Bobinage en tambour bipolaire. — Nous avons dit plus haut que la force électro-motrice ou la tension qui se manifeste entre les deux extrémités d'une barre coupant les lignes de force d'un champ magnétique n'est pas très élevée; il nous a fallu, dans notre expérience de la page 32, un galvanomètre très sensible pour en constater la présence.

La pile à laquelle nous avons assimilé chacune des

barres est, en somme, très faible et si nous voulons qu'elle nous donne une tension plus élevée, nous sommes conduits à multiplier le nombre de barres, c'est-à-dire à les remplacer par des *bobines* ou assemblages de barres dont les effets s'ajouteront.

Considérons les barres 2 et 9 par exemple (fig. 19) qui sont reliées entre elles, nous pouvons les rem-

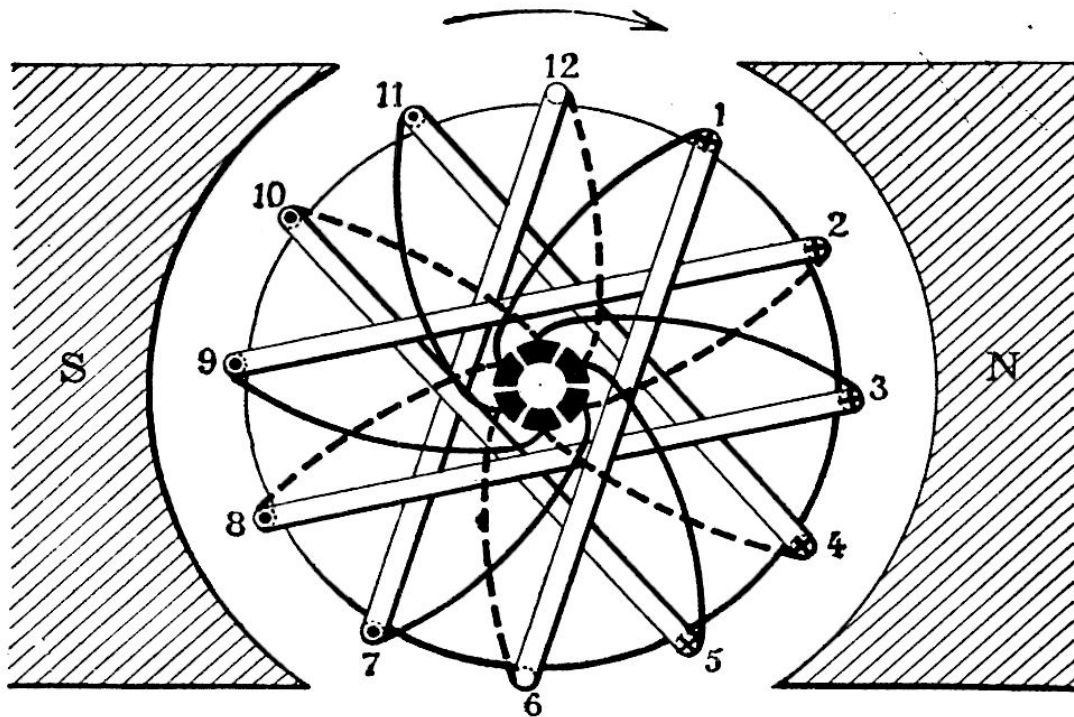


Fig. 20. — Enroulement bipolaire en tambour avec 6 bobines.

placer par un fil de cuivre isolé par du coton que nous enroulerons un grand nombre de fois suivant le chemin 2-9 en avant et 9-2 en arrière. Cette bobine est représentée (fig. 20) par deux traits qui indiquent son épaisseur, il nous restera deux bouts de fil, l'un, le bout commençant qui représente l'extrémité arrière de la barre 2, et l'autre l'extrémité arrière de la barre 9; le premier doit être relié à 7, l'autre à 4. Les barres 7 et 12 pourront être remplacées comme les barres 2 et 9 par une bobine qui aura deux bouts de

fil, l'un représentant le commencement en 7 et qui doit être relié à 2, l'autre la fin en 12 qui sera relié à 5 et ainsi de suite.

Nous aurons remplacé nos barres par des bobines, mais l'enroulement reste le même et les figures 19 et 20 sont au fond identiques.

Sur la figure 20 nous avons représenté le collecteur; il est formé de touches isolées; chacune d'elles est reliée à une bobine. Pour plus de facilité on s'est servi de la lame du collecteur pour faire la jonction entre deux bobines.

Ainsi, par exemple, nous venons de voir que le bout de fil commençant la bobine 2-9 doit être relié à 7; nous ferons cette liaison en soudant sur la même lame du collecteur les deux fils à jonctionner venant de 2 et de 7. De même pour le fil qui réunit 12 à 5 ce sera la touche suivante qui servira de trait d'union et ainsi de suite.

Ce bobinage est appelé *bipolaire* parce qu'on ne dispose que de deux pôles N et S; nous allons voir qu'on peut en employer un plus grand nombre. On l'appelle en tambour à cause de sa forme, car les fils couvrent l'anneau de fer en passant sur les deux faces comme sur les deux membranes vibrantes d'un tambour.

L'enroulement en tambour bipolaire que nous avons représenté est à six bobines disposées de la façon suivante, en utilisant les positions des barres de la figure précédente :

1 ^{re} bobine.....	1 — 6
2 ^e —	3 — 8
3 ^e —	5 — 10
4 ^e —	7 — 12
5 ^e —	9 — 2
6 ^e —	11 — 4

A chaque bobine correspond une touche ou lame du collecteur qui aura donc 6 lames en tout; ces lames permettent, comme on l'a vu, de relier les bobines entre elles en y faisant aboutir et en y soudant les extrémités des fils des bobines convenablement choisis.

Enroulements multipolaires. — L'enroulement en tambour bipolaire tel que nous le représente la figure 20 est employé aujourd'hui sur presque toutes les petites machines; il est en effet plus facile à réaliser que l'enroulement à anneau qui exige, on le sait, que le fil soit passé à l'intérieur.

Or, dans les petites machines la place matérielle manque et il devient difficile de passer et de loger ensuite les fils.

Avec l'enroulement en tambour, la chose se fait très facilement, puisqu'on enroule le fil comme une corde sur un tambour : c'est ce qui justifie la vogue de cet enroulement.

Les machines industrielles comportent plus de bobines que nous n'en avons représenté, mais nous avons cherché avant tout la clarté et, en somme, l'enroulement est le même avec 6 bobines qu'avec 12 ou 24.

Pour les grosses machines génératrices, les moteurs de tramways, etc., l'enroulement en tambour est encore en faveur, car il en résulte d'autres avantages encore comme on le verra.

On emploie dans ces cas des *machines multipolaires*, c'est-à-dire qu'au lieu de faire tourner l'anneau ou le tambour entre une paire de pôles comme nous le faisons jusqu'à présent on en dispose plusieurs paires tout autour de l'induit et on accroît ainsi la puissance de la machine.

Quoique peu employé, l'enroulement à anneau présente une simplicité apparente plus grande que l'enroulement à tambour; c'est donc par lui que nous commencerons l'étude des enroulements de machines multipolaires.

Reprenons notre anneau Gramme de la page 41 et

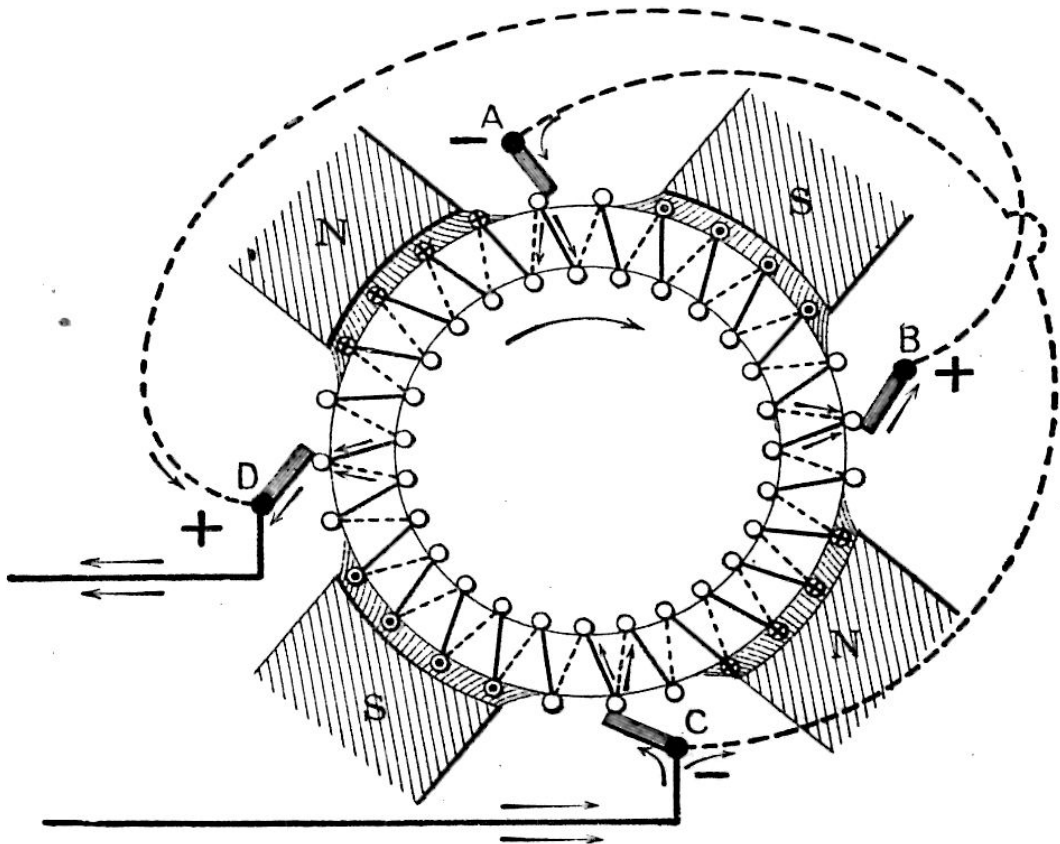


Fig. 21. — Enroulement multipolaire à anneau en *quantité* avec autant de balais que de pôles.

supposons que les deux pôles N et S, entre lesquels il tourne, soient assez espacés pour que nous puissions en disposer deux autres absolument analogues (fig. 21).

Faisons tourner notre anneau.

Si nous analysons ce qui se passe dans chaque conducteur au moment où il passe sous un pôle, nous voyons qu'il coupe chaque fois des lignes de force et en appliquant la règle des trois doigts nous trouvons

que les conducteurs passant sous les pôles nord seront le siège de courants s'éloignant de l'observateur (+) et les conducteurs passant sous les pôles sud fourniront des courants se dirigeant vers l'observateur (.).

En plaçant des balais A, B, C, D dans les intervalles qui séparent les pôles, nous disposerons de 4 prises de courant. En somme cette machine sera la juxtaposition de deux machines bipolaires et c'est ce qui explique l'accroissement de puissance qui en résulte.

En représentant par des flèches la direction des courants qui circulent dans les fils de cet anneau, nous voyons que ces courants cherchent à sortir par les balais B et D et à rentrer par les balais A et C. Les balais B et D seront deux pôles positifs, nous pourrons les accoupler ensemble, car par raison de *symétrie* les courants qu'ils fournissent sont égaux.

De même nous réunirons les balais A et C qui formeront le pôle négatif de la machine. Comme on le voit cette machine à 4 pôles sera deux fois plus puissante que la machine bipolaire que l'on obtiendrait avec en supprimant une paire de pôles. Tel est le principe des machines multipolaires, qui comportent en général autant de balais que de pôles.

Dans bien des cas cependant on rencontre des machines à plusieurs pôles avec *une seule* paire de balais. Comment peut-on arriver à ce résultat? A l'aide d'enroulements convenablement établis.

De même que les groupements de piles se divisent en deux classes : les montages en *quantité* et les montages en *série*, de même les bobines que l'on place sur les induits des machines dynamo-électriques et que l'on peut assimiler à des piles, peuvent se coupler à

l'aide d'enroulements convenables en *quantité* ou en *série*.

On peut aussi combiner ces deux modes d'enroulements et obtenir le bobinage *série-parallèle*. Nous aurons donc trois sortes d'enroulements à examiner :

- 1° *Bobinage en quantité ou en parallèle ;*
- 2° *Bobinage en série ;*
- 3° *Bobinage en série-parallèle.*

Enroulement multipolaire à anneau en quantité. — Notre anneau de la figure précédente avec ses quatre balais réunis deux à deux constitue un enroulement à anneau en quantité.

En effet les deux balais A et B peuvent être assimilés aux deux pôles d'une pile. De même pour C et D. En réunissant le balai positif B au balai positif D, et le balai négatif A au balai négatif C, on réalise un couplage en quantité (page 7).

La tension ou différence de potentiel dont on dispose n'est que celle qui existe entre deux balais voisins, mais l'intensité que l'on peut obtenir est double, car c'est comme si on avait accouplé en quantité deux piles ou deux machines.

Examinons maintenant comment on peut, avec ce mode d'enroulement, réduire à deux le nombre de balais quel que soit le nombre de pôles.

Pour plus de clarté supposons notre anneau constitué par douze bobines qui, en somme, représentent l'enroulement continu de la figure 17.

Ces bobines sont réunies par leurs points de jonction à 12 lames isolées constituant le collecteur.

Jusqu'ici rien de changé, nous pourrions faire tourner l'anneau entre ses quatre pôles et les mêmes phénomènes de tout à l'heure se représenteront. Nous

aurons simplement reporté sur un collecteur le frottement des balais qui aurait vite fait de détruire notre enroulement si nous avions conservé la disposition primitive.

Par raison de symétrie les bobines situées aux

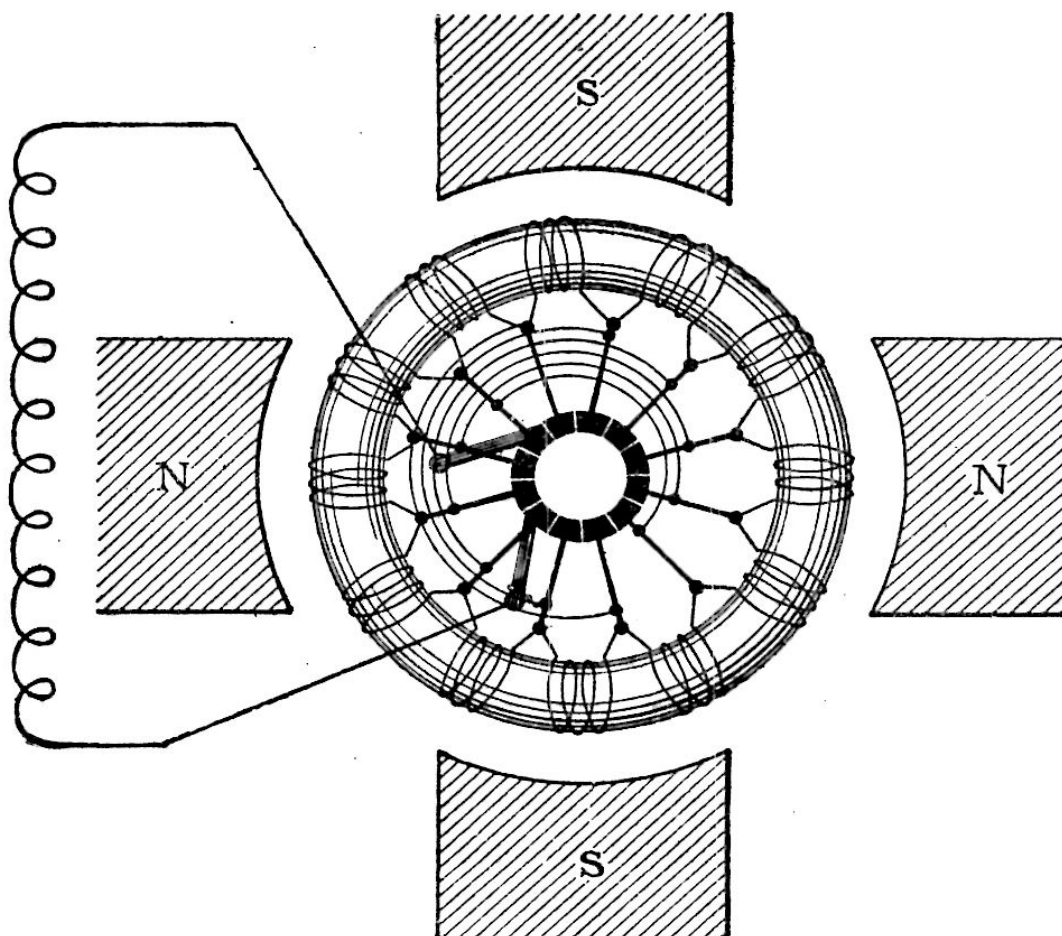


Fig. 22. — Enroulement multipolaire à anneau en *quantité* avec une seule paire de balais.

extrémités d'un même diamètre passeront en même temps sous des pôles identiques et seront le siège de courants égaux et de même direction.

Nous pourrions les assimiler à deux piles égales et les coupler en quantité, ce que nous ferons à l'aide d'un fil ou d'une lame courbée en arc de cercle que nous ferons passer au milieu de l'anneau.

De cette façon nous pourrions réduire à deux le nombre des balais. En effet, tout à l'heure nous réunissions ensemble les balais représentant les mêmes pôles par un fil extérieur, nous avons maintenant obtenu le même résultat par des fils intérieurs, de sorte que la machine y gagnera en facilité d'entretien.

C'est très simple, comme on le voit, mais en pratique de sérieuses difficultés surgissent. Il faut d'abord pouvoir faire cheminer sans encombre ces fils ou lames supplémentaires à l'intérieur de l'anneau et comme il y a généralement beaucoup plus de bobines que nous n'en avons figuré, cela devient assez compliqué. Il peut ensuite se produire des *courants de circulation* à l'intérieur de l'anneau si la symétrie n'est pas *parfaite*. Nous avons en effet supposé que les bobines passant sous des pôles identiques produisaient des tensions ou différences de potentiel absolument *égales*, ce qui a permis de les coupler en quantité. Il faut pour cela qu'elles coupent en même temps exactement le même nombre de lignes de force, ensuite qu'elles aient exactement la même longueur et en pratique il est quelquefois loin d'en être ainsi, car on n'obtient pas avec les aimants ou avec les électro-aimants des champs magnétiques bien égaux. Des courants s'établissent à l'intérieur de l'anneau de la bobine à la tension la plus élevée vers la bobine à une tension moindre, et ils sont perdus pour le circuit extérieur. Le rendement de la machine est diminué de ce fait et l'avantage résultant de la réduction à deux du nombre des balais devient illusoire.

Enroulement multipolaire à tambour en quantité.
— On réduira de même à deux le nombre des balais dans un enroulement à tambour en réunissant par

un fil ou une lame les bobines qui passent en même temps sous des pôles identiques. Ce dispositif offre les mêmes inconvénients qu'avec l'anneau et mieux vaut employer autant de balais que de pôles, quitte à réunir extérieurement tous les balais positifs entre eux et tous les balais négatifs entre eux. C'est ce que l'on fait généralement.

Enroulement multipolaire à anneau en série. — La réduction à deux du nombre des balais devient intéressante et parfaitement réalisable avec les induits multipolaires enroulés en *série*. Ces induits existent dans presque tous les moteurs de tramways, car là, plus que partout ailleurs, se fait sentir le besoin de diminuer le nombre des balais et par suite l'entretien.

Les enroulements en série que l'on rencontre dans l'industrie paraîtront un peu compliqués, mais avec un peu d'attention on verra qu'on peut les ramener aux types que nous allons décrire.

Nous commencerons par l'enroulement en série à anneau pour 4 pôles.

Nous avons vu (page 54) que lorsqu'on fait tourner un anneau Gramme ordinaire entre 4, 6, 8, etc., pôles identiques, les bobines qui passent sous les pôles sont le siège de forces électromotrices que l'expérience de la page 32 nous a mis en évidence, et qui font que l'on peut les assimiler à autant d'éléments de piles.

Ces piles, nous sommes maîtres de les coupler comme nous voudrons et, dans le cas qui nous occupe, c'est-à-dire avec un anneau tournant entre 4 pôles, nous allons chercher à les monter en série.

Supposons que notre anneau comporte 13 bobines (fig. 23).

Au lieu de réunir ensemble les bobines voisines

comme nous le faisons précédemment et chaque point de liaison à une lame du collecteur, réunissons en série les bobines qui passent sous les mêmes pôles ou à peu près, de façon à ce que les tensions s'ajoutent.

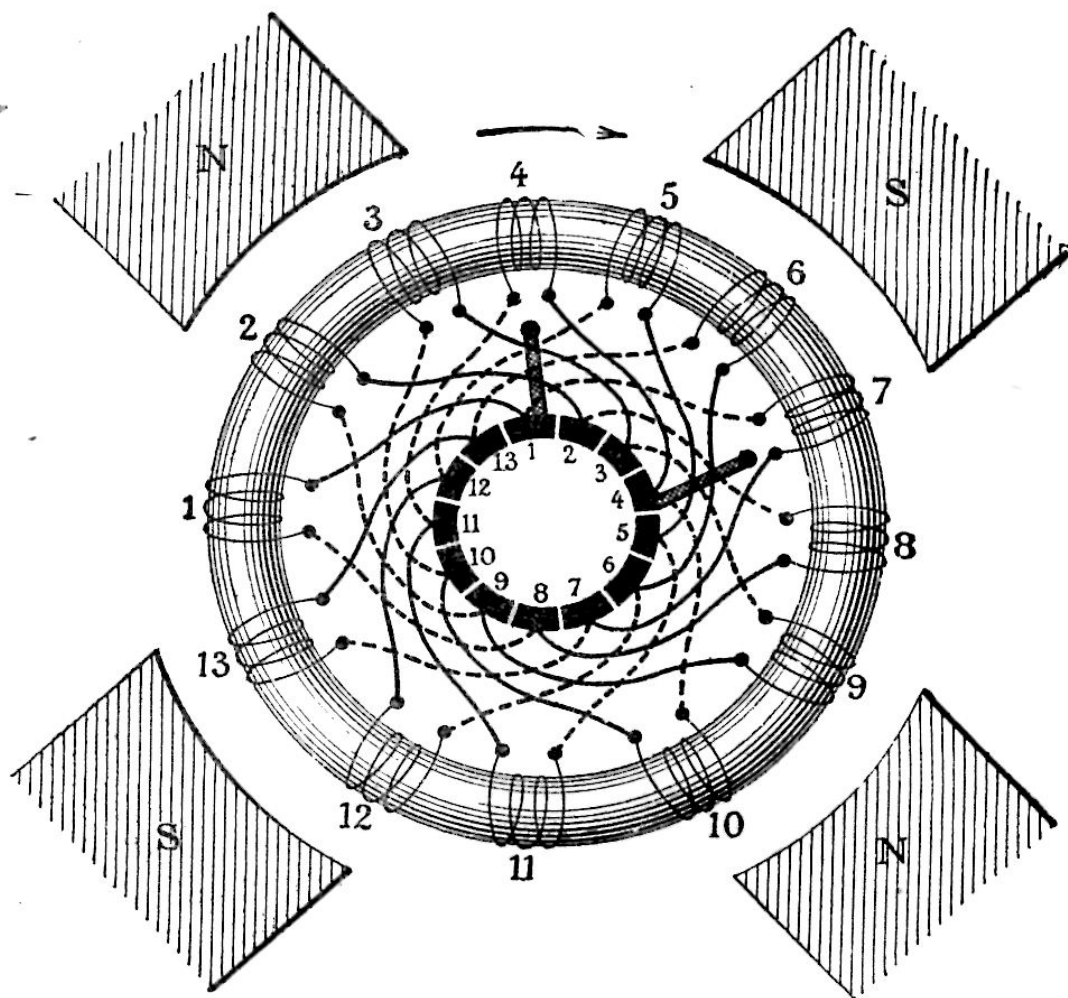


Fig. 23. — Enroulement multipolaire à anneau en *série* avec une seule paire de balais.

Prenons la bobine 7 qui passe sous un pôle sud, soudons un des bouts du fil qui la constitue à la touche 1 du collecteur, relions l'autre bout à la bobine 13 qui passe aussi sous un pôle sud, les courants s'ajouteront, car on a relié le bout finissant de 7 (trait plein) au bout commençant de 13 (trait poin-

tillé). Cette liaison se fera sur la lame 7 du collecteur (à égale distance des deux bobines).

Relions ensuite 13 à 6 qui est encore sous un pôle sud, les tensions s'ajouteront, car elles sont bien en série. Servons-nous pour effectuer la liaison de la lame 13 du collecteur à égale distance de ces 2 bobines. Relions ensemble et de la même manière 6 à 12 par la lame 6, puis 12 à 5 par la lame 12.

Relions ensemble 5 à 11 par la lame 5, la bobine 11 est inactive, car elle n'est sous aucun pôle mais elle tend à s'approcher du pôle sud, étant donné le sens de rotation de l'anneau, le courant qui s'y développera, très faible au début, sera de même sens que celui des bobines précédentes qui, on le voit, seront encore sous des pôles sud et le couplage aura sa raison d'être. De 11 nous allons en 4 par la lame 11, de même 4 est une bobine inactive.

Nous relierons l'autre bout de 4 à la touche 4 du collecteur et ici notre montage est complet, pour les bobines parcourues par un même courant du moins.

Nous devons donc appliquer deux balais l'un sur 1, l'autre sur 4, touches entre lesquelles sont comprises les bobines que nous venons de monter en série.

Considérons maintenant la bobine 10 sous un pôle N, relions une de ses extrémités (bout commençant, trait pointillé) à la touche 4 déjà reliée à la bobine 4 et sur laquelle frotte un balai.

Relions l'autre bout de 10 à la bobine 3 qui est aussi sous un pôle nord et le siège, par conséquent, d'un courant de même sens que dans 10, utilisons la touche 10 à égale distance entre les deux pour effectuer la jonction.

Réunissons de même 3 à 9 par la touche 3, puis

9 à 2 par la touche 9; relient 2 à 8 et 8 à 1. La bobine 1 est inactive, mais la rotation l'emmène vers un pôle nord et notre couplage est légitime, relient 1 à la touche 1 et l'enroulement est terminé.

En effet, nous avons utilisé *toutes* les bobines de notre anneau que nous avons groupées en deux circuits qui sont les suivants :

1^{er} circuit, bobines 7, 13, 6, 12, 5, 11, 4;

2^e circuit, — 10, 3, 9, 2, 8, 1.

Ces deux circuits sont parcourus par des courants égaux mais de sens inverse comme dans notre premier anneau Gramme, deux balais nous suffiront pour les recueillir.

En somme, l'enroulement en série consiste à grouper en tension toutes les bobines dont les courants sont susceptibles de s'ajouter et cela quel que soit le nombre des pôles. On n'aura jamais besoin de plus d'une paire de balais, ce qui diminuera l'entretien, chose à considérer avec les moteurs de tramways placés le plus souvent sous les voitures, dans des carcasses fermées (page 139).

Nous avons déjà dit que l'enroulement à anneau était de moins en moins employé, surtout avec les machines multipolaires.

L'enroulement à tambour procure, en effet, dans ce cas, de sérieux avantages qui sont surtout sa réparation facile en cas d'accident et son bobinage facile.

Enroulement multipolaire à tambour en série.

— Rappelons le principe de l'enroulement en tambour (page 45). On sait que pour réaliser cet enroulement, on dispose à la surface d'un cylindre de fer

doux et parallèlement à son axe une série de barres ou de conducteurs en cuivre rouge soigneusement isolés et solidement fixés au cylindre de fer.

En faisant tourner ce système entre les pôles d'aimants N et S, on réalise en grand notre expérience du rouleau et nous savons que toutes les barres qui couperont des lignes de force seront le siège d'un courant si l'on relie leurs extrémités à un appareil capable d'en déceler l'existence.

Nous avons vu aussi que l'on pouvait comparer ces barres à autant d'éléments de pile et par suite les coupler entre elles en série de façon à ce que les tensions ou différences de potentiel qu'elles produisent s'ajoutent.

Pour les coupler convenablement, on est obligé d'appliquer la règle des trois doigts afin de déterminer le sens du courant qui traverse chacune d'elles.

Lorsque le cylindre de fer et les barres qu'il supporte tournent entre deux pôles N, S, seulement on couple les barres en les réunissant par des fils passant sur les deux côtés du tambour et sensiblement suivant un diamètre (traits pleins et pointillés de la figure 20).

Il en est tout autrement avec les machines multipolaires et en particulier avec quatre pôles, comme on va le voir. Si on considère une barre coupant les lignes de force d'un pôle quelconque, on n'a plus besoin de la coupler à celle qui lui est diamétralement opposée, il suffit de chercher à côté sous le pôle voisin une barre convenable, et le fil de liaison au lieu d'être un diamètre devient une *corde* du cercle formé par les barres. L'enroulement est plus commode et on a moins de fil perdu.

La figure 24 représente un enroulement en série à

tambour pour quatre pôles NS, N'S'. Nous avons supposé qu'à la surface du cylindre de fer doux nous avons pu mettre 18 barres et si nous n'en avons pas mis davantage, c'est pour ne pas compliquer inutilement cette première figure.

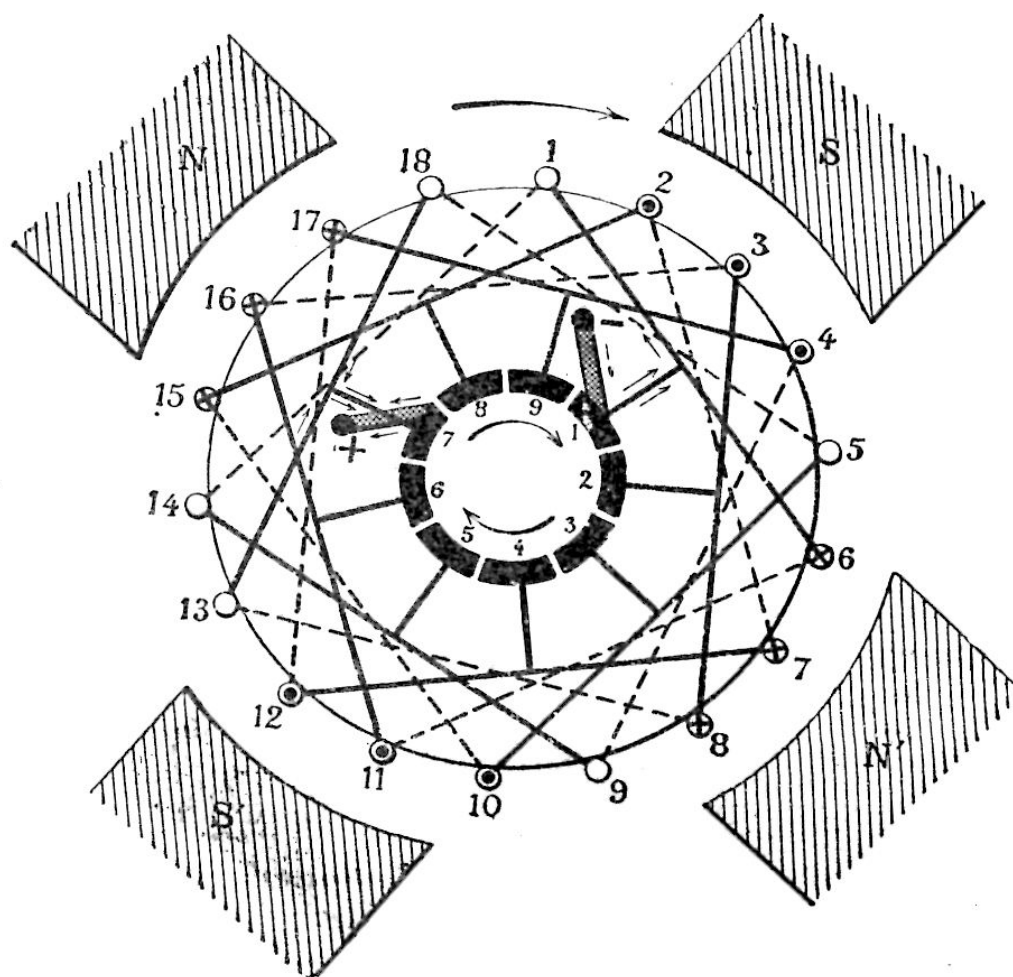


Fig. 24. — Enroulement multipolaire à tambour en série avec une seule paire de balais

Numérotions ces barres et supposons que le cylindre de fer doux ainsi recouvert, l'*induit* pour parler un langage plus électrique, tourne dans le sens de la flèche, c'est-à-dire dans le sens des aiguilles d'une montre.

Appliquons la règle des trois doigts successive-

ment aux barres actives, c'est-à-dire à celles qui coupent des lignes de force.

Prenons le pôle N' par exemple et la barre 7.

Les lignes de force sortent par définition du pôle nord, nous devons diriger notre index vers le centre du cylindre.

La barre 7 tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, notre pouce devra être dirigé vers 8, 9, 10, etc.

On voit que le médius indique un courant s'éloignant de l'observateur, c'est-à-dire allant d'avant en arrière.

La direction du courant dans la barre 7 sera représentée par une croix (+) qui indique des courants s'éloignant.

De même pour 6 et 8 et pour 15, 16, 17, qui sont dans le même cas, sous l'autre pôle nord N.

Pour les barres qui passent sous les pôles sud S et S', la règle des trois doigts nous indiquerait des courants se dirigeant vers l'observateur.

Les barres 2, 3, 4, 10, 11 et 12 seront marquées par un point (.).

Prenons comme point de départ de notre enroulement la barre 6 que nous relierons à la touche 1 du collecteur.

Couplons 6 avec 11. Pour que les courants s'ajoutent, il faut que le courant qui descend en 6 remonte dans 11. Il suffit de réunir pour cela les extrémités arrière des barres (trait pointillé).

Relions 11 à 16, ici le fil de liaison sera en avant, du côté du collecteur, nous en profiterons et nous nous servirons de la touche 6 pour faire la jonction.

Nous pouvons coupler ensuite 16 avec 3; il faudra pour cela un fil passant derrière (trait pointillé),

puisque le courant descend en 16 et remonte en 3.

De même relions 3 à 8 par la touche 2.

Puis en continuant de la même manière, relions 8 à 13, 13 est une barre presque inactive, en tous cas plus près de S' que de N, en sorte que ce couplage a sa raison d'être. Relions 13 à la touche 7 du collecteur.

On voit que l'on recueillera les courants circulant dans les barres que nous venons d'énumérer.

Mais il reste encore d'autres barres; continuons donc notre couplage.

Nous avons relié la barre 13 à la touche 7.

Relions la touche 7 à la barre 18 qui est inactive mais qu'il faut introduire dans le circuit, car elle deviendra active lorsqu'elle passera sous le pôle S. Relions 18 à 55 en faisant toujours comme précédemment, c'est-à-dire par un fil joignant les bouts arrière, puis la barre 5 à la barre 10 par un fil joignant les bouts avant et en utilisant la lame 3 du collecteur.

10 n'est pas tout à fait sous le pôle S' mais commence déjà à couper des lignes de force, cette barre sera comme ses voisines 11 et 12 le siège de courants allant d'arrière en avant que nous représenterons par un point (.). Relions ensemble les extrémités arrière des barres 10 et 15, puis 15 à 2 par la touche 8.

2 à 7 par leurs bouts arrière, 7 à 12 par la lame 4, 12 à 17 par l'arrière, 17 à 4 par la lame 9.

Joignons 4 à 9 barre inactive, puis 9 à 14 par la lame 5, et enfin 14 à 1 par un fil arrière.

L'extrémité avant de 1 est reliée à la lame 1 et par suite à 6.

On voit que nous sommes revenus au point de départ.

Les barres 9, 14 et 1 sont inactives, mais nous ne

pouvons les laisser de côté, car elles seront actives dès que l'induit aura tourné un peu et qu'il les amènera sous les pôles; en tous cas elles agissent comme des fils et leur rôle est de ramener en 1 le courant que nous avons collectionné sur les barres précédentes.

Ainsi donc, comme dans l'enroulement à anneau multipolaire en série, nous disposons de deux circuits de barres bien distincts qui fournissent des courants se dirigeant vers les deux touches 1 et 7. Si nous faisons appuyer deux balais l'un sur la touche 7, l'autre sur la touche 1, nous recueillerons ces deux courants qui s'ajouteront sous nos balais et dans le circuit extérieur.

Ces circuits sont les suivants :

1^{er} *circuit* en partant de la touche 1 du collecteur et comprenant les barres :

6, 11, 16, 3, 8, 13.

2^e *circuit* : 1, 14, 9, 4, 17, 12, 7, 2, 15, 10, 5, 18.

Grâce à la symétrie parfaite et à la régularité avec laquelle cet enroulement a été effectué, on comprend très bien que si l'induit tourne et si la barre 1 vient à la place de 2, par exemple, toutes les autres barres avanceront d'un cran et les mêmes phénomènes se représenteront. Les numéros de barres entrant dans nos deux circuits seront changés, mais le résultat ne le sera pas et nous aurons entre nos deux balais une tension continue, produite par nos assemblages de barres qui changent constamment de place mais dont le couplage reste toujours le même, quelle que soit la vitesse de leur déplacement (1).

(1) Une remarque s'impose : le 2^e circuit comporte plus de barres que le premier; il ne semble donc pas qu'il puisse y avoir égalité

En réalité comme la tension qui naît entre les extrémités d'une barre est très faible, on en dispose plusieurs à côté les unes des autres, ou mieux on les remplace par des bobines de fil de cuivre isolé comme celles dont il a été question dans le cas de l'enroulement bipolaire en tambour.

C'est ainsi que les barres 2 et 7 (fig. 24), réunies par le fil (pointillé) passant derrière, seront remplacées par une bobine 2 et 7 formée d'un fil de cuivre isolé enroulé en rectangle, de façon à occuper la place des barres 2 et 7. (Nous apprendrons dans la suite comment ces bobines sont fixées à la surface de l'induit.)

Nous voyons sur la figure 24 que les barres 2 et 7 sont reliées par leur extrémité aux touches 8 et 4 du collecteur.

De même la bobine 2-7 (fig. 25) aura l'un de ses bouts de fil relié à la touche 8, l'autre à la touche 4.

Prenons la bobine suivante 4-9, nous verrons qu'elle remplace les barres 4 et 9 liées par derrière et ainsi de suite.

Il n'y aura en somme rien de changé, sauf que nous aurons accru considérablement la différence de potentiel que pourra nous donner notre machine, car nous aurons augmenté d'une façon notable le nombre de conducteurs coupant des lignes de force.

L'enroulement tel que nous venons de le réaliser représente un induit à tambour en série à 4 pôles et

entre sa force électromotrice et celle du premier, mais si on veut bien remarquer que dans le 2^e circuit une grande partie des barres sont inactives et que de plus les barres 15 et 10 sont presque hors du pôle et, par suite, presque inactives, il reste dans ce circuit les barres actives 4, 17, 12, 7, 2 que nous opposons à un même nombre de barres actives du premier circuit, c'est-à-dire aux bancs 6, 11, 16, 3, 8, la barre 13 étant inactive.

à 9 bobines, mais en réalité on en met bien davantage et nous citerons comme exemple les enroulements à tambour en série à 4 pôles pour moteurs de

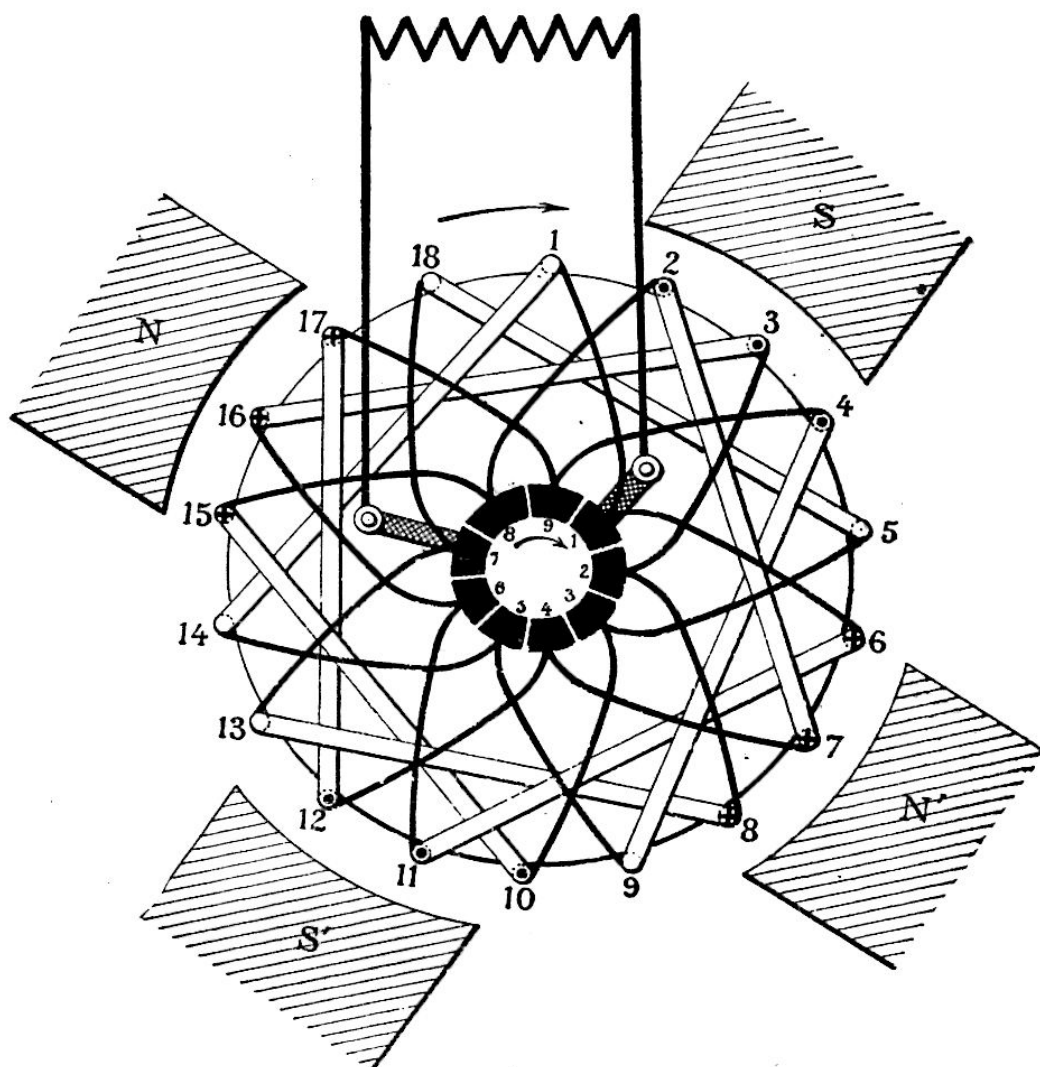


Fig. 25. — Enroulement multipolaire à tambour en série avec 9 bobines et une seule paire de balais.

tramways qui ne comprennent pas moins de 50 bobines.

Nous ne dessinerons pas un tel enroulement, car la figure ne serait pas suffisamment nette et le lecteur ne pourrait pas suivre les fils, mais nous en représenterons un du même genre à 13 bobines

seulement et à 4 pôles. Il sera un peu plus compliqué que le précédent quoique son principe reste le même, mais on pourra facilement s'y reconnaître.

Une fois familiarisé avec le groupement de ces

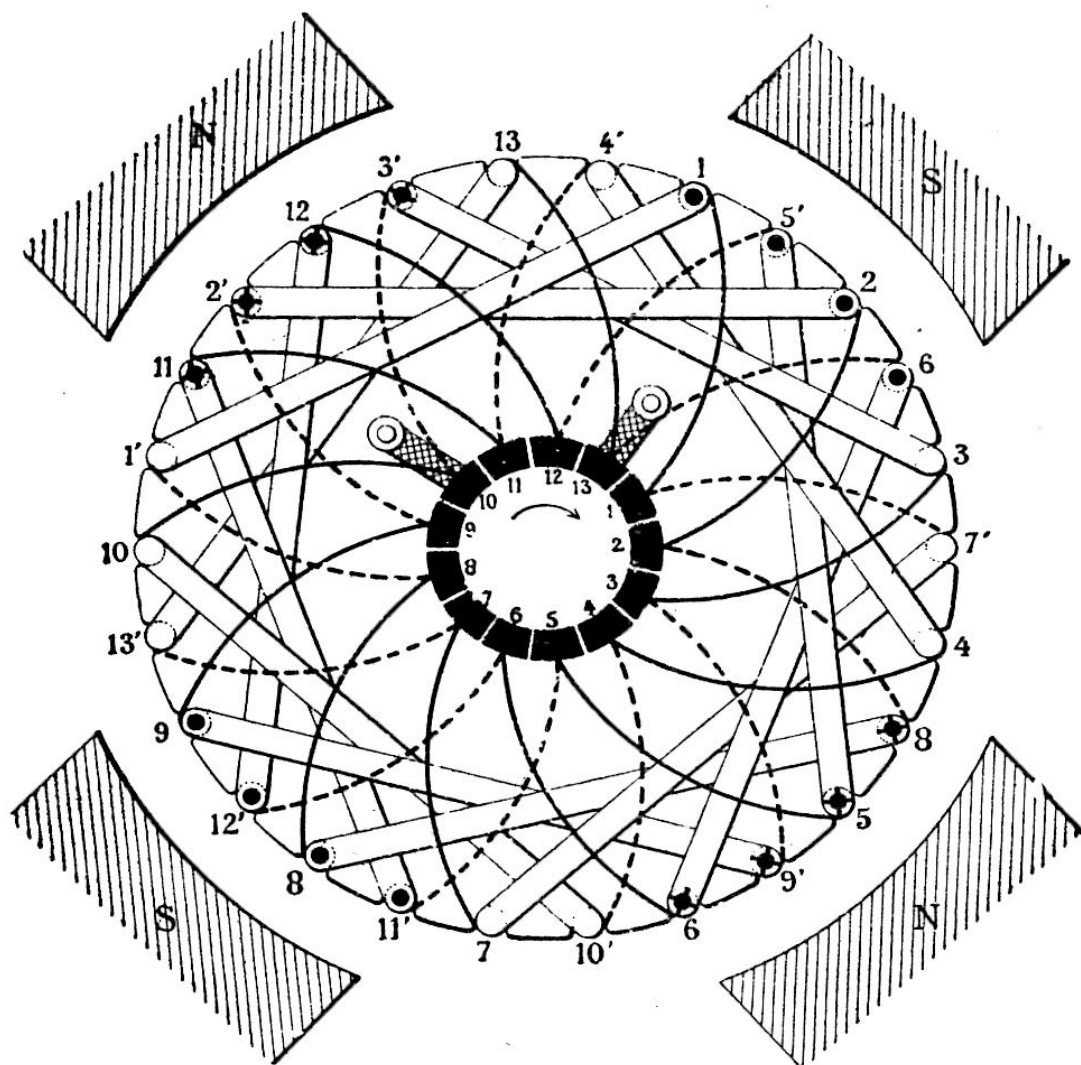


Fig. 26. — Enroulement multipolaire à tambour en série avec 13 bobines et une seule paire de balais.

bobines, le lecteur comprendra aussi facilement l'enroulement des moteurs de tramways dont la différence réside simplement dans le nombre de bobines qui est plus considérable.

Supposons donc réalisé cet enroulement en série à 13 bobines et 4 pôles représenté figure 26.

Partons du balai 10 reposant sur la touche 10 du collecteur. Deux chemins s'offrent à nous : d'abord le trait pointillé qui représente un des deux fils de la bobine 3 et 3'. Suivons-le : 3' passe sous un pôle nord, étant donné le sens de rotation, la règle des trois doigts nous montre que le courant va dans les fils placés en 3' d'avant en arrière, c'est-à-dire qu'il s'éloigne de l'observateur. Nous parcourons plusieurs fois la bobine 3'-3 (autant de fois qu'il y a de fils) et nous arrivons à la touche 3 du collecteur. De 3 nous allons en 9' qui passe sous un pôle nord et en 9 qui est sous un pôle sud; les tensions des courants s'ajoutent dans les divers fils qui constituent la bobine et nous arrivons à la touche 9 du collecteur. De la touche 9 nous entrons dans la bobine 2' qui passe sous un pôle nord; le courant a toujours le même sens, mais sa tension grandit, car elle reçoit celle de la bobine 2'-2. Nous sortons de 2'-2 et arrivons à la touche 2 qui nous relie à la bobine 8'-8. Là encore la tension augmente, car les flèches nous montrent que le courant a le même sens que précédemment, de 8'-8 nous allons en 1'-1 par la touche 8, puis de 1'-1 à 7'-7 qui est une bobine inactive, mais que nous devons utiliser, car elle deviendra active à son tour, et enfin de 7'-7 à 13'-13 qui est aussi une bobine inactive, mais qui nous ramène sous le deuxième balai.

Le deuxième chemin qui s'offre à nous en partant de 10 est le trait plein qui nous amène à la bobine 10-10' inactive, mais qui sera le siège d'un courant dès qu'elle passera sous les pôles dont elle s'approche : de 10-10' nous allons à 4-4' par la touche 4 du collecteur. 4-4' est aussi une bobine inactive.

Nous arrivons ensuite à la bobine 11-11' dont un

des côtés (11) passe sous un pôle nord et l'autre (11') passe sous un pôle sud. Le sens du courant sera le sens du chemin que nous suivons comme précédemment.

11-11' est relié à 5-5' par la touche 5, cette bobine est parcourue par un courant de même sens que tout à l'heure et sa tension grandira. Nous passons ensuite à 12-12' dont la tension va s'additionner à celle que nous avons déjà, puis de 12-12' nous arrivons à la bobine 6-6' dont un des bouts est soudé à la touche 13 du collecteur sur laquelle repose notre deuxième balai.

Nous avons donc en résumé deux circuits distincts qui fournissent à la fois du courant au circuit extérieur.

Le premier circuit est constitué par les bobines :

3'-3, 9'-9, 2'-2, 8'-8, 1'-1, 7'-7, 13'-13.

Le deuxième circuit par les bobines :

10-10', 4-4', 11-11', 5-5', 12-12', 6-6'.

Ainsi qu'il est facile de le voir, toutes les bobines ont été utilisées et si on admet qu'elles se déplacent dans le sens indiqué par la flèche on voit que les mêmes phénomènes se reproduiront indéfiniment et que seuls les numéros des bobines faisant partie d'un circuit ou de l'autre changeront.

Enroulements série-parallèle. — Les enroulements *série-parallèle* imaginés par Arnold sont constitués par plusieurs enroulements série travaillant en parallèle. Ils présentent les avantages des enroulements série, c'est-à-dire répartition de chaque branche ou circuit d'induit sous tous les pôles et, par consé-

quent, équilibrage plus parfait au point de vue magnétique et électrique. Cet enroulement se prête à une grande quantité de solutions puisqu'on peut faire varier à volonté le nombre des circuits en parallèle. Il exige par contre une construction très soignée du collecteur et un bon contact des balais. Les divers enroulements série qui le constituent sont mis en parallèle par les balais; il faut donc pour qu'ils fonctionnent bien que le contact soit excellent avec le frotteur. Nous n'insisterons pas davantage sur ces enroulements, il suffit en somme de bien retenir les modes de formation des enroulements en parallèle et en série pour deviner tous les autres.

Enroulements à encoches. — On peut se demander comment on arrive à assujettir ces bobines à la surface du cylindre de fer doux. Avec les induits bipolaires à tambour on conçoit encore la possibilité de réaliser l'enroulement puisque les fils enserrant le cylindre en passant suivant un diamètre; au contraire les induits multipolaires exigent des bobines trop petites pour envelopper le fer doux, aussi un tel enroulement serait-il difficile à réaliser pratiquement.

Les constructeurs emploient aujourd'hui presque universellement des enroulements à *encoches*, c'est-à-dire qu'ils pratiquent à la surface du cylindre de fer doux une série de rainures dans lesquelles on encastre les bobines.

Ces rainures ont plusieurs avantages : d'abord l'enroulement se fait plus facilement, ensuite il est plus solide et les fils étant protégés ne risquent plus de se dénuder et de s'abîmer si l'induit vient à frotter contre les pôles des aimants ou des électro-aimants. Au point de vue magnétique, cette disposition a per-

mis de réduire l'*entrefer*, c'est-à-dire l'espace qui sépare le fer de l'induit des pôles des aimants. En réduisant le chemin qu'ont à faire les lignes de force on en accroît le nombre, car elles passent plus facilement et le rendement de la machine devient meilleur.

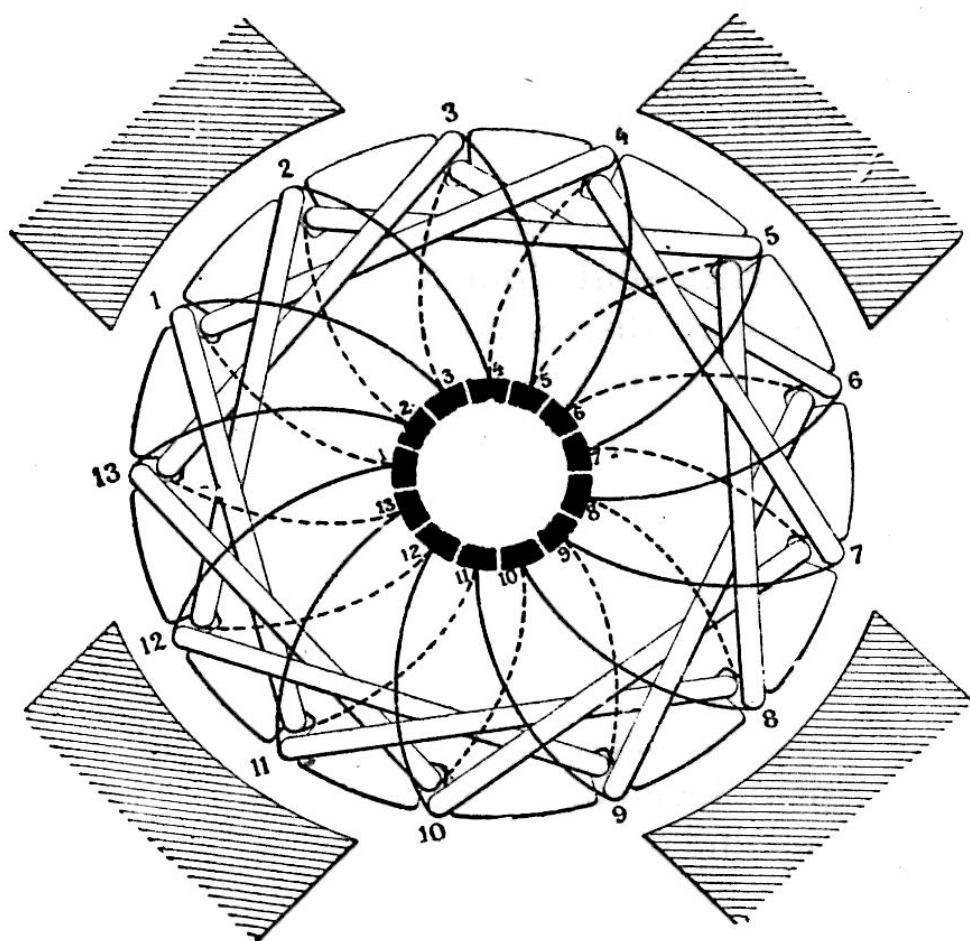


Fig. 27. — Enroulement à tambour en série et à encoches, comportant une encoche par bobines et une paire de balais.

Pour augmenter le nombre des bobines que l'on peut mettre sur un induit et mieux utiliser ainsi le champ magnétique, les constructeurs creusent des encoches assez profondes pour pouvoir y mettre deux bobines.

Généralement on place une première couche de

bobines qui viendront au fond des encoches et par-dessus une deuxième qui achève de remplir les rainures.

Naturellement il faudra deux dimensions différentes de bobines, car celles de la première couche sont nécessairement plus petites que celles de la deuxième qui les enveloppent.

On peut cependant se contenter d'une seule dimension de bobines en réalisant le bobinage de la figure 27 dans lequel chaque bobine occupe par un de ses côtés le bas d'une encoche et par l'autre le haut d'une autre, mais elles sont difficiles à emboîter et mieux vaut la première disposition.

On retrouvera dans la figure 27 toutes les bobines de la figure 26 reliées entre elles et au collecteur d'une façon identique.

Exemple de bobinage. — Prenons comme exemple le bobinage *en série* un induit-tambour de moteur Westinghouse à 4 pôles type de tramway. Cet induit comporte 95 encoches dont la profondeur est telle que l'on peut loger une première couche de bobines et au-dessus une deuxième couche (fig. 28).

On devine facilement que les bobines constituant la première couche seront plus petites que celles de la couche supérieure, car elles seront près du centre, on devra donc préparer 47 bobines petites et 48 grandes.

La première des petites bobines sera placée avec son fil d'entrée (peint en blanc) dans l'encoche n° 1 et son fil de sortie (noir) dans l'encoche n° 25. La seconde bobine dans les encoches 2 et 26, la 3^e dans les encoches 3 et 27 et ainsi de suite. En continuant ainsi comme le montre notre tableau de bobinage,

on voit que la 47^e et dernière petite bobine tombera dans les encoches 71 et 95 et que la première couche sera terminée.

Après empaquetage de cette première couche on disposera la seconde formée par les grandes bobines;

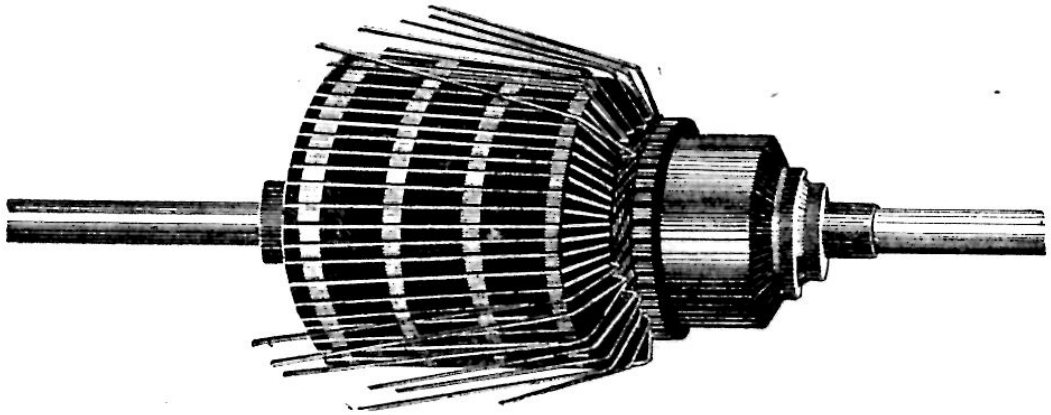


Fig. 28. — Induit à moitié bobiné.

la première (bobine n° 48) sera placée dans les encoches 72 (au fond) et 1 (en haut), la seconde en haut des encoches 73 et 2, la troisième en haut des encoches 74 et 3, etc., enfin la 48^e grande bobine ou 95^e bobine n° 95 dans les encoches 48 et 72, ce qui termine le remplissage.

Le tableau ci-dessous indique du reste d'une façon complète la façon dont s'effectue le bobinage.

Tableau de bobinage.

PREMIÈRE COUCHE		DEUXIÈME COUCHE	
1 ^{re} dans les encoches	1 et 25	48 ^e dans les encoches	72 et 1
2 ^e —	2 — 26	49 ^e —	73 — 2
3 ^e —	3 — 27	50 ^e —	74 — 3
4 ^e —	4 — 28	51 ^e —	75 — 4
5 ^e —	5 — 29	52 ^e —	76 — 5
6 ^e —	6 — 30	53 ^e —	77 — 6
7 ^e —	7 — 31	54 ^e —	78 — 7

8 ^e	dans les encoches	8 — 32	55 ^e	dans les encoches	79 — 8
9 ^e	—	9 — 33	56 ^e	—	80 — 9
10 ^e	—	10 — 34	57 ^e	—	81 — 10
11 ^e	—	11 — 35	58 ^e	—	82 — 11
12 ^e	—	12 — 36	59 ^e	—	83 — 12
13 ^e	—	13 — 37	60 ^e	—	84 — 13
14 ^e	—	14 — 38	61 ^e	—	85 — 14
15 ^e	—	15 — 39	62 ^e	—	86 — 15
16 ^e	—	16 — 40	63 ^e	—	87 — 16
17 ^e	—	17 — 41	64 ^e	—	88 — 17
18 ^e	—	18 — 42	65 ^e	—	89 — 18
19 ^e	—	19 — 43	66 ^e	—	90 — 19
20 ^e	—	20 — 44	67 ^e	—	91 — 20
21 ^e	—	21 — 45	68 ^e	—	92 — 21
22 ^e	—	22 — 46	69 ^e	—	93 — 22
23 ^e	—	23 — 47	70 ^e	—	94 — 23
24 ^e	—	24 — 48	71 ^e	—	95 — 24
25 ^e	—	49 — 73	72 ^e	—	25 — 49
26 ^e	—	50 — 74	73 ^e	—	26 — 50
27 ^e	—	51 — 75	74 ^e	—	27 — 51
28 ^e	—	52 — 76	75 ^e	—	28 — 52
29 ^e	—	53 — 77	76 ^e	—	29 — 53
30 ^e	—	54 — 78	77 ^e	—	30 — 54
31 ^e	—	55 — 79	78 ^e	—	31 — 55
32 ^e	—	56 — 80	79 ^e	—	32 — 56
33 ^e	—	57 — 81	80 ^e	—	33 — 57
34 ^e	—	58 — 82	81 ^e	—	34 — 58
35 ^e	—	59 — 83	82 ^e	—	35 — 59
36 ^e	—	60 — 84	83 ^e	—	36 — 60
37 ^e	—	61 — 85	84 ^e	—	37 — 61
38 ^e	—	62 — 86	85 ^e	—	38 — 62
39 ^e	—	63 — 87	86 ^e	—	39 — 63
40 ^e	—	64 — 88	87 ^e	—	40 — 64
41 ^e	—	65 — 89	88 ^e	—	41 — 65
42 ^e	—	66 — 90	89 ^e	—	42 — 66
43 ^e	—	67 — 91	90 ^e	—	43 — 67
44 ^e	—	68 — 92	91 ^e	—	44 — 68
45 ^e	—	69 — 93	92 ^e	—	45 — 69
46 ^e	—	70 — 94	93 ^e	—	46 — 70
47 ^e	—	71 — 95	94 ^e	—	47 — 71
			95 ^e	—	48 — 72

Une fois l'enroulement terminé, les bouts des fils des bobines qui ont été soigneusement numérotés avant l'enroulement et peints en noir et blanc comme

nous l'avons dit, sont soudés aux lames du collecteur d'une façon absolument analogue aux fils des bobines de l'enroulement représenté page 74.

Malgré la complication apparente de ces bobinages, ils se font avec sûreté et facilité si on a soin de procéder avec ordre et méthode.

Comme on le voit, le remplacement d'une bobine rûlée ou mise hors de service d'une façon quelconque peut se faire en quelques heures si on en possède de rechange, préparées d'avance; la seule opération un peu longue est la soudure des fils des bobines sur les lames du collecteur, cependant un ouvrier exercé et adroit arrive à souder assez rapidement tout un collecteur.

CHAPITRE II

CONSTRUCTION PRATIQUE DES INDUITS LES INDUCTEURS

1^o Arbre. — L'arbre d'une machine est une pièce cylindrique, en acier, qui sert d'axe aux parties en mouvement.

Dans les machines dynamos qui tournent généralement très vite et dont les induits sont quelquefois soumis à des efforts considérables, l'arbre doit être particulièrement soigné autant comme construction que comme qualité du métal.

On leur donne généralement la forme indiquée figure 29; pour cela le bloc d'acier qui servira à l'obtenir est d'abord travaillé sur le tour suivant le profil voulu, puis trempé et enfin rectifié à la meule dans ses parties frottantes, celles qui doivent s'engager dans les paliers destinés à le soutenir.

La partie AB est travaillée en vue de recevoir la poulie sur laquelle passera la courroie donnant le mouvement à la machine, cette partie tournée au diamètre intérieur de la poulie est ensuite fraisée (c'est-à-dire creusée en gouttière) comme le figurent nos hachures en vue d'assurer le clavetage de la poulie.

On voit ensuite une région cylindrique BC, c'est la partie qui traversera un des paliers supportant l'induit, on devra la rectifier à la meule après la cémentation (1) afin de l'amener au diamètre exact du cou-



Fig. 29. — Arbre de machine dynamo-électrique.

sinet (il ne faut pas songer à effectuer cette opération avec les outils de tour qui ne pourraient mordre sur du métal trempé).

Un épaulement C sert de butée et limite le jeu latéral de l'arbre dans le palier. Entre CD est un espace tronconique séparant l'induit du palier. L'arbre doit en effet avoir un diamètre plus grand au milieu afin de mieux résister aux efforts dus à la flexion.

L'induit proprement dit, c'est-à-dire le cylindre de fer doux et l'enroulement qu'il supporte, sont clavetés à la façon d'une poulie sur la partie DE qui a été creusée à la fraise à cet effet. EF est un filetage (pas de vis) sur lequel des écrous et contre-écrous peuvent se visser et immobiliser l'induit qui bute contre l'épaulement D.

FG est une partie cylindrique d'un diamètre plus faible que DE sur laquelle on fixera le collecteur à l'aide d'une petite clavette.

(1) La *cémentation* est une opération qui consiste à chauffer l'arbre en acier dans un four, en l'entourant de diverses matières, telles que le cuir, la suie, le charbon de bois, etc. Ce procédé a pour but de rendre la surface de la pièce en acier excessivement dure, ce qui lui assure une durée très longue.

Enfin en HI on ménagera une partie cylindrique qui sera rectifiée à la meule après la trempe en vue de l'amener au diamètre du coussinet et qui viendra se loger dans le deuxième palier supportant l'induit.

On fait quelquefois cette dernière *portée* (c'est ainsi qu'on appelle la partie d'un arbre engagée dans un coussinet) d'un diamètre plus faible que la première BC, en effet les efforts auxquels l'arbre devra avoir à résister sont plus grands à côté de la poulie, c'est-à-dire en BC que du côté opposé en HI.

Dans les grosses machines on loge la poulie AB entre deux paliers, cela permet de mieux équilibrer les efforts et on évite souvent de fausser l'arbre.

2° Noyau de fer de l'induit. — Nous avons vu, et les expériences de la page 16 nous l'ont montré, que la présence d'un noyau de fer entre les deux pôles d'un aimant avait pour effet de dériver toutes les lignes de force ou à peu près vers ce morceau de fer.

Grâce à cette curieuse propriété il a suffi d'enrouler les fils dans lesquels nous cherchions à faire naître un courant, autour d'une carcasse en fer, pour leur faire couper ensuite par la rotation toutes les lignes de force qui se dirigent vers le noyau de fer. Jusqu'ici nous avons supposé que ce noyau de fer était massif, mais, en pratique, la chose n'est pas possible, non pas qu'il soit difficile d'obtenir une carcasse en fer de la forme voulue, mais parce que, si nous faisons tourner rapidement une masse de fer doux ou de tout autre métal entre les pôles d'un aimant ou d'un électro-aimant, cette masse ne tarderait pas à s'échauffer et à devenir brûlante.

Quelles sont les causes de cet échauffement?

L'*hystérésis* d'une part, les *courants de Foucault* d'autre part.

Nous savons que, lorsqu'on aimante tantôt dans un sens et tantôt dans un autre un morceau d'acier ou de fer doux, ces métaux s'échauffent. Si l'on veut bien se rappeler l'hypothèse que l'on a faite sur les aimants (p. 26), par laquelle on les suppose constitués par une infinité d'aiguilles que l'aimantation oriente toutes dans un même sens, on comprendra que les rapides changements dans le sens de l'aimantation, qui se produisent quand le fer tourne entre les aimants, fassent constamment orienter ces aiguilles, tantôt dans un sens et tantôt dans un autre. Ces brusques mouvements à l'intérieur du métal l'échauffent et cela d'autant plus qu'il est moins doux, toutes choses égales d'ailleurs. On devra donc employer du fer le *plus doux* possible dans la construction des induits de dynamos.

La deuxième cause est plus grave et plus importante, elle est due aux courants de Foucault.

Foucault, savant français, avait découvert avant l'invention des dynamos industrielles, que si l'on fait tourner un disque de métal (l'expérience réussit très bien avec du cuivre rouge) entre les pôles d'un puissant aimant ou d'un électro-aimant, on éprouve une grande résistance pour le faire tourner et ce disque s'échauffe au point de devenir brûlant.

Que se passe-t-il dans le métal qui cependant ne frotte sur rien?

Quelque chose de bien simple pour nous qui sommes maintenant familiarisés avec la production des courants.

On peut en effet assimiler le disque à un conducteur qui coupe des lignes de force, et nous savons

que cela suffit pour qu'une force électromotrice s'y développe comme dans une pile.

Comme le disque a des dimensions plus grandes que nos conducteurs d'expérience, le courant se ferme à son intérieur, et en circulant il chauffe le métal absolument comme le courant de nos dynamos chauffe et porte au rouge blanc le filament des lampes à incandescence.

Si nous remplaçons le disque de cuivre par un disque de fer, il s'échauffera aussi, mais moins vite que le cuivre. Cela tient à ce que le fer offre une résistance plus grande au passage du courant que le cuivre rouge, qui est réputé, on le sait, comme un des métaux les plus conducteurs.

Pour diminuer ou même annuler cet échauffement, nous sommes conduits, puisqu'il faut faire tourner notre fer doux, à empêcher la production de ces courants parasites ou courants de Foucault dans le métal lui-même.

Quelques instants de réflexion vont nous montrer que l'on peut y arriver assez facilement.

Ces courants sont, en effet, produits par le déplacement d'un conducteur au travers de lignes de force. Coupons convenablement ce conducteur et le courant ne pourra plus passer, mais pour cela il faut savoir quelle est leur direction.

La règle des trois doigts appliquée aux enroulements précédents nous a montré que les courants circulent dans les conducteurs de nos divers bobinages d'arrière en avant ou d'avant en arrière suivant le sens de rotation ou suivant les pôles des aimants, l'observateur faisant face à l'aimant comme dans les figures précédentes.

Si donc nous coupons notre fer doux en tranches

minces perpendiculaires à cette direction, c'est-à-dire sous forme de rondelles, nous nous opposerons à la circulation des courants d'arrière en avant ou d'avant en arrière dans le fer, tandis qu'ils continueront à se produire dans le bobinage où ils nous sont particulièrement utiles et où nous pouvons les recueillir.

Voilà tout le secret de la construction pratique des induits. Afin d'avoir du fer le plus doux possible, on prend de la tôle douce de 4 à 5 dixièmes de millimètre d'épaisseur que l'on découpe à l'emporte-pièce en disques du diamètre voulu. Ces disques sont vernis à la gomme laque, de façon à ce qu'ils soient isolés les uns des autres, puis ils sont empilés, passés sur l'arbre et serrés comme nous allons le voir.

Quoique se touchant entre eux, les courants de Foucault ne pourront plus se produire, car le vernis isolant va s'opposer à leur circulation.

Souvent, au lieu de vernis à la gomme laque, on colle du papier mince qui joue le même rôle.

Généralement, ces disques sont découpés avec des dents dont le nombre a été prévu par le constructeur en vue de réaliser tel ou tel bobinage. C'est ainsi que pour le moteur Westinghouse de tramway, dont nous avons décrit l'enroulement en série à tambour et à 4 pôles, les tôles sont découpées avec 95 encoches. Comme c'est la même machine ou le même poinçon qui a servi à découper toutes les tôles, elles sont identiques et par suite superposables. En les enfilant sur l'arbre par le trou central découpé lui aussi en même temps, il suffira de mettre une dent en regard pour que toutes les autres le soient. Avec les toutes petites machines, surtout si on n'en construit pas un grand nombre à la fois, il vaut mieux faire découper plus ou moins grossièrement des disques de tôle, les

compresser fortement en les serrant dans un boulon et disposer le bloc ainsi obtenu sur le tour qui permettra de les égaliser toutes et d'avoir un cylindre bien rond. A l'aide d'une machine à fraiser, on pratiquera des rainures à la surface en nombre suffisant, on s'aidera pour cela d'un plateau divisé qui permettra d'obtenir un tracé régulier. Bien entendu ces tôles, si petites qu'elles soient, devront être isolées entre elles avec du papier ou du vernis.

Enfin on recommande, dans toutes les machines à induit denté, de passer une lime avec soin dans les rainures, une fois les tôles assemblées, afin d'enlever les bavures qui risquent d'abîmer l'isolant des fils ou même de faire toucher entre elles deux tôles consécutives, ce qui peut faire naître des échauffements.

Montage de l'induit sur l'arbre. — Il faut pouvoir remplacer l'arbre d'une dynamo, s'il vient à se rompre, sans que cela entraîne pour cela le renouvellement de toutes les autres pièces. En d'autres termes, l'induit et le collecteur doivent pouvoir s'enlever facilement, aussi a-t-on adopté, pour ces pièces, un montage tout à fait mécanique. Les tôles de fer découpées et isolées à l'avance, sont empilées les unes sur les autres et comprimées à la presse hydraulique afin de les aplatir complètement. On les enfile ensuite sur une pièce en fonte MN qui a la forme d'une poulie creuse dont une des joues M serait mobile, elle sert à laisser passer les tôles (fig. 30).

Une fois l'intervalle MN rempli de tôles dont les dents doivent être bien en regard, on place la joue M et on serre l'écrou K qui refoule la joue M et achève de comprimer les tôles.

Lorsque l'ensemble est bien serré on passe la poulie MN sur l'arbre dont le diamètre est calculé pour

la recevoir, elle bute contre l'épaule D de l'arbre et les écrous E et F qui se vissent sur l'arbre servent à l'immobiliser.

Une clavette ST a été prévue, elle empêchera l'induit de tourner sur l'arbre sous l'action des violents efforts qui peuvent s'exercer sur lui pendant le fonctionnement; à cet effet l'arbre et la poulie MN

ont été pourvus d'une rainure dans laquelle se loge la clavette.

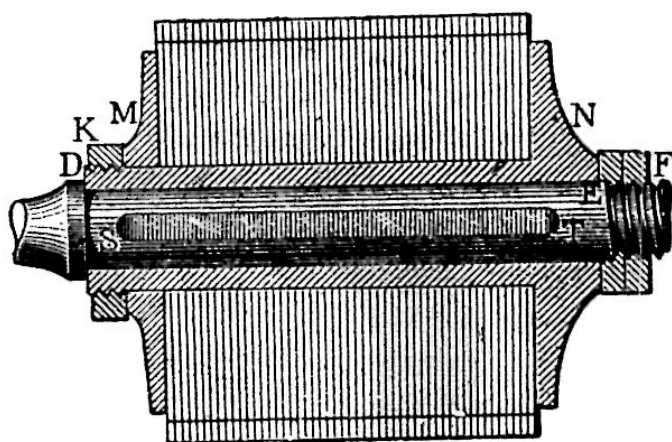


Fig. 30. — Montage des tôles dans une petite machine.

Pour démonter l'induit bobiné ou non, il suffit de desserrer les écrous EF et de pousser l'induit vers la droite, l'arbre étant main-

tenu fixe. La poulie MN glissera sur sa clavette et on pourra réparer soit l'arbre, soit l'induit.

Ce montage, avec quelques modifications de détail, est employé d'une façon générale par presque tous les constructeurs pour les petites machines jusqu'à 4 ou 5 chevaux environ. Pour des puissances plus grandes l'induit a un diamètre assez considérable; on pourrait conserver la même disposition, mais elle serait peu économique, car on aurait trop de fer inutilisé. En effet, il n'est besoin de fer qu'au voisinage des fils de façon à dériver, à aspirer pour ainsi dire, les lignes de force qui s'échappent des pôles en les forçant à les faire couper par les fils de l'enroulement induit. Pour cela une épaisseur de fer que l'on détermine exactement par le calcul,

mais qui est représentée pratiquement par 10 à 20 fois environ la profondeur des dents, est largement suffisante. On comprend dès lors qu'au lieu de découper des disques de tôle avec un trou intérieur légèrement plus grand que le diamètre de l'arbre, comme on le voit sur la figure précédente, on préfère employer des anneaux de tôle laissant un grand jour en leur milieu (fig. 31).

Dans les grands ateliers de construction où l'on

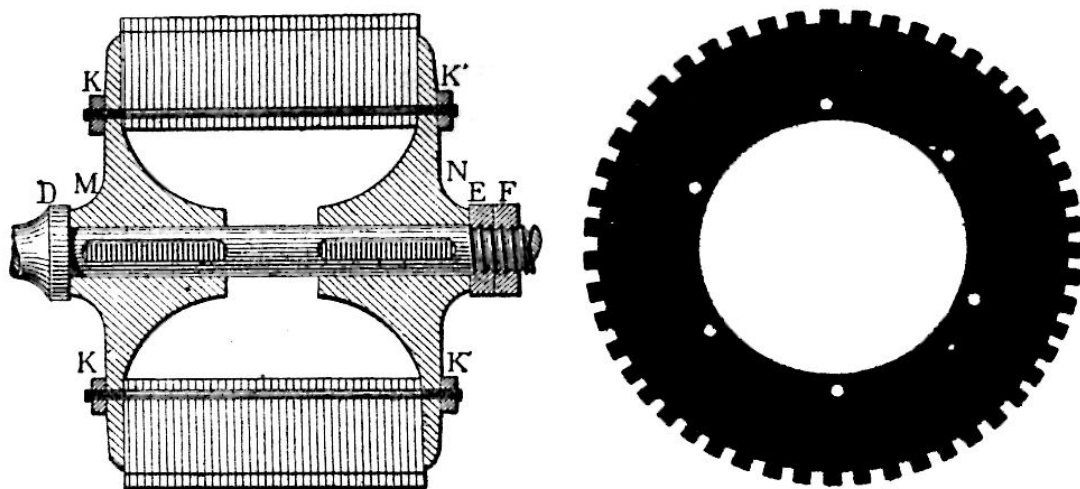


Fig. 31. — Montage des tôles dans une grande machine.

fait des dynamos de toutes puissances et de toutes dimensions, le vide central laisse au découpage un disque qui est utilisé pour faire des induits de machine plus petites; il n'y a donc rien de perdu comme on le voit.

On emploie toujours pour contenir les tôles une espèce de poulie MN dont une des joues, ici la joue N, est mobile et peut s'enlever. Six boulons KK' servent à rapprocher les joues MN lorsque les tôles sont placées entre elles. Pour avoir plus de solidité, en découpant les tôles on perce six trous correspondant aux 6 boulons; montant les tôles sur la poulie

MN, on les enfle sur les 6 boulons et comme les trous ont été découpés en même temps que les dents à l'aide d'un poinçon approprié on est sûr que les dents seront en regard. Lorsque les tôles sont empilées en nombre suffisant on applique la joue N et on serre les écrous K' des boulons, la joue mobile vient vers M sous l'action du serrage et comprime énergiquement les tôles.

La partie centrale reste vide; elle sert à assurer la ventilation. Dans les très grosses machines où l'échauffement par hystérésis, courants de Foucault, etc., peut être assez considérable, on assure le refroidissement en divisant les tôles en paquets formant autant de couronnes entre lesquelles des canaux sont ménagés pour la circulation de l'air.

Les écrous EF servent à serrer sur l'arbre le noyau induit formé par la poulie MN et les tôles. Comme précédemment, la butée D de l'arbre arrête le tout et une clavette TS empêche l'induit de tourner.

Bien entendu, dans la construction de tous ces induits les tôles sont isolées *avant le découpage* en collant à leur surface un papier fin ou en appliquant un vernis à base de gomme laque. Avec cette façon de procéder on est sûr d'avoir une surface uniformément recouverte après le découpage. Les machines très puissantes dont les induits ont plus d'un mètre de diamètre ne peuvent avoir leur noyau de fer pris dans une tôle d'un seul morceau, on découpe des demi-cercles, quarts de cercle, etc., et on les assemble ensuite sur la poulie MN à l'aide des boulons K en ayant soin de faire chevaucher les joints, c'est-à-dire en évitant qu'ils soient en regard. On peut, grâce à cela, assimiler l'ensemble à un bloc de fer doux formé de tôles d'une seule pièce.

Pour avoir un bon serrage beaucoup de constructeurs compriment les tôles à la presse hydraulique tandis qu'elles sont engagées entre les joues de la poulie MN, il suffit de serrer pendant la compression les écrous K pour que le serrage persiste quand on supprimera l'action de la presse.

Enroulement. — Nous avons examiné en détail le mode d'enroulement des induits, nous allons voir maintenant comment on le réalise d'une façon pratique.

Les bobinages en anneau ou en tambour bipolaire sont généralement enroulés sur place, c'est-à-dire sur le noyau même du fer de l'induit déjà monté sur l'arbre. Le fil employé est généralement du fil de cuivre rouge dont le diamètre est choisi convenablement de façon à ce qu'il puisse supporter sans s'échauffer d'une façon exagérée l'intensité du courant que doit fournir normalement la machine.

Un moyen simple et facile de s'assurer qu'un enroulement n'est pas trop chaud consiste à poser la main dessus; on admet, et la pratique montre que cette

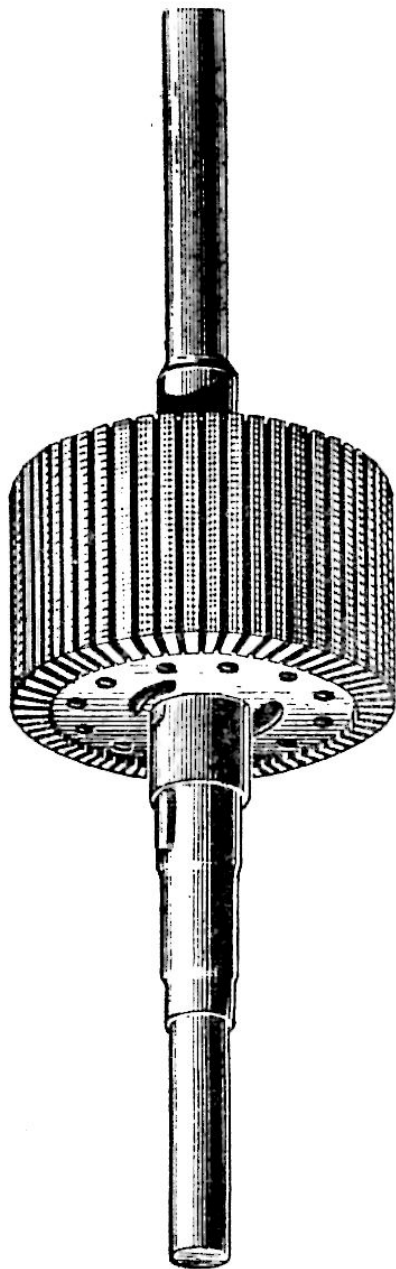


Fig. 32. — Induit denté prêt à être enroulé.

hypothèse est juste, que la température n'est pas préjudiciable à l'enroulement tant qu'on peut y maintenir la main appliquée. Bien entendu, il ne faut pas que la pièce soit en mouvement ou que l'enroulement soit parcouru par des courants à tension dangereuse. Dans ces cas l'expérience peut se faire aussitôt après l'arrêt, lorsqu'on est sûr qu'il n'y a plus aucun danger.

Le fil de cuivre est généralement isolé par une ou deux couches de coton sur lequel on passe au pinceau du vernis à la gomme laque.

On obtient ce vernis en mettant dans un grand flacon de la gomme laque ordinaire en feuilles et en versant au-dessus de l'alcool à 90°. Au bout de quelques heures la gomme laque commence à se dissoudre, on agite de temps en temps et si l'on a eu soin de mettre un excès de gomme laque on ne tarde pas à avoir un vernis épais, excellent pour les dynamos. On emploie aussi des vernis à la *bakélite*.

Le fil ainsi isolé n'est pas enroulé directement sur le fer de l'induit ou dans les encoches s'il y en a, on préfère recouvrir auparavant le fer de toile, ou dans le cas des induits dentés on dispose des rubans de toile spéciale, généralement *huilée*, dans les encoches de façon à éviter le contact direct du fer dont l'oxydation pourrait détériorer la faible couche isolante en coton du fil.

Une fois l'enroulement terminé, soit en anneau, soit en tambour, on passe au-dessus une ou deux couches de vernis épais, le plus souvent à base de gomme laque, qui se logera dans les interstices du coton des différentes couches en augmentant considérablement l'isolement des fils entre eux.

La pratique a montré que la présence de vernis,

et en particulier de vernis à la gomme laque, prolonge beaucoup la durée d'un enroulement et s'oppose à la désagrégation de l'isolant sous l'action des échauffements prolongés dont les machines sont souvent le siège. Le vernis appliqué en couche épaisse garantit aussi, dans une certaine mesure, les induits contre les accidents qui peuvent se produire lorsque des gouttes d'eau viennent à tomber sur une machine en marche. Si la tension que produit la machine n'est pas élevée, et si l'enroulement a été soigneusement verni les gouttes d'eau pourront ne pas amener la destruction de la machine. En effet, le rôle de la goutte d'eau est d'établir une communication entre des fils voisins; si elle arrive à imbiber les isolants dont ces fils sont recouverts, une étincelle se produit et enflamme l'enroulement. On comprend l'importance de l'imperméabilisation de l'isolant en particulier pour les moteurs de tramways qui peuvent recevoir de la boue, de l'eau ou même de la neige.

Les machines multipolaires comportent presque toutes aujourd'hui des enroulements à tambour dont les diverses bobines se logent dans des encoches pratiquées dans le fer comme nous l'avons vu.

Ces bobines n'occupant jamais plus d'un quart de la circonférence peuvent s'enlever et se poser avec facilité, cela a permis de les préparer d'avance en les enroulant sur un cadre en bois ou *gabarit* de forme appropriée.

Pour avoir un enroulement pouvant se manier facilement, le faisceau de fils constituant une bobine (fig. 33) est enveloppé d'un ruban de toile huilée qui lui donne l'aspect qu'ont nos bobines montées sur l'induit (page 69, fig. 25); seuls les deux bouts entrant et sortant dépassent.

Des bandes de toile également huilée ont été posées dans les rainures de façon à augmenter encore l'isolement et à éviter que l'enroulement soit écorché en frottant sur les aspérités que présente toujours le métal (fig. 34).

On donne souvent à ces enroulements le nom

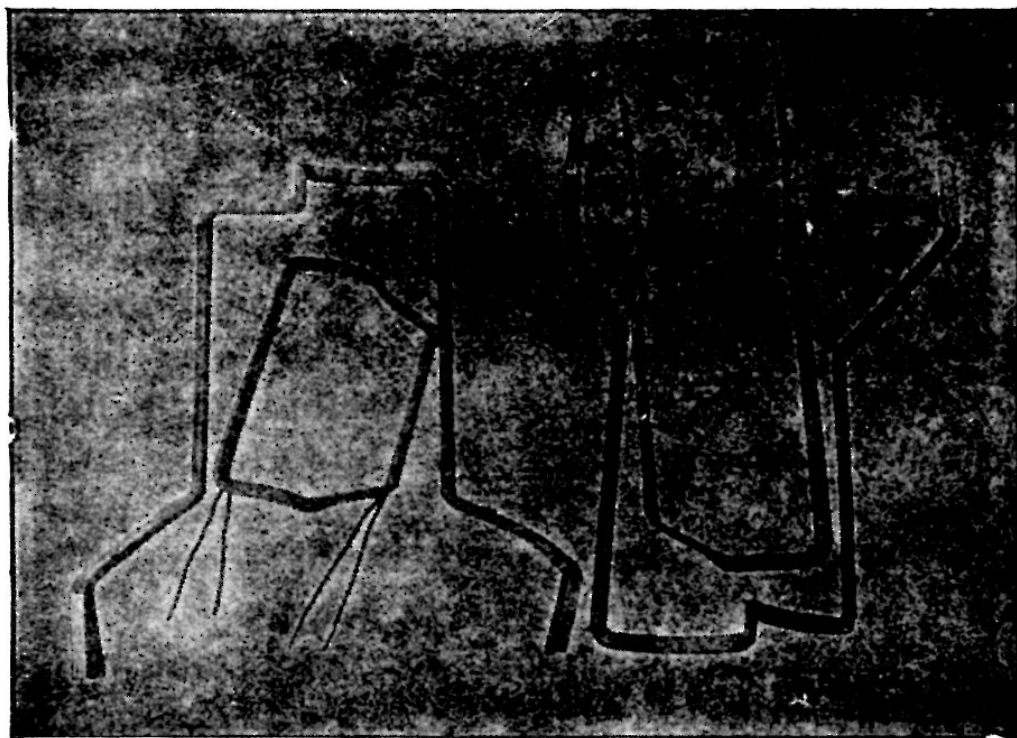


Fig. 33. — Spécimens de bobines préparées d'avance pour induits de dynamos.

d'enroulements en chignon à cause de la forme que prend l'induit après qu'il en a été recouvert.

Les puissantes machines multipolaires qui doivent fournir ou recevoir des courants intenses nécessiteraient des fils trop gros, qui ne seraient plus maniables et qui tiendraient trop de place à cause de leur forme ronde. On les remplace par des lames de cuivre offrant la même section au passage du courant, mais que l'on peut ployer plus facilement et introduire plus aisément aussi dans les encoches dont

elles peuvent occuper toute la place. On les isole avec un ou deux rubans de toile huilée et on réalise avec elles des enroulements analogues à ceux que nous avons indiqués.

Il y a cependant une remarque à faire à ce sujet. Tandis que nos bobines peuvent chevaucher les unes sur les autres, il devient difficile de faire croiser

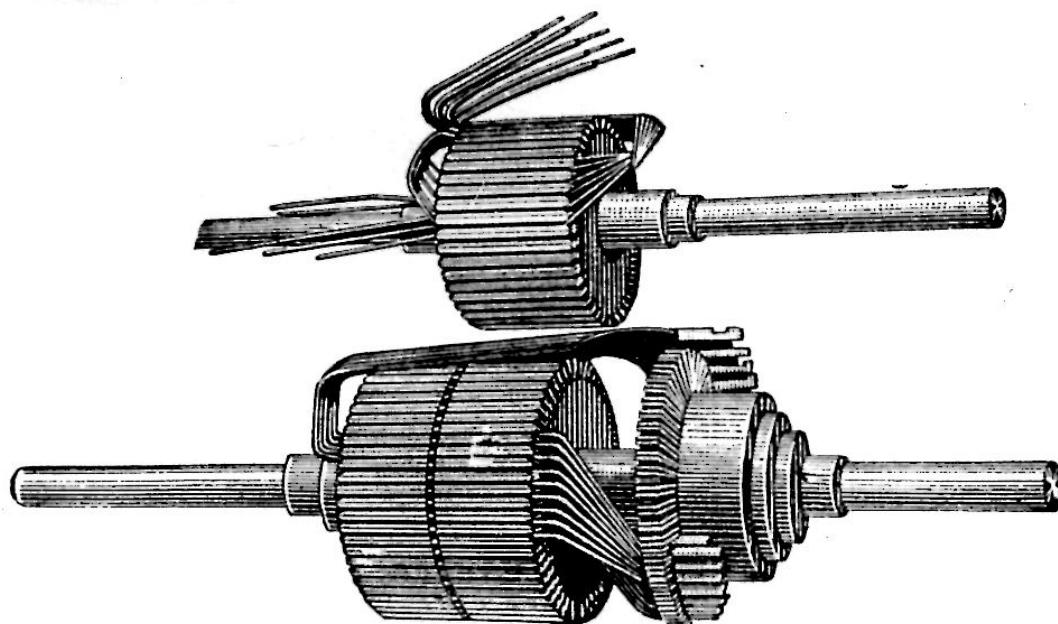


Fig. 34. — Vue d'induits pendant leur bobinage.

les barres; aussi, tout en conservant le même genre d'enroulement, on donne aux côtés des bobines qui vont d'une encoche à l'autre, la forme d'un V dont les deux branches aboutissent aux deux encoches que l'on veut relier. Le croisement avec la bobine suivante affecte la forme d'un W.

De cette façon, l'enroulement devient facile avec des barres pliées d'avance et on peut lui faire tenir très peu de place, avantage qui a son importance dans beaucoup de cas, en particulier pour les moteurs de locomotives électriques qui doivent se loger entre

les roues où la place est forcément limitée par l'écartement des rails.

Frettes. — Lorsque l'enroulement est terminé, il convient de le consolider, il sera en effet soumis lorsqu'il tournera aux effets de la force centrifuge qui tendront à faire sortir les bobines de leurs encoches, et cela avec des efforts d'autant plus marqués que la vitesse sera plus élevée.

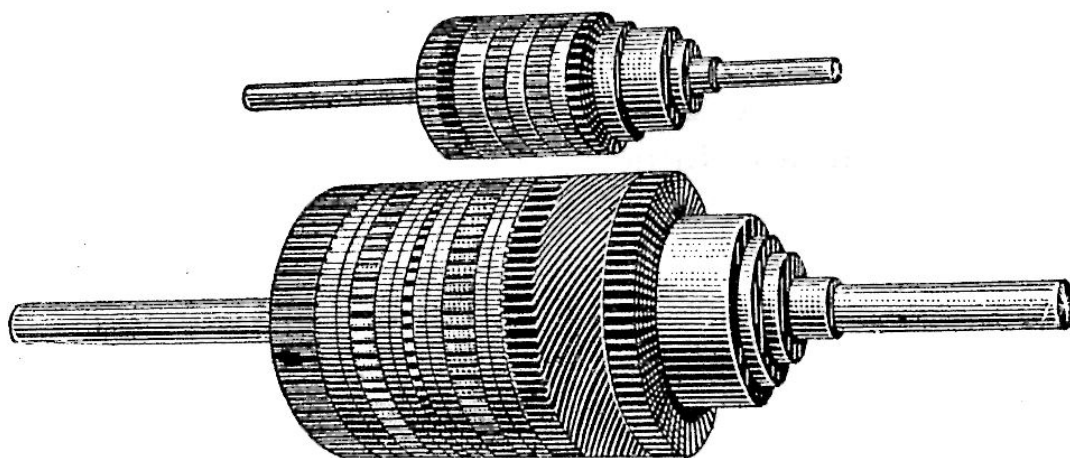


Fig. 35. — Induits terminés et frettés.

De tout temps, les constructeurs ont consolidé les induits en maintenant l'enroulement à l'aide de bagues auxquelles on a donné le nom de *frettes*. De nos jours on frette les induits de la façon suivante : on détermine d'abord l'emplacement de chaque bague ou frette sur l'enroulement (4 environ pour un induit de 20 cent. de largeur). On coupe des bandes de mica (1) de 2 centimètres de largeur pour de petits induits, plus larges pour de gros, on les pose sur l'enroulement en interposant une bande de toile et

(1) Le mica est une pierre incombustible et isolante qui se *clive*, c'est-à-dire se laisse tailler en lames à la fois minces et souples, ce sont ces lames que l'on découpe.

on maintient le tout en place provisoirement à l'aide d'une ficelle.

Entre la ficelle et le mica, et de distance en distance, on passe de petites bandes minces de laiton étamé de 1 à 2 dixièmes de millimètre d'épaisseur dont les extrémités sont recourbées.

L'induit étant sur le tour on enroule à rangs serrés sur ces bandes de laiton et sur le mica un fil de laiton de quelques dixièmes de millimètre de diamètre en serrant le plus possible, de façon à constituer une bague de 10 à 15 millimètres de largeur.

On soude avec un fer à souder tous ces fils de laiton aux lames étamées, ce qui est facile; on rabat les extrémités des lames que l'on soude également sur les fils et la frette est terminée. Bien entendu, dès que le premier tour de fil de laiton aura été fait on pourra enlever la ficelle et continuer à enrouler le fil qui retiendra à partir de ce moment le mica et les lames en laiton.

Remarque. — On ne doit pas souder les fils de laiton sur toute leur longueur, mais de place en place aux endroits où l'on a disposé des lamelles de laiton; sans cela les courants de Foucault pourraient échauffer les frettes. Les grosses machines ont des frettes plus mécaniques constituées par des colliers que l'on peut serrer à volonté à l'aide d'un verrou spécial.

3^o Collecteur. — Nous arrivons à la partie la plus délicate des machines, celle qui demande pour sa construction le plus de soins en vue de résister à de multiples causes de détérioration et d'usure.

Le collecteur, comme son nom l'indique, est l'organe qui sert à capter le courant produit dans la machine.

Nous l'avons représenté schématiquement jusqu'ici dans nos figures par un cylindre formé de lames conductrices isolées entre elles et communiquant

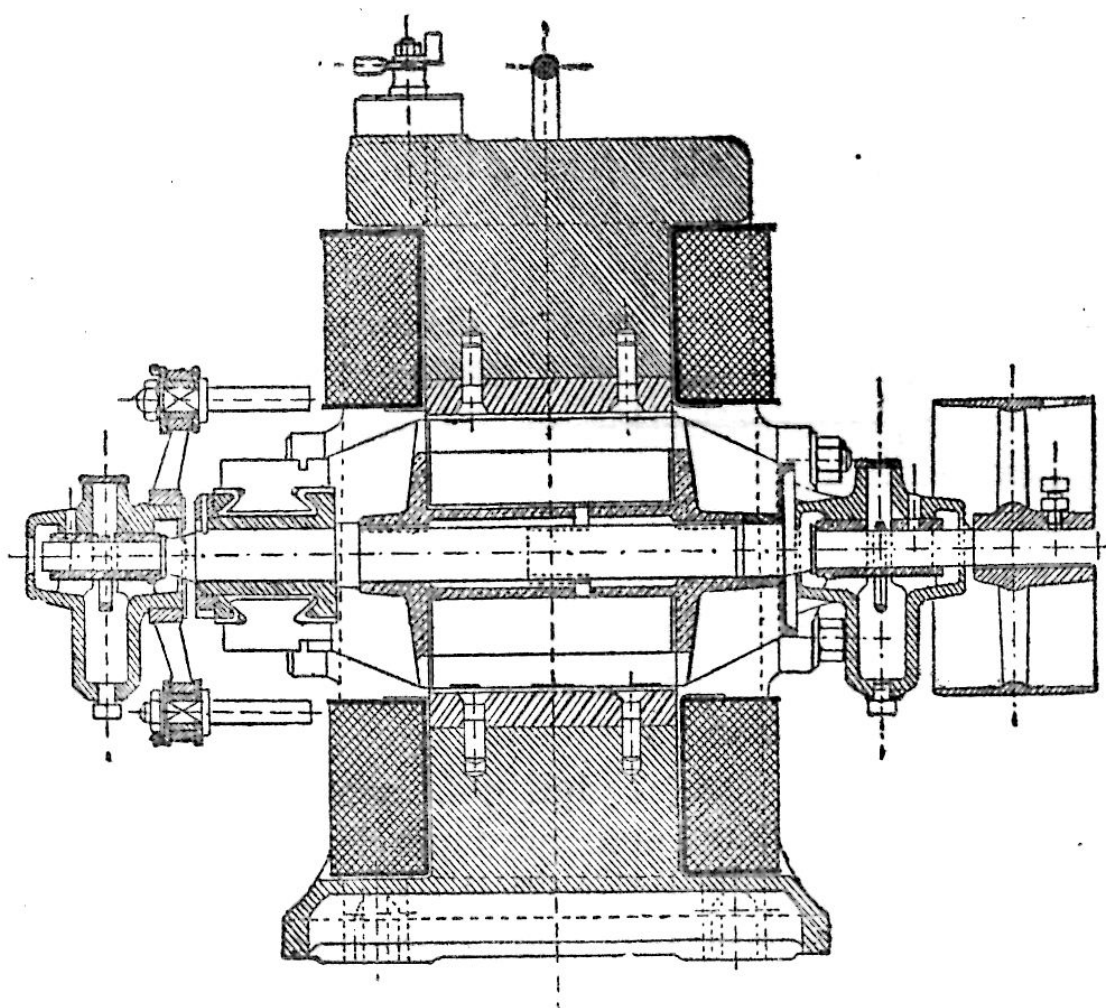


Fig. 36. — Coupe d'une dynamo à deux pôles;
vue du collecteur, des paliers et de l'arbre.

chacune avec le bout commençant d'une bobine et le bout finissant d'une autre.

Dans les premières machines, ces lames étaient maintenues d'une façon quelconque sur l'arbre et le démontage de l'appareil était souvent difficile.

On préfère aujourd'hui constituer la machine et en particulier le collecteur par des pièces assem-

blées mécaniquement et démontables ou interchangeables séparément.

L'arbre des dynamos présente en FG (fig. 37) une partie cylindrique sur laquelle on peut clavier

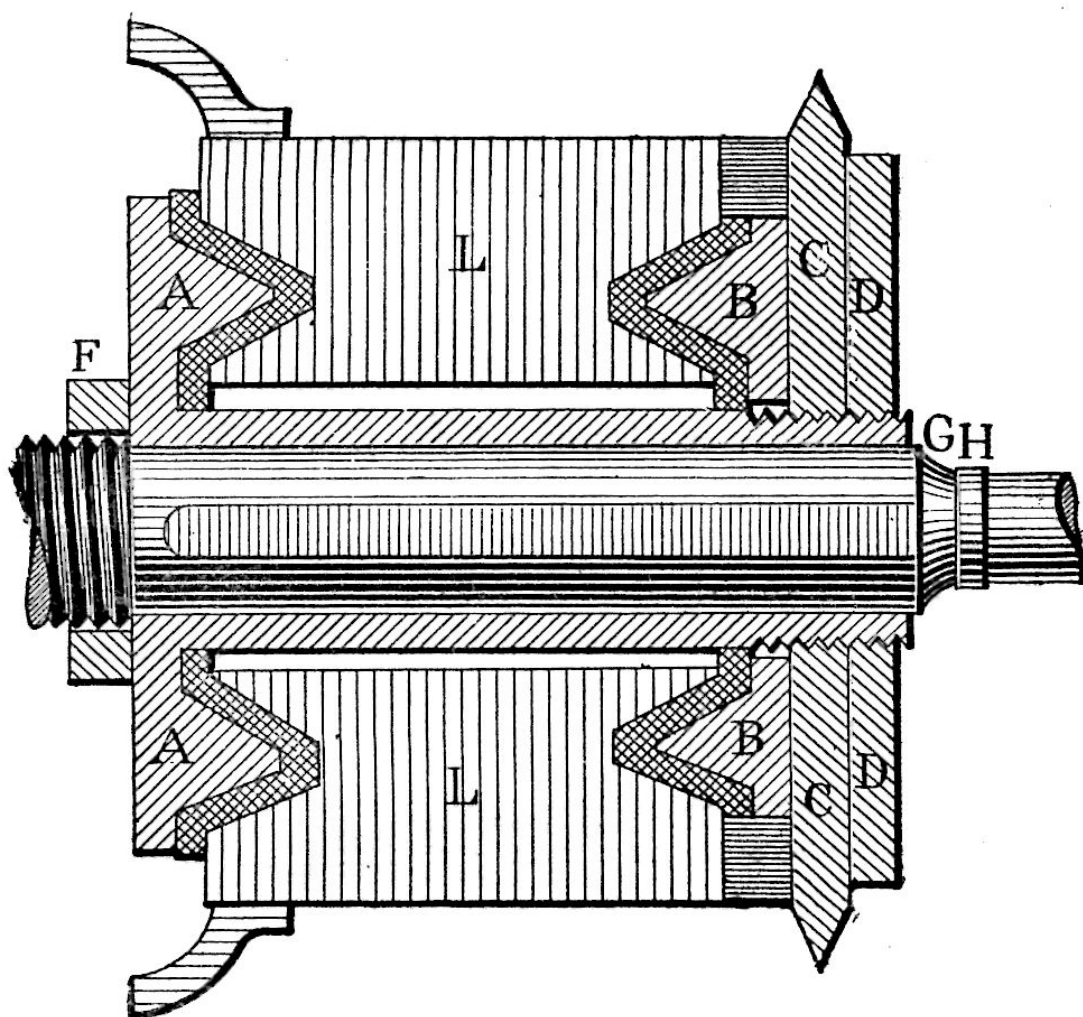


Fig. 37. — Coupe d'un collecteur.

le collecteur à la façon d'une poulie. Examinons comment est construite cette pièce.

Un tube en acier AA d'un diamètre intérieur égal à celui de l'arbre de la machine porte une joue découpée sur le tour d'une façon spéciale de manière à présenter un nez dont nous allons voir le rôle.

L'autre extrémité du tube est filetée extérieure-

ment (c'est-à-dire porte un pas de vis) et sur ce filetage vissent deux écrous C et D, dont l'un, D, sert de contre-écrou.

Une rondelle B découpée sur le tour suivant un profil analogue à celui de A est passée sur le tube et peut venir vers A lorsqu'on la chasse en vissant les écrous C et D. Enfin, des lames L, qui ne sont autres que les lames du collecteur que l'on a découpées dans un cylindre de cuivre dur tourné suivant la forme de notre dessin (1), peuvent venir se loger entre les deux pièces A et B. Avant de serrer les écrous on interpose entre les lames des feuilles de mica qui serviront à les isoler l'une de l'autre. On place aussi entre les lames et les pièces A et B des rondelles isolantes en micanite, fibre ou ébonite que l'on a tournées convenablement de façon à ce qu'elles épousent des profils de ces pièces.

En serrant les écrous on fait pénétrer le nez A et B dans les parties rentrantes des lames L en y forçant les rondelles isolantes et on obtient un bloc excessivement compact et solide qui résistera aux efforts les plus violents de la force centrifuge. L'isolement des lames entre elles avec le mica est excellent s'il a été bien fait; on a proposé et employé le carton comprimé, la fibre vulcanisée et l'ébonite, mais tous ces corps brûlent et se carbonisent sous l'action des étincelles qu'on ne peut éviter sous les balais, il en résulte que le charbon des balais ou les limailles métalliques provenant de l'usure viennent s'interposer entre les lames à la place de l'isolant qui a disparu. Ces corps

1) En Amérique et depuis peu en France on emploie des lames en cuivre dur étiré; découpées d'avance suivant la forme voulue, ces pièces sont donc interchangeables.

produisent des *courts-circuits*, c'est-à-dire des communications franches entre les lames, ce qui a pour effet de mettre les bobines hors de service en quelques instants.

L'amiante, corps incombustible, a été employée, mais elle n'est pas à recommander, car elle s'imbibe

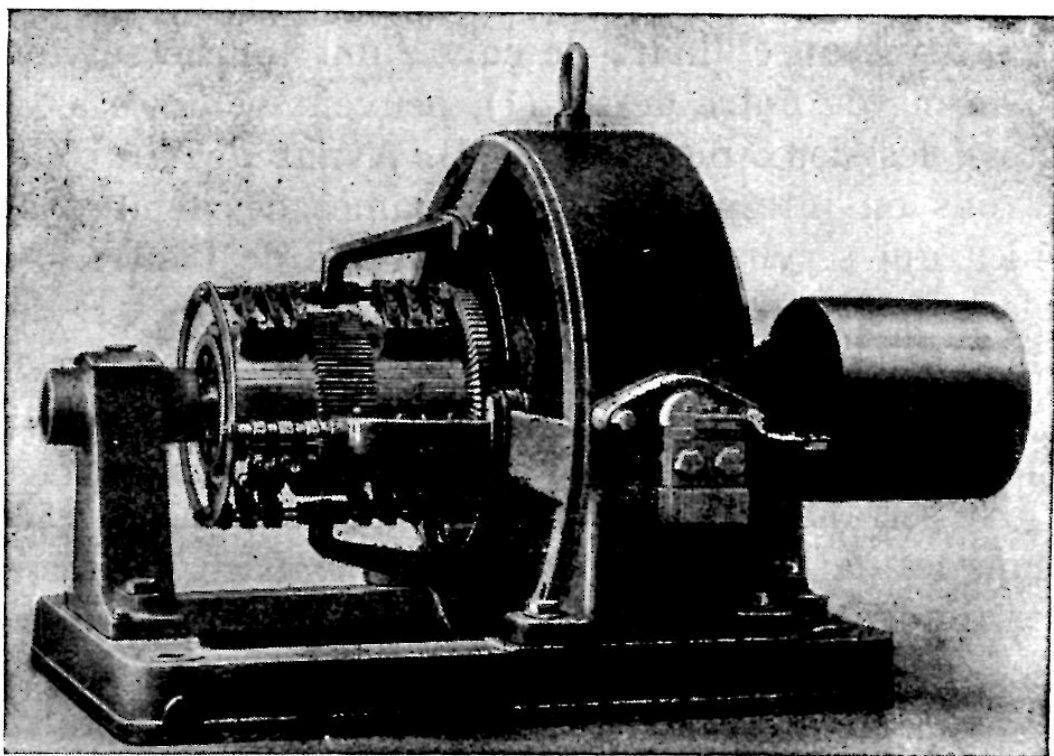


Fig. 38. — Machine à double collecteur pour galvanoplastie.

d'eau facilement et se désagrège bien plus vite que le mica.

Le mica ne s'obtient guère qu'en feuilles que l'on découpe facilement et qui se logent à merveille entre les lames, mais on ne peut le tourner comme la fibre ou l'ébonite, ce qui ne permet pas de l'employer entre les lames L et les pièces rentrantes A et B. Les constructeurs y sont arrivés cependant en agglomérant des débris de mica avec de la gomme laque; ils ont

pu obtenir ainsi un corps incombustible qui se tourne facilement et auquel on a donné le nom de *micanite*. On l'emploie de plus en plus aujourd'hui comme isolant et en particulier dans les collecteurs.

On remarquera que l'un des écrous C se termine par une partie effilée dont le but est d'éviter l'accès de l'huile sur le collecteur.

Pendant la rotation l'huile servant au graissage de l'arbre glisse le long de ce dernier, suit les écrous D et C et sous l'action de la force centrifuge gagne la partie effilée de l'écrou C; elle ne tarde pas à s'échapper en gouttes et ne peut plus venir sur les lames.

La présence d'un excès d'huile sur le collecteur donne lieu à de mauvais contacts au moment du passage des lames sous les balais, car c'est un corps isolant; des étincelles se produisent, elles brûlent et carbonisent l'huile, ce qui salit et détériore le collecteur; on doit donc éviter à tout prix qu'il puisse en arriver sous les balais.

Les dynamos utilisées pour la galvanoplastie prévues pour débiter des courants très intenses sont pourvues de collecteurs spéciaux comme celui de la figure 38.

Ces collecteurs doubles ou triples comportent entre eux des ailettes destinées à favoriser le refroidissement des lames chauffées par le courant intense qui les traverse. Le montage est du reste le même que celui des machines ordinaires.

Soudures. — On a successivement employé pour raccorder les fils des bobines aux lames du collecteur, des vis de serrage, des boulons et aussi la soudure. Hâtons-nous de dire que l'emploi des vis est très mauvais, car si ces dernières permettent un

démontage rapide du collecteur, elles ont l'inconvénient de se desserrer en marche très facilement sous l'action des trépidations. La soudure donne au contraire de bons résultats, et d'une façon générale on peut dire qu'une soudure bien faite est en matière de construction électrique le meilleur moyen d'assurer un bon contact.

Les serre-fils, bornes, etc., doivent toujours être évités le plus possible, car, ou bien les vis qui les constituent se desserrent ou bien les fils qu'ils réunissent s'oxydent et ne tardent pas à être en mauvais contact. La soudure, au contraire, si elle a été *bien exécutée*, ne donne aucun ennui et conserve indéfiniment en contact intime les pièces qu'elle sert à réunir.

Il vaut mieux éviter de souder les fils sur les lames mêmes du collecteur; généralement aujourd'hui ces lames portent un prolongement recourbé, comme nous l'avons figuré sur le collecteur de la page 96 et comme on peut le voir sur la figure 39; c'est au bout de cette lame que l'on vient souder les fils des bobines.

L'extrémité de cette lame souvent recourbée en crochet, est étamée avec soin; on étame de même les fils à raccorder, puis on les introduit sous le crochet formé par la lame. A l'aide d'un fer ou d'une lampe

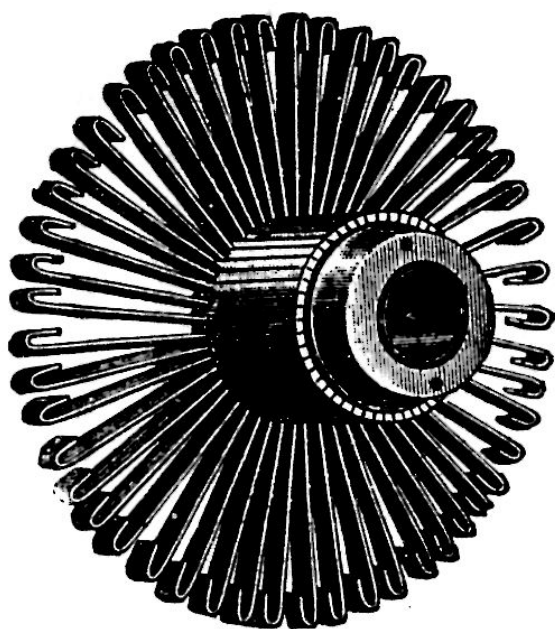


Fig. 39. — Collecteur non monté.

on chauffe l'ensemble en ajoutant un peu de soudure et quand le tout est bien noyé dans le métal fondu on laisse refroidir.

Le dessoudage des fils s'opère de même, on chauffe la soudure au fer ou à la lampe tandis qu'avec une pince on tire sur les fils en cherchant à ébranler la partie soudée; dès que la température de fusion est atteinte les fils se détachent facilement.

Remarque très importante. — Il est de la plus haute importance de n'employer comme décapant des pièces à souder que de la *résine*; le chlorure de zinc (esprit de sel décomposé comme on l'appelle vulgairement) avec lequel on prépare si facilement d'habitude une bonne soudure doit être *rejeté* et sous aucun prétexte on ne doit s'en servir dans des soudures électriques.

Trop souvent, malheureusement, des épissures (jonctions de fils entre eux)

exécutées sur des appareils électriques divers (transformateurs, alternateurs, etc.) ont été sans doute, par

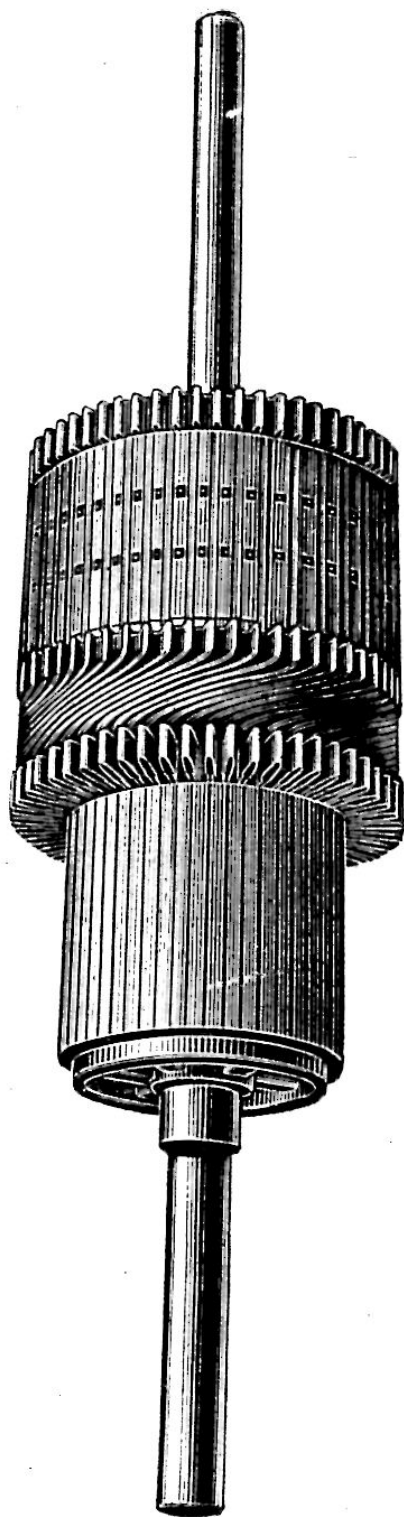


Fig. 40. — Induit de dynamo terminé avec son collecteur.

négligence dans la surveillance, soudées au chlorure de zinc; en quelques mois les fils étaient rompus et le travail était à refaire.

Cela tient à ce que le chlorure de zinc imbibe la couverture isolante en coton des fils; ce corps est déliquescent, c'est-à-dire qu'il absorbe l'humidité de l'air et par suite ne sèche jamais complètement; il attaque le cuivre, le ronge et le fil se casse; on voit en effet ces fils se recouvrir de vert-de-gris au bout de très peu de temps.

Le chlorure de zinc est de plus un corps très conducteur qui peut et qui a occasionné des courts-circuits en imbibant les enveloppes de coton qui servent à isoler les fils entre eux.

La résine, au contraire, est un excellent isolant; elle décape aussi bien les fils, et quand la soudure est terminée, il reste un enduit résineux peut-être un peu cassant, mais nullement corrosif.

La soudure à la résine exige cependant plus d'habileté de la part de l'ouvrier, mais on acquiert vite la pratique nécessaire.

A défaut de résine on peut employer la bougie qui est aussi un corps isolant devenant solide par refroidissement, mais elle attaque légèrement le cuivre en formant des stéarates de cuivre, en sorte que la résine est toujours préférable.

4° Balais et porte-balais. — Les balais sont destinés à frotter sur le collecteur en vue de recueillir les courants qui circulent dans l'induit lorsqu'ils ont été convenablement placés.

Les premiers balais étaient constitués par des pinces en fil de laiton que l'on venait faire appuyer sur le collecteur, de là leur nom. Aujourd'hui ces

balais ne sont plus employés; on en trouve peut-être encore sur d'anciennes machines, mais toutes les dynamos modernes et surtout les moteurs ne comportent que des balais en charbon, si tant est qu'on puisse appeler balais les blocs de charbon que l'on emploie maintenant, mais l'habitude a conservé l'ancien nom.

Ces balais, puisqu'on continue à les appeler ainsi, sont formés de pains en charbon aggloméré à la presse hydraulique comme le sont les crayons des lampes à arc, mais formés d'une pâte plus onctueuse au toucher. On y introduit en effet du graphite; certains constructeurs, même, transforment les pains de charbon en graphite au four électrique; mais peu importe, le but à atteindre est de n'avoir pas un frottement trop sec des balais sur le collecteur et l'on sait que le graphite est un très bon lubrifiant employé dans certains cas. Comme ce corps est de plus très bon conducteur de l'électricité, son introduction dans les balais en charbon produit un excellent effet. (Voir la remarque de la page 112.)

Une machine dynamo montée avec de bons balais en charbon peut, si le collecteur est parfaitement rond et si elle a été bien construite en vue de ne pas donner de fortes étincelles aux balais, fonctionner un grand nombre d'années avec le même collecteur.

Avec les balais en métal, le collecteur s'use rapidement, les balais laissent un sillon qui s'approfondit tous les jours davantage et au bout de peu de temps il faut tourner à nouveau le collecteur. Quand ce dernier a été trop souvent tourné, il faut le remplacer, opération coûteuse.

Les balais en charbon graphitique n'usent pas le collecteur, ils le polissent en s'usant avant lui, car ils

sont plus tendres. Les étincelles qui peuvent se produire brûlent le charbon et tout se borne là, tandis que ces mêmes étincelles fondent les balais métalliques en même temps qu'elles entaillent les lames du collecteur. La marche en avant ou en arrière peut être obtenue instantanément avec une machine munie de balais en charbon. Il faut au contraire retourner chaque fois les balais métalliques sur une machine qui en est pourvue si on ne veut pas les abîmer lorsque le collecteur tourne à rebrousse-pois.

Enfin, le balai en charbon durant bien plus longtemps que les balais en métal, l'entretien des machines ou des moteurs munis de ces balais est moins coûteux, en sorte qu'il y a une économie manifeste à les employer.

Les balais sont maintenus en place à l'aide de porte-balais.

Dans les premières machines et dans les petits moteurs, les porte-balais étaient fixés à demeure au bâti de la machine dans une position réglée d'avance par le constructeur.

Avec les grosses machines modernes on a reconnu qu'il était nécessaire de déplacer quelquefois le porte-balais pendant la marche, en vue de diminuer les étincelles qui se produisaient sur le collecteur.

Lorsque ces machines fournissent des courants très intenses la répartition des lignes de force qui s'échappent des pôles des aimants est un peu modifiée par le passage de ces courants dans l'induit, et telle position des balais qui allait bien lorsque la machine n'était pas chargée donne lieu à des étincelles à mesure que la machine fournit du courant; on est obligé alors de déplacer les balais et de chercher une nouvelle position avec laquelle il n'y a plus d'étincelles.

Pour faire cette manœuvre facilement on monte les balais sur des bras articulés autour d'un des paliers de la machine, et que l'on maintient en place à l'aide d'une vis de serrage (fig. 43).

Les anciens porte-balais pour balais métalliques étaient du genre de ceux représentés (fig. 41-1).

Le balai était passé dans un étui A, on l'y fixait en serrant la vis que l'on voit au-dessus. Cet étui A était monté sur une douille D pouvant tourner autour de l'axe du porte-balai, axe fixé lui-même soit au bâti de la machine, soit à un bras mobile.

Un ressort attaché à une vis maintenue dans une pièce faisant corps avec l'axe du porte-balai exerçait une traction sur l'étui porte-balai en tirant sur la pièce B qui en est le prolongement. Cette traction a pour effet d'appliquer les balais sur le collecteur comme on le voit facilement.

Beaucoup d'anciennes machines ont encore de ces porte-balais destinés à recevoir des balais métalliques. On peut cependant, sans rien y changer, leur adapter des balais en charbon à l'aide d'un dispositif simple, comme on va le voir, qui nous a donné d'excellents résultats.

On remplace le balai métallique par une pince formée d'une lame de laiton dont les dimensions sont exactement celles des anciens balais et qui se termine par une pièce en forme de C travaillée pour recevoir les pains en charbon que l'on trouve couramment dans l'industrie et en général chez tous les fabricants de balais en charbon. Une vis de serrage avec contre-écrou chasse le pain entre les bords de la pince où il reste fixé (fig. 41-2).

Ce système très simple permettra à chacun de transformer facilement toute ancienne machine, et

donnera de bons résultats comme il nous en a donnés, mais il faut pour cela que le collecteur soit tourné avant de lui adapter le nouveau porte-balai et que sa surface soit parfaitement lisse et bien ronde.

Les machines modernes comportant presque toujours des balais en charbon, chaque constructeur a créé son système de porte-balais; aussi on comprendra

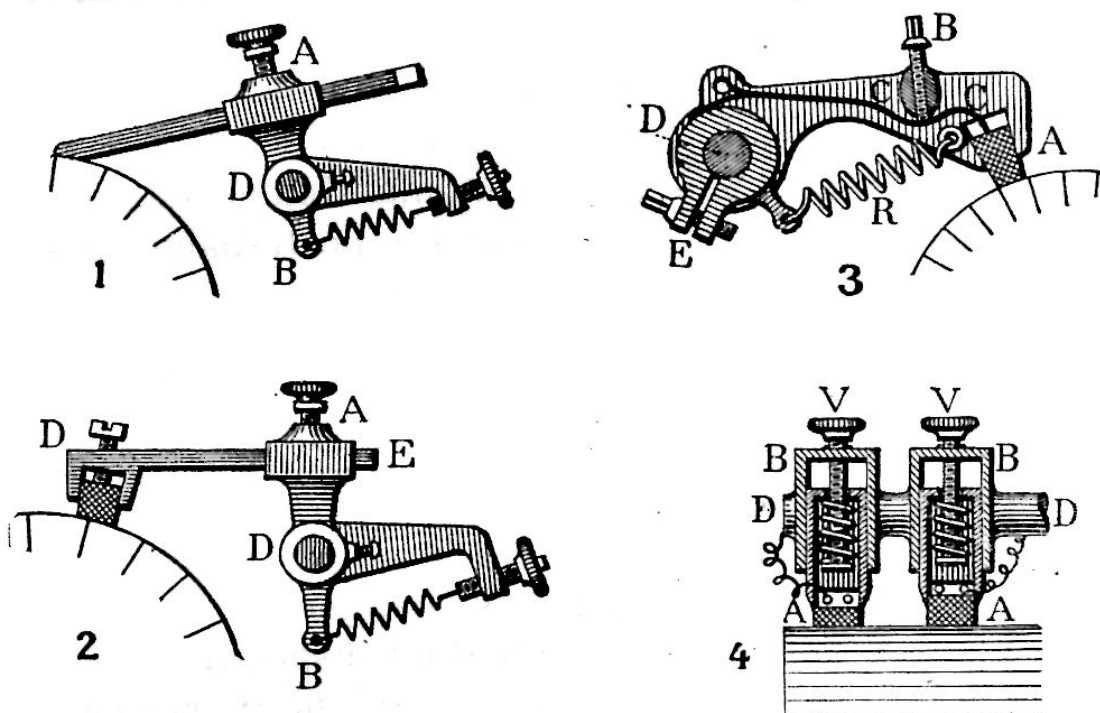


Fig. 41. — Systèmes divers de porte-balais.

qu'il serait plutôt long et fastidieux de les passer tous en revue dans cet ouvrage. Nous n'en retiendrons que deux que l'on rencontrera fréquemment et qui donnent d'excellents résultats.

Le premier (fig. 41-3) est le porte-balai Thury; il est constitué par une pince mobile CC autour de l'axe D du porte-balai, un pain de charbon a été glissé dans l'échancrure de la pince et il est maintenu appliqué contre les bords par un ressort à lame CC sur laquelle serre une vis B.

La pression du porte-balai sur le collecteur est réglée à l'aide d'un ressort à boudin R qui vient s'accrocher, d'une part, à la pince du porte-balai et, d'autre part, à la bague E fixée sur l'axe D.

Cette bague E est fendue et une vis permet de rapprocher les deux bords de la fente en serrant en même temps l'axe D du porte-balai.

On voit que l'on peut sans difficultés régler la ten-

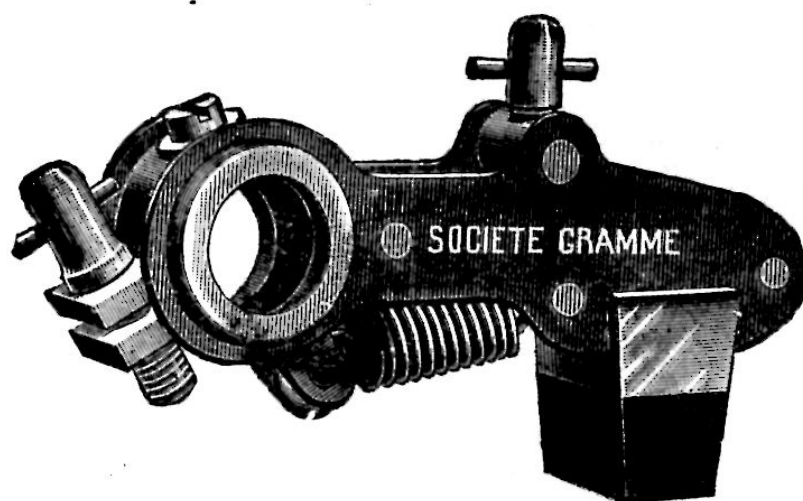


Fig. 42. — Porte-balai.

sion du ressort et la pression du porte-balai, rien qu'en tournant la bague E après avoir desserré la vis.

Le pain de charbon s'enlève aisément; il suffit de soulever le porte-balai avec le doigt, de desserrer la vis B et de dégager le pain A qui est coincé entre les bords de la pince; on en remet un autre avec la même facilité.

Ce porte-balai est très commode et M. Thury l'a employé sur toutes ses machines; suivant la puissance on en met 2, 3, 4, etc., jusqu'à 10 ou 12 même, sur l'axe D choisi suffisamment long.

La figure 42 représente un porte-balai analogue employé par la Société Gramme.

Le porte-balai (fig. 41-4) est plus simple, les pains de charbon AA sont fixés dans une boîte qui glisse dans une rainure BB. Un ressort à boudin pousse constamment ces balais vers le collecteur.

La glissière BB fait corps avec l'axe D du porte-balai qui la maintient solidement en place. On voit que cette disposition se prête mieux que toute autre

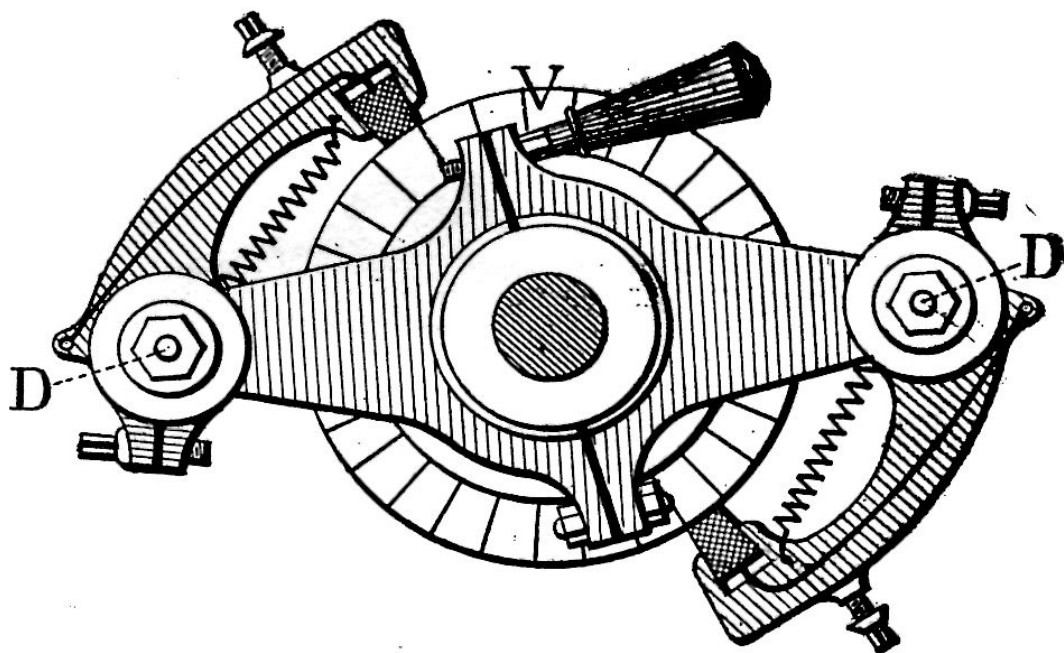


Fig. 43. — Vue d'ensemble des porte-balais montés.

à la marche du collecteur dans n'importe quel sens; de plus, même avec un peu de *faux-rond*, le balai fonctionne tout de même, car il suit docilement la courbure du collecteur. Les vis VV servent à régler la pression et à compenser l'action de l'usure du charbon.

Remarque. — Le courant recueilli par les balais sur le collecteur cherche à gagner l'axe D du porte-balai sur lequel on fixe généralement les câbles destinés à transmettre ce courant aux appareils d'utilisation (lampes, moteurs, etc.).

Il semble à première vue que ce passage soit facile, car le porte-balai paraît être toujours en contact parfait avec son support.

En réalité, il est loin d'en être ainsi, l'axe D est souvent légèrement graissé pour diminuer les frottements; or, la couche d'huile qui le recouvre est très mauvaise conductrice et le courant ne pouvant passer par cette voie cheminera à travers le ressort qui établit à ce moment la meilleure communication.

Le ressort ayant généralement une section trop

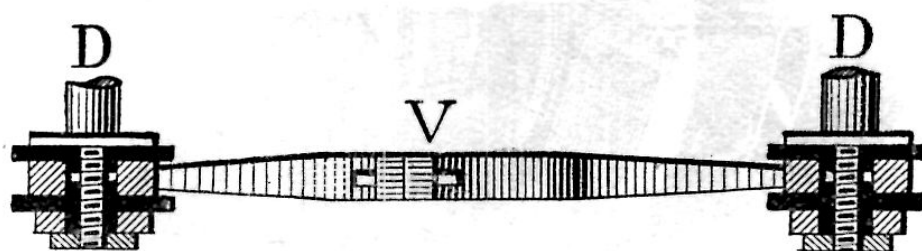


Fig. 44. — Coupe montrant l'isolement des axes des porte-balais.

faible pour le courant qui le traverse, il s'échauffera.

Cette élévation de température suffit pour faire changer les propriétés mécaniques du métal, le ressort se détend et le balai ne presse plus aussi bien sur le collecteur.

Pour remédier à cet inconvénient sérieux, les constructeurs soudent un fil souple par une de ses extrémités sur la partie mobile du porte-balais, et par l'autre sur l'axe D. Ce fil souple étant en cuivre rouge choisi de section suffisante, tout le courant le traversera sans l'échauffer, et le ressort restera à l'abri.

Sur la figure 41-3, le fil souple est remplacé par une lame mince de cuivre rouge appliquée le long du ressort CC, le courant traverse cette lame plutôt que

le ressort à cause de sa plus grande conductibilité.

Sur la figure 41-4, on voit très bien le fil souple reliant les balais A à l'axe D.

Les axes porte-balais au nombre de deux sur les

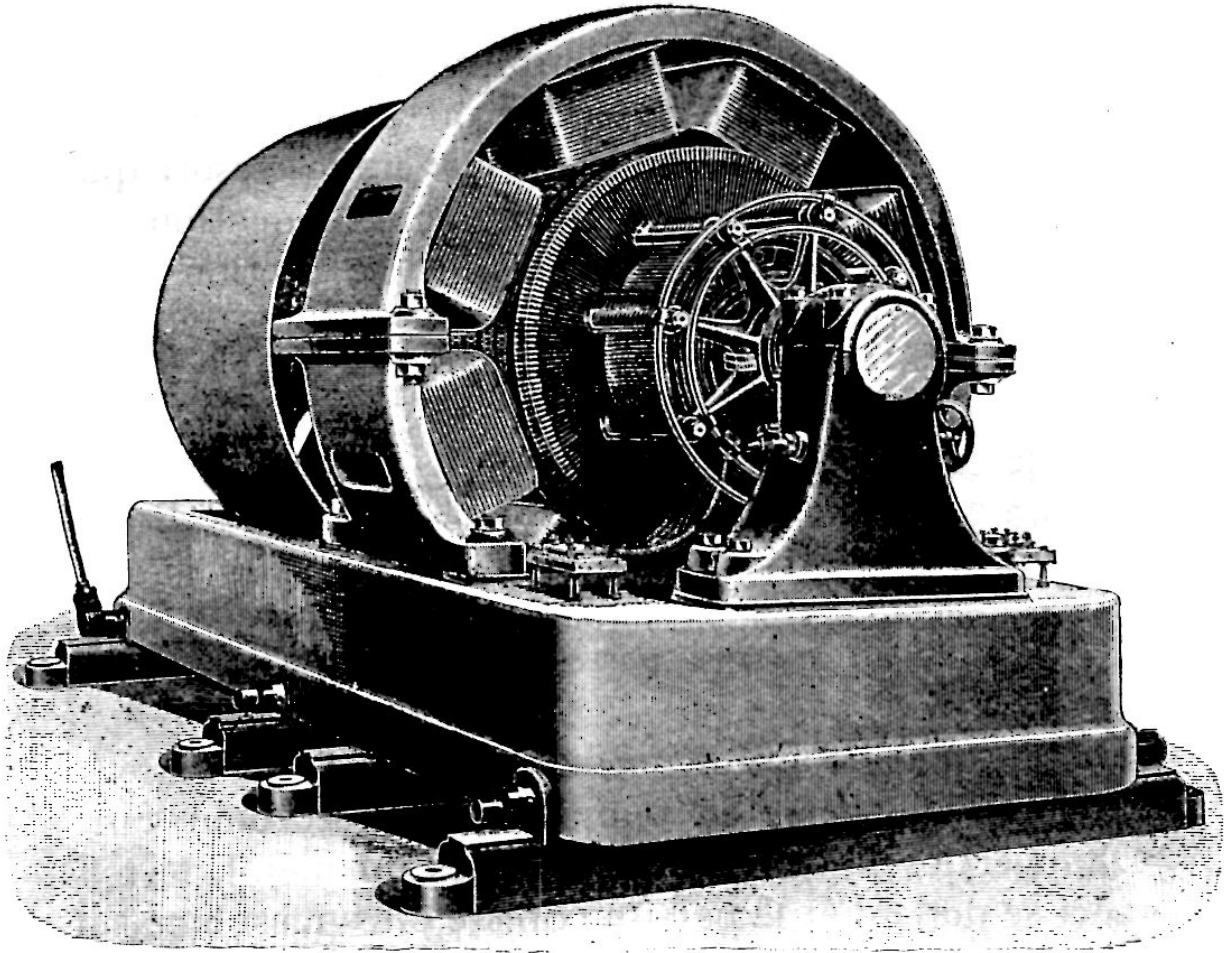


Fig. 45. — Vue d'une dynamo multipolaire montrant le montage des balais.

machines bipolaires, sont fixés sur un bras métallique à l'aide de boulons comme on le voit figure 43, mais ils en sont soigneusement isolés au moyen de rondelles en fibre vulcanisée (1) ou en micanite.

(1) La *fibre vulcanisée* est une matière généralement rouge qui s'obtient en comprimant de la fibre de bois avec certains agglutinants, c'est un corps isolant qui se travaille facilement, mais qui est très sensible à l'humidité.

Ce bras peut tourner autour du palier, mais on peut l'arrêter dans une position quelconque en serrant la vis V. Avec les machines multipolaires à enroulement en quantité, pour lequel on a autant de balais que de pôles, on dispose autant de bras rayonnant autour de l'axe de la machine, et sur chacun on boulonne une ligne de balais. La figure 45 représente une dynamo à huit pôles sur laquelle on distingue nettement les bras porte-balais.

Remarque. — Les balais en charbon graphitique ne conviennent pas à *toutes* les machines, l'auteur a pu constater des cas pour lesquels ils donnaient de mauvais résultats, tandis que leur remplacement par des balais en charbon *plus résistant* améliorerait beaucoup le fonctionnement de la machine.

Pour certaines dynamos, en effet, la commutation ne se fait bien qu'avec des balais un peu résistants électriquement, le fait est bien connu aujourd'hui.

CHAPITRE III

LES INDUCTEURS

Dans les machines électriques, on appelle *inducteurs* l'ensemble des aimants ou des électro-aimants qui servent à produire le champ magnétique dans lequel se meut l'induit. Les toutes petites machines et d'autres plus grandes destinées aux phares utilisent des *aimants* qui sont évidemment avantageux en ce sens que le champ magnétique ne coûte rien à produire et que la machine donne du courant dès qu'on la fait tourner.

Si on n'emploie pas les aimants sur les machines un peu puissantes, c'est parce qu'ils ne fournissent pas un champ magnétique bien intense; on est par suite conduit à employer des induits volumineux, où il entre beaucoup de fil de cuivre, et le prix de revient de la machine se trouve de beaucoup augmenté. De plus, le réglage si facile du courant dans les électro-aimants permet de faire varier tout aussi aisément le champ magnétique qu'ils donnent et, par suite, la force électro-motrice de la machine qui en résulte. On est obligé d'y renoncer avec les

machines à aimant, ce qui rend leur emploi industriel presque impossible.

Machines magnéto-électriques. — Les machines utilisant des aimants portent le nom de *machines magnéto-électriques*. Ces machines sont employées aujourd'hui dans quelques applications où des sources puissantes d'énergie ne sont pas nécessaires, en particulier pour remplacer les piles pour l'allumage des gaz tonnants dans les moteurs d'automobiles, moteurs à gaz, etc.; elles servent de plus en plus aussi pour fournir le courant nécessaire au fonctionnement des sonneries des postes téléphoniques à la place des piles; en ce cas, c'est l'abonné ou la personne qui appelle qui fournit l'énergie nécessaire en tournant la manivelle d'une magnéto (nous disons *une magnéto*, parce que le mot machine est sous-entendu; pour la même raison, on doit dire *une dynamo*).

Dans toutes ces petites applications, on n'a besoin d'aucun réglage de la force électro-motrice, car il suffit qu'elle soit suffisante; il faut de plus avant tout de la simplicité; on conçoit donc que l'emploi des magnétos soit dans ces cas très avantageux.

Machines dynamo-électriques. — Nous savons que les courants électriques nous permettent d'obtenir des champs magnétiques autrement plus intenses que ceux que nous donnent les aimants.

Si nous introduisons un induit entre les pôles d'un électro-aimant dont le fil est traversé par le courant d'une source auxiliaire, pile ou magnéto, et si nous faisons tourner cet induit à une vitesse constante, nous obtiendrons entre les balais une force

électro-motrice beaucoup plus élevée que si nous répétions l'expérience avec un aimant de mêmes dimensions.

Cette force électro-motrice sera réglable, car si nous faisons varier le courant qui passe dans le fil de l'électro-aimant, nous la verrons varier aussi. L'induit coupera en effet plus ou moins de lignes de force, suivant que le champ magnétique sera plus ou moins intense, et nous avons vu que de là dépendait la valeur de la force électro-motrice.

On peut trouver que l'emploi d'une source auxiliaire complique singulièrement la machine et ne la rend pas indépendante, mais nous pouvons supposer que l'on emprunte à l'induit une partie du courant qu'il produit pour *exciter* ses inducteurs, c'est-à-dire pour leur faire fournir le champ magnétique nécessaire. Nous verrons plus loin à propos de l'*excitation*, c'est-à-dire de la façon de produire le champ magnétique, comment en pratique on arrive à ce résultat; qu'il nous suffise de savoir pour l'instant que le courant des électro-aimants est emprunté à la machine dans une proportion suffisamment faible pour ne représenter qu'une petite dépense, surtout dans les machines bien construites.

Circuit magnétique. — Dans un électro-aimant, nous avons en réalité deux circuits à considérer. Le premier, nous le connaissons bien, c'est le circuit électrique; il est constitué par la source, pile ou machine, et le fil enroulé sur l'électro-aimant auquel elle est reliée.

Le deuxième circuit est magnétique, c'est le trajet suivi par les lignes de force. Nous savons que ces lignes sortent du pôle nord de tout aimant ou de

tout électro-aimant, et rentrent par le pôle sud. Pour que le circuit soit complet, il faut qu'elles aillent du pôle sud au pôle nord à travers l'aimant ou l'électro-aimant, de même que dans la pile le courant va du pôle négatif au pôle positif à travers le liquide dans lequel baignent les pôles.

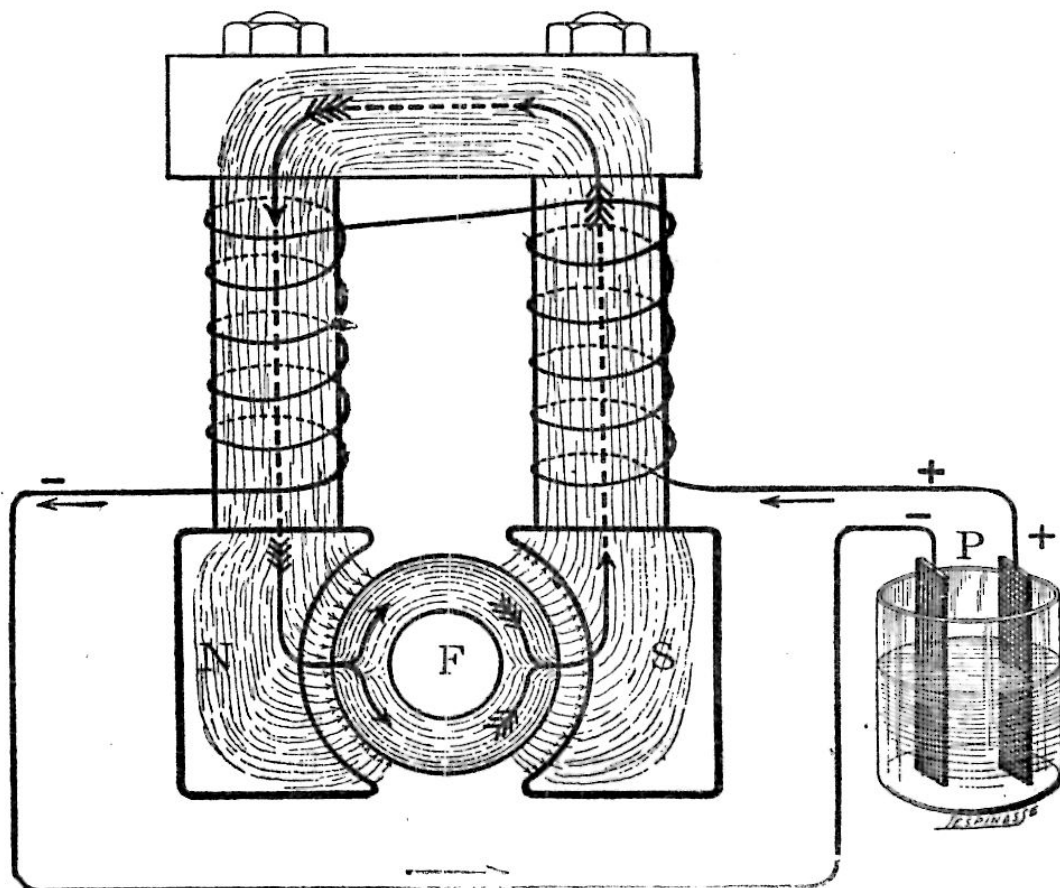


Fig. 46. — Circuits magnétique et électrique dans une dynamo.

La figure 46 montre nettement ces deux circuits.

NS est un électro-aimant en fer à cheval du genre de celui de la figure 12, mais de construction plus moderne. Sur les deux jambes verticales, on a enroulé un fil de cuivre recouvert de soie ou de coton relié à une pile P; c'est le circuit électrique.

Si nous suivons avec un peu d'attention le courant qui part du pôle positif de la pile, nous verrons qu'il

tourne autour de la jambe S dans le sens des aiguilles d'une montre, si on regarde par en bas; c'est le sens d'un tire-bouchon que l'on visserait. Nous savons que dans ce cas les lignes de force progressent comme la vis dans le bouchon; elles monteront donc dans la jambe.

Sur la jambe N, le courant tourne en sens inverse des aiguilles d'une montre, toujours en regardant par en bas; un tire-bouchon tournant comme lui avancera de haut en bas, c'est-à-dire que les lignes de force produites tendront à s'échapper par le bas où elles détermineront un pôle nord en N, tandis qu'on aura un pôle sud en S.

Entre ces deux pôles N et S convenablement arrondis, nous avons placé un induit que nous supposerons réduit à un anneau de fer doux F. Si, avec de la limaille, nous cherchions quelle serait la répartition des lignes de force, nous verrions qu'elles sortent de N en se dirigeant vers l'anneau de fer doux; une partie suit le haut de cet anneau, l'autre le bas, elles se rejoignent de l'autre côté, et rentrent dans le pôle sud S. Nous pouvons donc figurer à l'aide de grosses flèches le trajet des lignes de force; ce sera le circuit magnétique par analogie avec le circuit électrique.

L'étude du circuit magnétique dans une dynamo est très importante, car on peut souvent, en réduisant le plus possible la longueur de ce circuit, diminuer la dépense d'excitation.

Il faut en effet n'offrir aux lignes de force qui coûtent cher à produire qu'un trajet aussi court et aussi facile que possible; il faut surtout diminuer le parcours qu'elles auront à faire dans l'air, qui est pour elles un très mauvais conducteur. C'est pour-

quoï on fait aujourd'hui comme nous allons le voir des inducteurs gros et courts, et c'est pourquoi aussi on emploie des induits à encoches dont les dents passant très près des pôles sucent pour ainsi dire toutes les lignes de force et facilitent leur passage à travers l'induit.

Métal des inducteurs. — Nous avons vu page 24 que les électro-aimants s'obtenaient avec du fer très doux autour duquel on enroulait un fil de cuivre isolé.

Dans ces conditions on a une aimantation énergique, tant que dure le passage du courant, mais qui devient nulle ou à peu près lorsque ce dernier a cessé d'agir.

Le fer très doux s'obtient au forgeage, on pourra le façonner suivant telle ou telle forme qui devra cependant être aussi simple que possible si l'on ne veut pas augmenter outre mesure le prix de revient. L'électro-aimant inducteur que nous avons représenté (fig. 46) pour indiquer le circuit magnétique peut s'obtenir en trois pièces forgées, assemblées par des boulons. Les deux jambes d'une part, et d'autre part la pièce horizontale qui les réunit appelée *culasse*. Mais si cette forme a pu être fabriquée en fer doux forgé il n'en a pas été de même de beaucoup d'autres. On a eu alors recours à la fonte grise ordinaire qui paraissait avoir les propriétés magnétiques du fer doux et qui avait l'avantage de donner par simple coulée des machines des formes les plus diverses. On a dû l'abandonner et voici pourquoi.

La fonte grise ordinaire est vite *saturée* suivant l'expression consacrée et ne peut procurer des champs magnétiques aussi intenses que le fer doux, on dit

qu'elle est moins *perméable* que le fer. De même qu'une solution d'un sel est *saturée* quand elle ne peut plus dissoudre de ce sel, de même la fonte ou un inducteur est *saturé* quand il ne peut plus s'y former de nouvelles lignes de force en augmentant le courant d'excitation ou le courant qui circule dans les bobines. Un inducteur en fer doux de mêmes dimensions qu'un autre en fonte se sature aussi, mais à ce moment il laisse passer bien plus de lignes de force que la fonte, voilà pourquoi ce métal est plus avantageux.

On peut, il est vrai, avec la fonte, fournir à l'induit autant de lignes de force qu'avec le fer en employant un inducteur plus gros, mais cela oblige à adopter des dimensions trop grandes et le fil de cuivre qui est enroulé autour devient plus long et la machine plus coûteuse.

Ces dernières années, les recherches de divers industriels ont permis d'adopter un métal qui se coule presque aussi bien que la fonte et qui a la perméabilité du fer doux, ce métal c'est l'*acier doux* préparé par le procédé Thomas. Grâce à l'addition d'une très minime proportion de ferro-aluminium l'acier acquiert les qualités magnétiques du fer. On peut donc avoir avec lui des inducteurs perméables et faciles à construire. La coulée ne se fait pas cependant aussi facilement que celle de la fonte et on a eu bien souvent à déplorer la présence de boursoufflures dans les pièces fondues, cependant on l'emploie aujourd'hui d'une façon courante.

On admet que pour laisser passer un nombre donné de lignes de force on doit donner aux inducteurs en acier doux une section *moitié de celle qu'ils auraient* en fonte ordinaire.

Formes des inducteurs. — Il existe actuellement un nombre extrêmement grand de formes d'inducteurs et les analyser ici serait presque impossible. Nous nous contenterons d'en indiquer les principales, celles auxquelles il est facile de rattacher la plupart des dynamos que l'on peut rencontrer.

Inducteurs bipolaires. — 1^o *Type Edison.* — Les premières machines-dynamo construites en Amérique ont été établies suivant un type dessiné par Edison, aujourd'hui abandonné. Elles se composent d'un électro-aimant ordinaire dont les pièces polaires ont été creusées en vue de recevoir l'induit comme on le voit sur nos dessins (fig. 46 et 48-1).

Un des avantages de cette disposition était que l'on pouvait faire les inducteurs presque entièrement en fer doux forgé, ce métal permet, nous l'avons vu précédemment, d'obtenir des champs magnétiques plus intenses qu'avec la fonte. On peut, de plus, démonter facilement l'électro-aimant en desserrant les boulons qui fixent les jambes sur la culasse et enlever les bobines.

L'avantage du fer doux, si marqué autrefois, n'existe plus maintenant depuis que l'on fait des aciers doux coulés qui lui sont comparables comme qualités magnétiques. Ces anciennes machines deviennent alors plus coûteuse car le fer, pour être forgé, demande plus de travail que l'acier pour être coulé, aussi les a-t-on abandonnées. Si nous les avons citées c'est parce qu'on reconnaît vite en elles l'électro-aimant inducteur qui nous aidera à passer ensuite à des modèles plus compliqués.

2^o *Type Gramme supérieur.* — Renversons la machine Edison en mettant la culasse en bas et

l'induit en haut et nous aurons la machine Gramme, appelée type supérieur à cause de la position de l'induit qui occupe le haut.

Il a été construit un nombre considérable de ces dynamos et leur grande solidité les a rendues légendaires, aussi en trouve-t-on fréquemment encore des spécimens dans de nombreuses usines (fig. 48-2).

Au début, on les construisait en fonte ordinaire, ce qui conduisait à employer de gros inducteurs, c'est peut-être aussi ce qui a fait leur robustesse, car cela amenait à renforcer en proportion les autres parties de la machine. Aujourd'hui on n'emploie plus que de l'acier coulé, il en résulte que pour une même puissance les types sont plus petits et moins coûteux.

L'induit à anneau est toujours employé sur ces machines; il ne faut pas oublier, en effet, que c'est la maison de Gramme l'inventeur. La figure 47 donne une vue d'ensemble de cette machine qui disparaît aujourd'hui et qui n'a plus qu'un intérêt historique.

3^o *Type C.* — Les machines type C sont ainsi appelées à cause de leur forme qui affecte celle d'un C.

Couchons une machine Gramme sur le côté, supprimons les bobines sur les jambes, enroulons le fil autour de la culasse et nous aurons le type C qui a été très employé pour de petits moteurs (fig. 48-3).

On peut se demander si la position de la bobine sur la culasse n'est pas plus désavantageuse que l'emploi de deux bobines sur les jambes de l'électro-aimant comme dans les machines précédentes.

Il n'en est rien, si on veut bien se rappeler en effet que le rôle de la bobine est de créer dans le circuit magnétique un courant ou plutôt un *flux* de lignes de force sortant du pôle nord et rentrant par le pôle sud, on comprendra que, quelle que soit la place de

l'induit en haut et nous aurons la machine Gramme, appelée type supérieur à cause de la position de l'induit qui occupe le haut.

Il a été construit un nombre considérable de ces dynamos et leur grande solidité les a rendues légendaires, aussi en trouve-t-on fréquemment encore des spécimens dans de nombreuses usines (fig. 48-2).

Au début, on les construisait en fonte ordinaire, ce qui conduisait à employer de gros inducteurs, c'est peut-être aussi ce qui a fait leur robustesse, car cela amenait à renforcer en proportion les autres parties de la machine. Aujourd'hui on n'emploie plus que de l'acier coulé, il en résulte que pour une même puissance les types sont plus petits et moins coûteux.

L'induit à anneau est toujours employé sur ces machines; il ne faut pas oublier, en effet, que c'est la maison de Gramme l'inventeur. La figure 47 donne une vue d'ensemble de cette machine qui disparaît aujourd'hui et qui n'a plus qu'un intérêt historique.

3° *Type C.* — Les machines type C sont ainsi appelées à cause de leur forme qui affecte celle d'un C.

Couchons une machine Gramme sur le côté, supprimons les bobines sur les jambes, enroulons le fil autour de la culasse et nous aurons le type C qui a été très employé pour de petits moteurs (fig. 48-3).

On peut se demander si la position de la bobine sur la culasse n'est pas plus désavantageuse que l'emploi de deux bobines sur les jambes de l'électro-aimant comme dans les machines précédentes.

Il n'en est rien, si on veut bien se rappeler en effet que le rôle de la bobine est de créer dans le circuit magnétique un courant ou plutôt un *flux* de lignes de force sortant du pôle nord et rentrant par le pôle sud, on comprendra que, quelle que soit la place de

la bobine dans le circuit que nous appellerons *intérieur*, les lignes de force suivront toujours le chemin qui leur est offert par les inducteurs.

Le type C a l'avantage de ne pas exiger comme

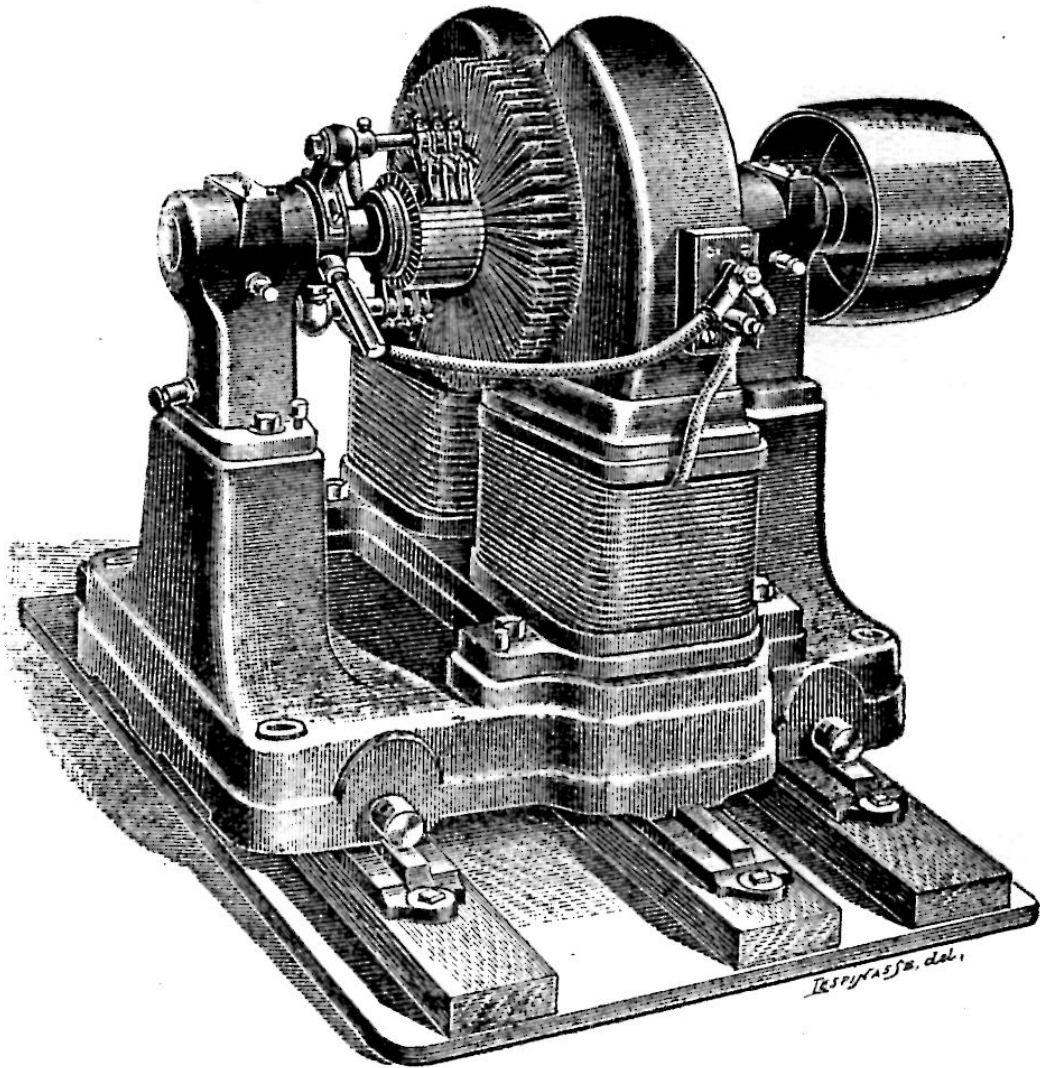


Fig. 47. — Dynamo bipolaire type supérieur.

dans la machine Gramme un induit placé à la partie supérieure de la dynamo, ce qui nécessite des paliers solides et peut donner lieu à des vibrations. Par contre, il ne convient qu'aux petites machines, car à mesure que les dimensions augmentent, la bobine unique qui sert à l'excitation devient de plus en plus

encombrante, aussi pour des puissances supérieures à deux ou trois chevaux adopte-t-on le type Manchester.

4° *Type Manchester.* — Créé par des constructeurs anglais, ce type a eu une certaine vogue et a

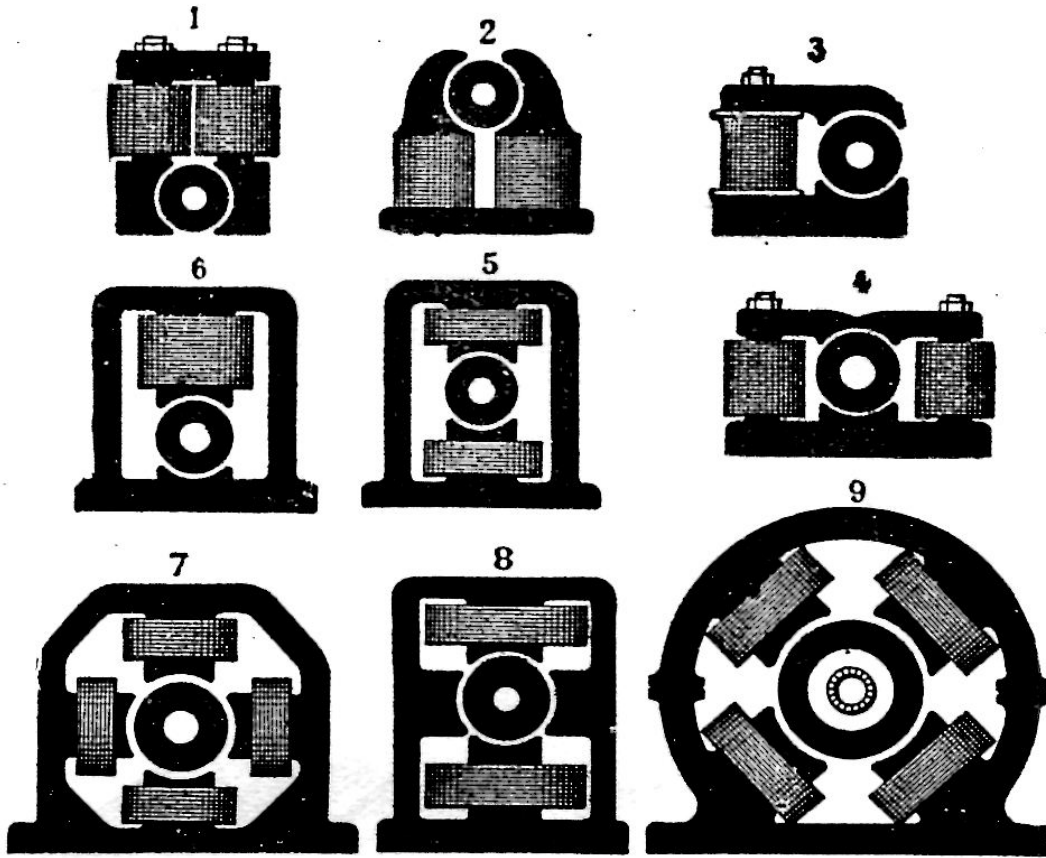


Fig. 48. — Principales formes d'inducteurs.

été construit ensuite par beaucoup d'autres maisons du continent.

Réunissons deux machines type C par leurs pièces polaires de même nom, de façon à envoyer dans le même induit les lignes de force qu'elles produisent, (fig. 48-4) et nous aurons le type Manchester.

Il est de toute nécessité que les deux bobines produisent des lignes de force allant à la rencontre les unes des autres, en d'autres termes il faut que l'on

ait, par exemple, deux pôles nord en haut et deux pôles sud en bas. Dans ces conditions, les deux courants ou les deux flux de ligne de force qui cheminent l'un vers l'autre se réunissent dans l'induit et reviennent ensuite vers leurs bobines respectives.

S'il en était autrement, si on avait par exemple un pôle nord en haut de l'une des bobines et un pôle sud en haut de l'autre, le flux de lignes de force irait du pôle nord de la première au pôle sud de l'autre sans traverser l'induit et la machine ne pourrait fonctionner, car rien ne passerait dans l'induit.

On devra donc au moment du montage d'une telle machine essayer séparément les deux bobines en s'aidant d'une petite boussole et en intervertissant les fils au besoin, jusqu'à ce que l'on ait deux pôles de même nom en haut et deux pôles de même nom en bas. Nous savons, en effet, que le sens du courant dans les bobines suffit pour déterminer deux pôles aux deux extrémités, on aura tel ou tel pôle en haut rien qu'en changeant le sens du courant, opération facile à faire.

Un inconvénient de ce genre de machines est qu'il faut avoir bien soin pendant la construction de mettre *autant* de tours de fil sur chacune des bobines. Si nous enroulons plus de fil sur une bobine que sur l'autre, nous aurons plus de lignes de force dans cette bobine; comme la bobine la plus faible ne pourra lui en opposer autant, l'excédent des lignes de force venant de la première bobine traversera le fer de la deuxième sans passer par l'induit, elles seront donc perdues pour ce dernier.

Cet inconvénient est facile à éviter, aussi avec une construction soignée les machines type Manchester ont donné d'excellents résultats. L'induit n'est pas

si haut placé que dans la machine Gramme, il en résulte qu'il vibre moins car il est mieux soutenu. L'ensemble de la machine est assez compact, toutes les pièces sont facilement accessibles et aisément démontables, mais comme les machines précédentes, leur construction trop coûteuse les a fait peu à peu abandonner.

5° *Types blindés.* — Toutes les machines que nous venons de voir sont fragiles en ce sens qu'elles

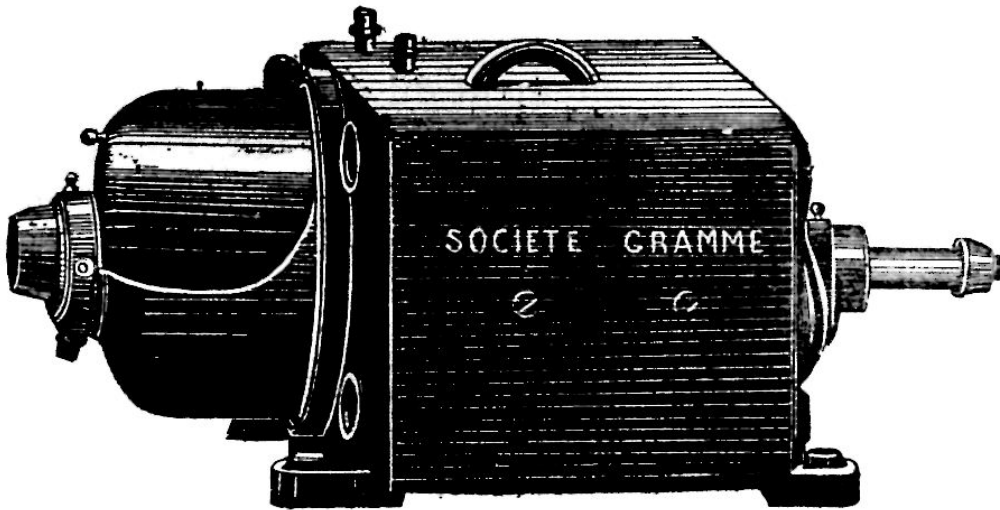


Fig. 49. — Dynamo blindée à deux pôles, fermée

présentent aux coups une des parties les plus vulnérables, c'est-à-dire les bobines.

Cet inconvénient est de peu d'importance lorsque la dynamo est soigneusement installée dans un local spécial, salle de machine ou cabine fermée, sous la surveillance d'un mécanicien.

Tout autre est le cas des petits moteurs électriques que l'on tend à employer de plus en plus dans les ateliers pour la commande des machines-outils au lieu et place des transmissions.

Dans ces conditions, les chocs ne leur seront pas épargnés, pas plus que les copeaux ou les limailles

qui pourront en s'engageant entre l'induit et l'inducteur amener la destruction de la machine.

Sur les tramways électriques le service des moteurs est aussi pénible si ce n'est plus. Exposés à la pluie, à la boue, placés le plus souvent sous la voiture entre les essieux, pouvant par suite frotter sur les objets divers laissés sur la voie, pierres, cailloux, ferrailles, les moteurs de tramways n'auraient pas la vie très

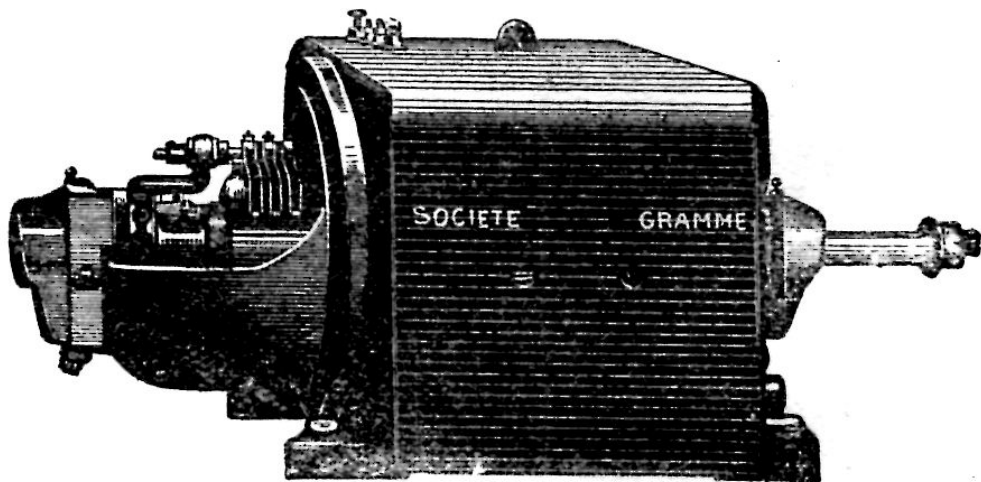


Fig. 50. — La même dynamo, collecteur découvert.

longue si on adoptait un des types que nous venons de voir, aussi a-t-il fallu créer des carcasses dites *blindées* dans lesquelles on enferme les pièces délicates de la machine (fig. 56).

C'est ainsi que les dynamos actuelles génératrices ou réceptrices se construisent beaucoup d'après le type 5 (fig. 48). On reconnaît l'induit qui occupe le centre et qui tourne entre deux pôles verticaux sur lesquels on a passé deux bobines qui les transformeront en électro-aimants. La culasse enveloppe la machine et protège les bobines contre les chocs, elle réalise on le voit un vrai blindage; la figure 51 représente une dynamo Harlé de ce type. On peut si on le

désire fermer, par un grillage ou par une partie en bronze, les parties avant et arrière, de façon à ne

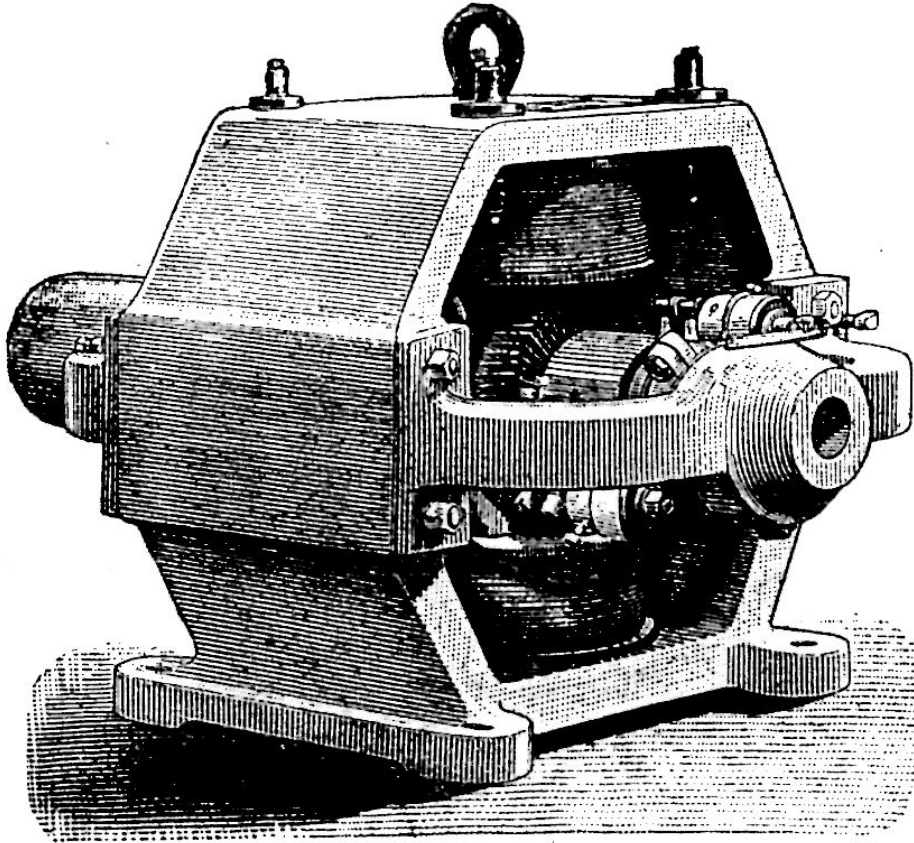


Fig. 51. — Dynamo à deux pôles.

laisser sortir que l'arbre et la poulie, on a ainsi un type très robuste et très protégé, tel que le moteur Gramme (fig. 49, 50 et 59).

6° *Type blindé à une bobine.* — Certains constructeurs ont supprimé la bobine du bas et ont raccourci le pôle sur lequel elle était montée. Ils ont rallongé le pôle supérieur en vue de lui adapter une bobine unique contenant autant de tours de fil que les deux bobines précédentes réunies.

On voit que, si par exemple, le pôle supérieur situé au-dessus de l'induit est un pôle *nord*, les lignes de force qui sortiront de ce pôle passeront par l'induit

et rentreront dans la carcasse de la machine par la pièce polaire du bas, qui leur offre le chemin le plus court, au point de vue magnétique. Cette pièce sera par suite un pôle sud comme dans les machines précédentes. La suppression de la bobine sur ce pôle n'aura donc rien changé au résultat, pourvu cependant qu'on ait mis sur la bobine unique un nombre de tours de fil représentant la somme des tours du fil que l'on avait sur les bobines précédentes.

Les avantages de cette disposition sont : une construction plus facile, car on n'a qu'une bobine inductrice à faire au lieu de deux et ensuite l'axe de l'induit étant plus près du socle, la machine est plus stable et risque moins de vibrer.

Nous pourrions étudier bien d'autres formes d'inducteurs qui ne sont que des modifications de ces deux dernières (5 et 6); c'est ainsi que beaucoup de constructeurs emploient le type 5 couché, les pôles sont horizontaux au lieu d'être verticaux (moteur, fig. 59 et 60), mais cela revient au même, on comprendra que nous nous en tenions là, car le lecteur après ce qu'il vient de voir saura lui-même retrouver le circuit magnétique et pourra sans peine le rattacher à un de nos exemples.

Inducteurs multipolaires. 7^o Type à 4 pôles. — Presque toutes les machines multipolaires ont leurs inducteurs fermés dans une carcasse en fonte formant la culasse commune des électro-aimants dont elles sont composées.

Le premier type que nous examinerons est le type 7 à 4 pôles qui est en somme dérivé du type 5 bipolaire. On a augmenté simplement la largeur de la machine blindée type 5 de façon à pouvoir ajouter

deux autres pôles horizontaux rattachés à la même carcasse. L'induit tourne alors entre 4 pôles, il est

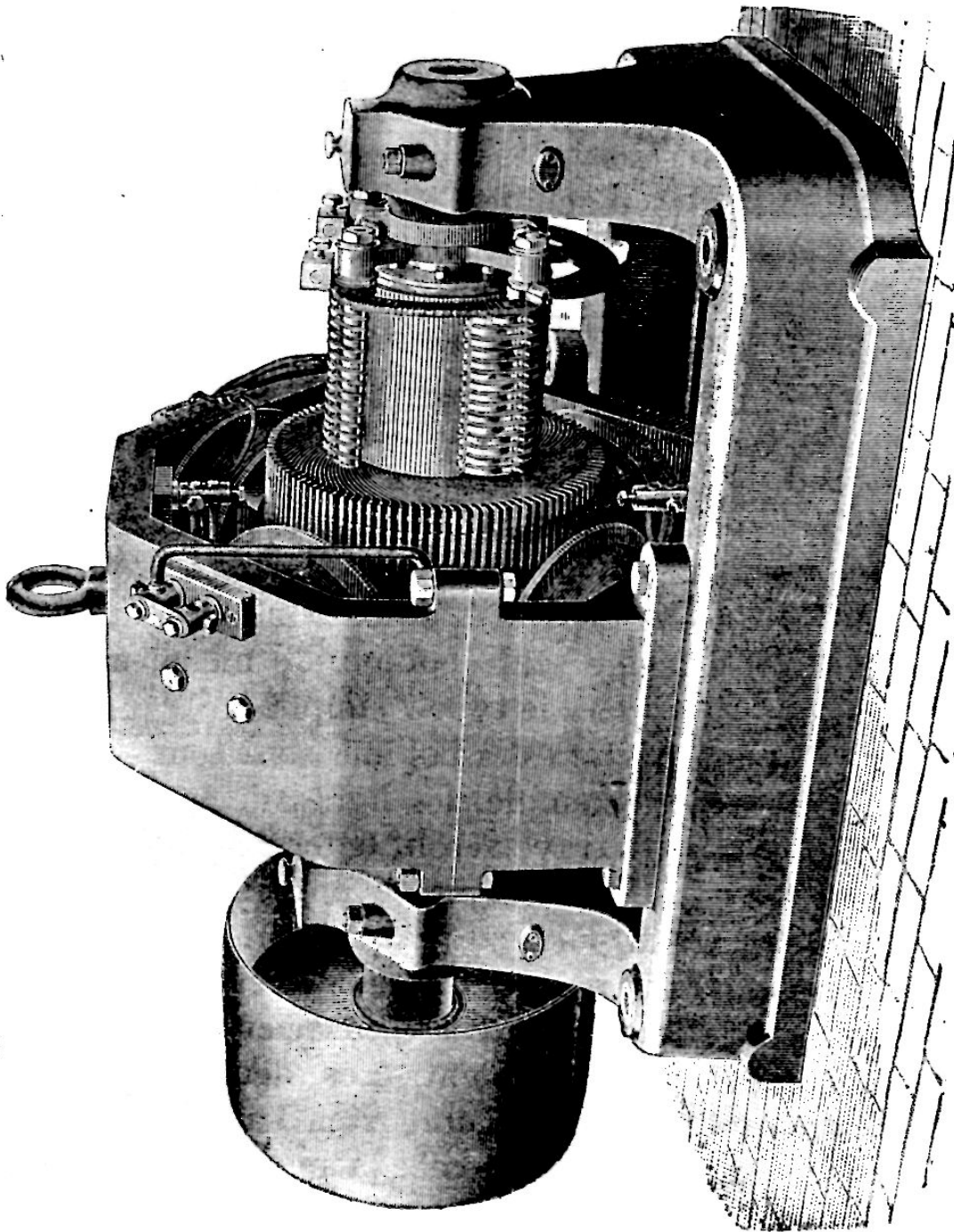


Fig. 52. — Dynamo à quatre pôles.

bien mieux utilisé qu'avec deux pôles ce qui permet d'en réduire la vitesse. Avec 6 pôles, les fils seraient 6 fois le siège d'une force électro-motrice par tour au

lieu de deux fois avec l'inducteur bipolaire, un induit placé dans ces conditions aura besoin de tourner trois fois moins vite et ainsi de suite. On augmente le nombre de pôles en raison du diamètre de l'induit, car il faut éviter qu'ils soient trop près les uns des autres, ce qui arriverait si l'induit était trop petit. Voilà pourquoi on réserve les inducteurs multipolaires pour les puissantes machines.

8° *Type à 4 pôles et à deux bobines.* — La machine type 7 est souvent bien encombrante. Pour les tramways en particulier on a besoin de moteurs puissants et par conséquent multipolaires, mais tenant peu de place. Force a été d'adopter la disposition figurée en 8 qui est en somme le type 7 dans lequel les deux bobines horizontales ont été supprimées et les pièces polaires raccourcies pour la circonstance.

De même que le type 5 à deux bobines nous a donné le type 6 à une seule bobine, de même nous aurons le type 8 qui sera le type 7 simplifié.

Si les pôles qui portent des bobines sont tous deux des pôles nord par exemple, les lignes de force qui sortiront de ces pôles traverseront le fer de l'induit et viendront rentrer dans les pièces polaires latérales qui deviendront des pôles sud de ce fait. Les lignes de force reviendront respectivement à l'endroit d'où elles sont parties par la carcasse en acier et tout se passera comme précédemment. Les deux bobines uniques devront seulement comporter deux fois plus de tours de fil, mais malgré cela la machine pourra être bien moins volumineuse.

9° *Machines multipolaires puissantes.* — Les machines génératrices de beaucoup d'usines centrales d'électricité, celles qui fournissent le courant distribué aux abonnés d'une ville ou à un réseau de

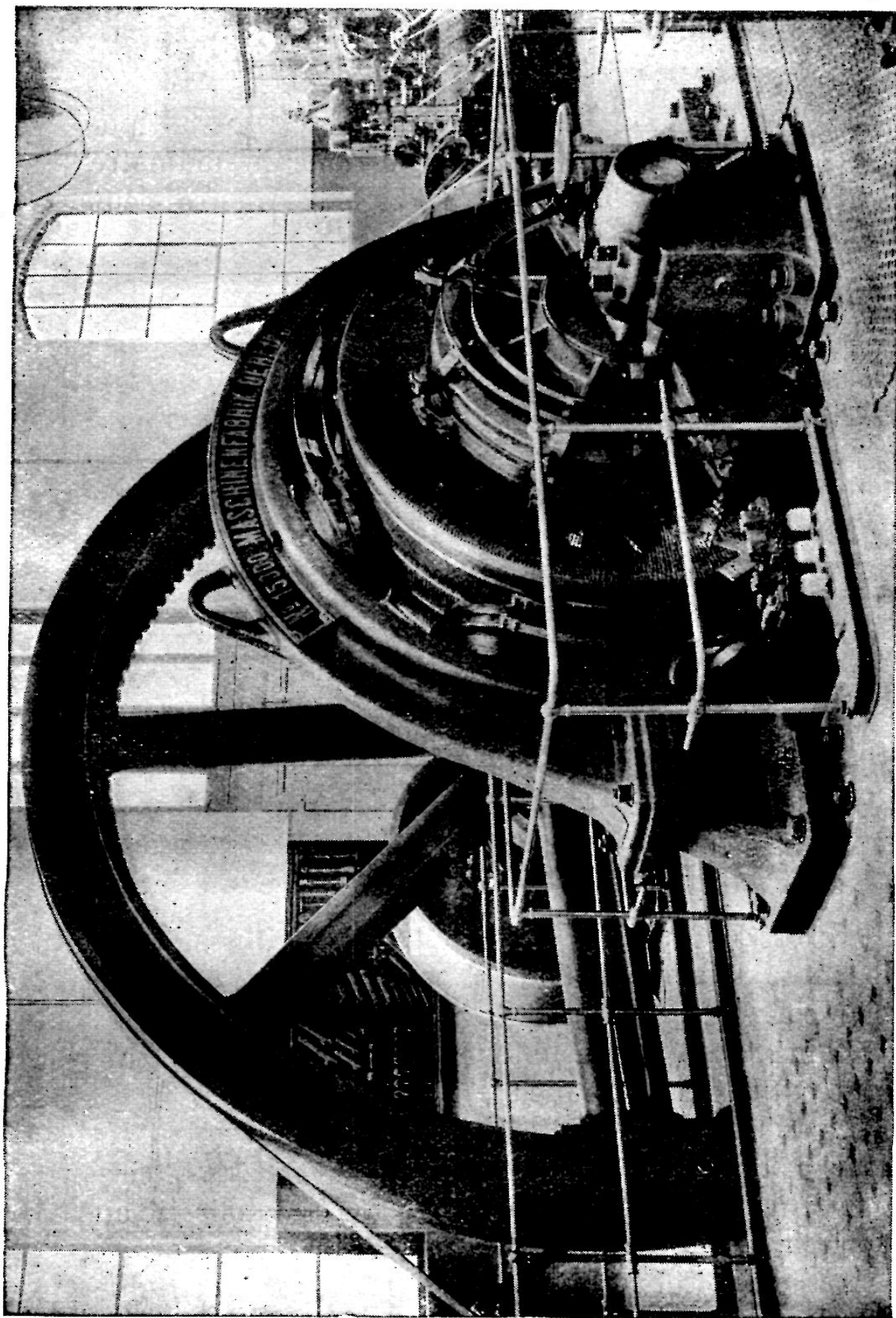


Fig. 53. — Machine dynamo multipolaire montée directement sur l'arbre d'un moteur à vapeur.

tramways atteignent couramment des puissances de 100 chevaux et il en existe beaucoup de plus puissantes encore.

Pour ces types, c'est toujours l'inducteur multipolaire qui convient, car l'induit dont le diamètre atteint souvent 80 centimètres ou un mètre peut

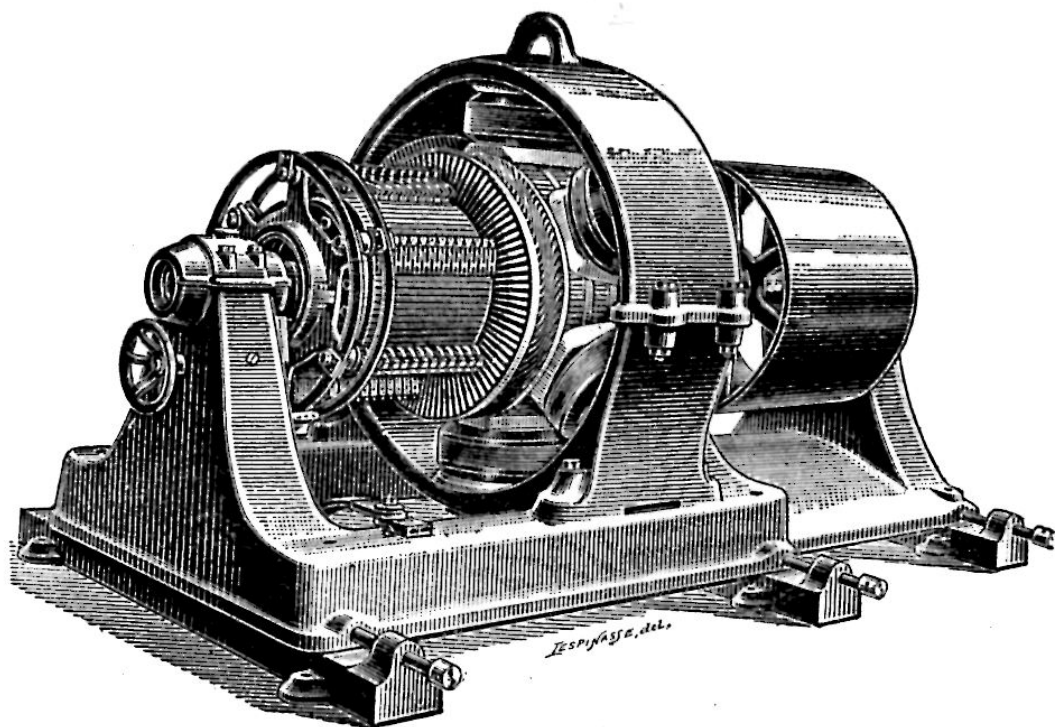


Fig. 54. — Dynamo à six pôles et à six lignes de balais pour installations importantes.

recevoir 4, 6 ou même 8 pôles. La vitesse de la machine est réduite d'autant et c'est ce qui a permis bien souvent d'accoupler les induits de ces dynamos sur l'arbre même du moteur qui les commande (turbine ou machine à vapeur) (fig. 53 et 70).

La mise en place et la réparation de semblables machines exigent qu'elles soient démontées facilement, aussi leur a-t-on donné une forme analogue au type 9.

Les pôles inducteurs sont fixés à l'intérieur d'une

couronne métallique qui leur sert de culasse commune. Ces pôles sont souvent venus de fonte avec la couronne qui est en ce cas en acier doux.

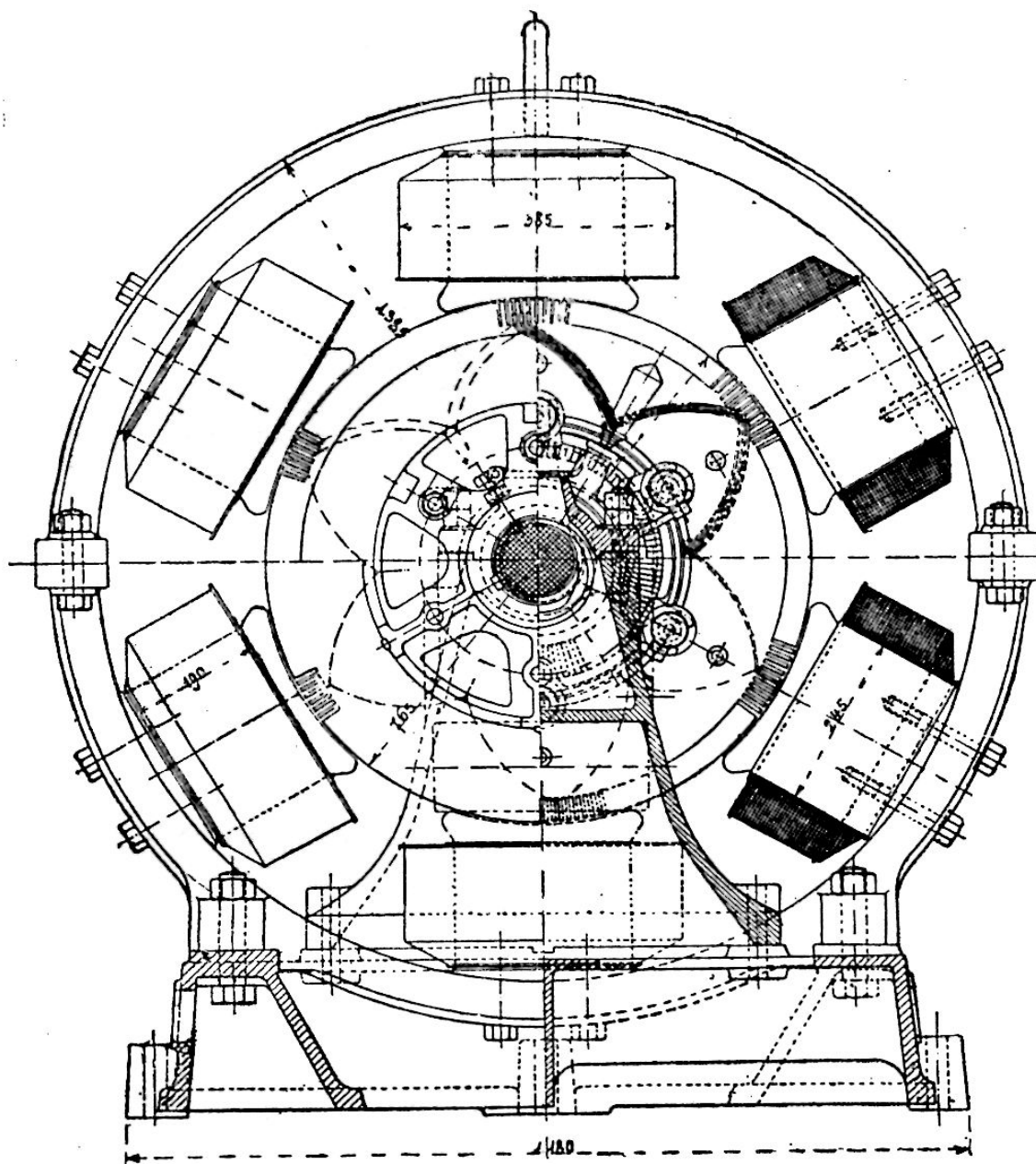


Fig. 55. — Coupe d'une dynamo multipolaire de 100 kilowatts.

D'autres constructeurs préfèrent employer une couronne en fonte grise qui doit avoir une section double de celle en acier à cause du peu de perméabilité de la

fonte que l'on compense par une de plus forte dimension. Les pôles coulés en acier ou en fer forgé sont rapportés à l'intérieur de la couronne et maintenus à l'aide de boulons. Il faut avoir bien soin, dans ce cas, de dresser avec soin les surfaces de la fonte et de la pièce polaire qui doivent venir en regard, car le moindre intervalle d'air crée une résistance très grande au passage des lignes de force. Les inducteurs coulés d'une seule pièce en acier doux n'offrent pas cet inconvénient, par contre l'emploi d'une couronne en fonte ordinaire permet de couler en même temps le bâti et les paliers de la machine, on a alors un type très robuste et aussi facile à construire que le précédent, à part la question des joints (fig. 67).

Pour faciliter le démontage, les constructeurs coulent souvent la couronne inductrice en deux moitiés qui peuvent se raccorder à l'aide de boulons comme on le voit sur le type 9, on a soin seulement de ne pas faire tomber ce joint sur un pôle et, pour cela, on dispose les pôles en X, de sorte que le joint peut se faire suivant un diamètre horizontal (fig. 54 et 55).

Le démontage d'une telle machine s'obtient très simplement à l'aide des appareils de levage dont dispose toute usine un peu outillée. On desserre les boulons qui servent à raccorder les deux moitiés de la couronne, on enlève la moitié supérieure à l'aide d'un palan ou d'un pont roulant. L'induit est alors complètement dégagé et peut s'enlever à son tour si on a eu soin de défaire les paliers qui le supportent.

On construit aujourd'hui couramment de ces machines à 6, 8 et même 16 pôles, cependant pour les grosses unités, elles cèdent de plus en plus la place aux machines à courants alternatifs qui n'offrent pas les ennuis résultant du collecteur. On transforme

ensuite suivant les besoins ces courants alternatifs en courant continu à l'aide de machines spéciales analogues comme forme aux génératrices que nous venons de voir.

On a fait des génératrices à courants alternatifs de 6.000 chevaux et au delà tandis que l'on ose à peine dépasser 1.000 chevaux pour les machines à courant continu, à cause d'abord du prix de revient élevé résultant de l'emploi d'un collecteur énorme et de nombreux balais et ensuite à cause de la force électromotrice limitée que peut fournir la machine à courant continu.

Si on cherche à faire produire une tension trop grande à une machine à courant continu, supérieure à 1.000 volts, par exemple, le collecteur peut facilement prendre feu, il se forme en effet des étincelles entre les lames successives dont l'intervalle n'est jamais très grand et on a un arc de feu autour du collecteur allant d'un balai à l'autre. Avec les courants alternatifs où on n'emploie pas de collecteur, on peut atteindre couramment sans danger pour la machine des tensions de 5 à 6.000 volts, il existe même des machines très puissantes fournissant directement 15.000 volts et on peut aller au delà. Les courants alternatifs se transforment facilement, on peut avec un transformateur, appareil inerte, composé de bobines enfilées sur un bâti en fer, passer de la haute à la basse tension et réciproquement. Tous ces avantages ont fait la vogue des courants alternatifs délaissés au début, mais ils ont aussi leurs inconvénients et pour certaines applications on est encore bien obligé d'avoir recours au courant continu, en particulier pour la traction électrique, les moteurs électriques, l'électrochimie, etc.

Mais on travaille à perfectionner les moteurs à courants alternatifs, de sorte que l'avenir nous réserve des surprises. Pour le moment, aucun moteur à courant alternatif n'a encore les qualités du moteur à courant continu, ce qui fait que ce dernier reste le maître sur les tramways et les chemins de fer électriques.

CHAPITRE IV

DIFFÉRENTS MODES D'EXCITATION

Nous venons de passer en revue les principales formes que prennent les électro-aimants inducteurs des machines dynamo-électriques; nous allons maintenant examiner comment on leur fait produire le champ magnétique nécessaire à l'induit. Il s'agit en somme de provoquer la circulation des lignes de force dans le circuit magnétique à l'aide d'un courant électrique passant dans le fil des bobines des inducteurs; c'est ce qu'on appelle *exciter* la machine.

Il y a plusieurs manières d'arriver à ce résultat suivant que l'on emploie une source séparée de courant ou suivant que l'on fait passer dans les bobines tout ou partie du courant produit par la machine.

Excitation séparée. — On peut exciter les inducteurs à l'aide du courant produit par des piles ou mieux par une petite machine magnéto auxiliaire. C'est ce que l'on appelle l'excitation séparée qui a été employée dès l'origine et que l'on a conservée sur les machines à courant alternatif parce qu'on ne pouvait pas faire autrement.

Avec les machines modernes à courant continu, on dérive une partie du courant qu'elles produisent et on l'envoie dans les bobines des électro-aimants pour assurer l'excitation.

Mais on va nous poser tout de suite cette question :

Comment peut-on dériver une partie du courant lorsque la machine n'en produit pas, — au moment où on vient de la mettre en marche, par exemple?

Il est évident que le courant ne peut se produire dans l'induit qu'à la condition que ce dernier tourne dans un champ magnétique; tant que ses fils ne couperont aucune ligne de force, aucun courant ne prendra naissance.

C'est naturellement ce qui arriverait si le fer doux, l'acier ou la fonte des inducteurs abandonnaient toute trace d'aimantation après que le courant a cessé de passer dans les bobines qui les entourent. Heureusement il n'en est pas ainsi et si ces métaux perdent leur aimantation, elle ne disparaît pas complètement; il reste un peu de *magnétisme rémanent*, comme on dit couramment, en sorte que dès qu'on met la machine en marche elle fonctionne comme une magnéto. L'induit tourne dans un champ magnétique très faible, c'est vrai, mais suffisant pour donner naissance à un léger courant. Ce courant circule dans les bobines des électro-aimants et si son sens est tel qu'il produise des lignes de force *s'ajoutant* à celles qui existaient déjà la machine *s'amorcera*. En effet l'induit coupe alors davantage de lignes de force et le courant qu'il produit augmentera. Ce courant croîtra aussi dans les inducteurs en sorte que peu à peu le nombre de lignes de force augmentera aussi et en quelques instants la machine sera en plein fonctionnement.

Excitation en série. — Dans les premières dyna-

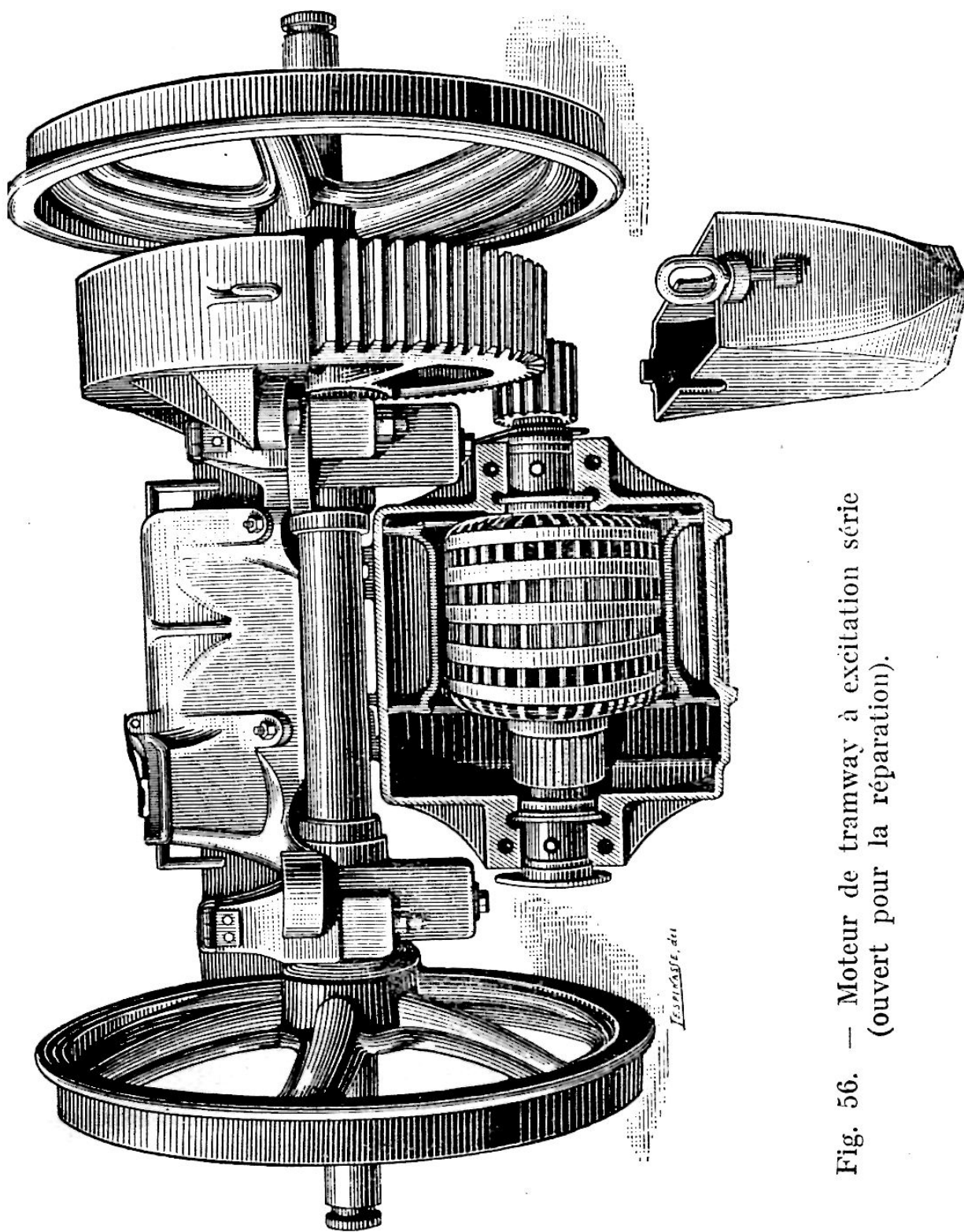


Fig. 56. — Moteur de tramway à excitation série
(ouvert pour la réparation).

mos on faisait passer dans les électro-aimants inducteurs tout le courant que produisait la machine. On

les enroulait donc à l'aide d'un fil gros et court ; gros pour ne pas s'échauffer, court pour ne pas offrir une trop grande résistance au passage du courant. Ce fil mis à la suite de l'induit, en *série* avec lui pour être traversé par le même courant que lui, présentait pour des machines génératrices de multiples inconvénients.

Tant qu'aucune lampe ou qu'aucun appareil d'utilisation n'était relié à la machine en mouvement aucun courant ne pouvait circuler dans les électro-aimants et la machine ne produisait rien, mais venait-on à tourner un interrupteur pour allumer quelques lampes, aussitôt la machine s'amorçait et les lampes brillaient ; jusqu'ici rien que de très naturel.

Mais où cela se complique c'est lorsque l'on continue à allumer des lampes en tournant de nouveaux interrupteurs : le courant qui passe dans ces nouvelles lampes passe aussi dans les bobines des électro-aimants et augmente proportionnellement le nombre de lignes de force qu'ils produisent ; cela fait croître aussitôt la force électromotrice de la machine d'autant plus qu'il y aura plus de lampes allumées. Si les lampes employées sont des lampes à incandescence il arrivera un moment où elles sauteront, car elles s'accommodent mal d'une élévation trop grande de la tension électrique.

Il y a plus encore, si accidentellement les deux fils partant de la machine viennent à se toucher ; en un mot si un *court-circuit* (1) se produit, le courant ne rencontrant aucune résistance sur son passage augmentera outre mesure, car avec lui augmente le champ magnétique de la machine.

(1) Le *court-circuit* est une communication franche entre les deux pôles d'un générateur électrique.

La puissance absorbée par la dynamo devenant de plus en plus élevée la courroie qui l'actionne pourra sauter ou encore le moteur à vapeur, à gaz ou autre, viendra à caler. Chose plus grave, les fils de l'induit de la dynamo pourront brûler par suite de l'échauffement que ne tardera pas à produire le courant de plus en plus intense qui les traverse, de sorte qu'en quelques instants la machine sera mise hors de service.

Ces accidents sont assez sérieux pour être pris en considération; aussi ne fait-on plus aujourd'hui de machines dynamo *génératrices* à enroulement *série*, sauf pour quelques cas particuliers.

Tout autre est le cas des moteurs, et la dynamo-série qui ne vaut rien comme génératrice est au contraire très employée comme moteur à cause du plus faible encombrement que l'on a à puissance égale sur les autres systèmes et aussi de la puissance considérable que ces moteurs peuvent développer dans un démarrage. La figure 56 représente un moteur de tramway monté sur l'essieu qu'il doit actionner.

Excitation shunt ou en dérivation. — Presque toutes les dynamos actuelles, pour ne pas dire toutes ont leurs inducteurs enroulés en *shunt*, mot anglais qui correspond au mot français : en *dérivation*.

Comme l'indique ce dernier mot on dérive sur les balais une partie du courant que produit la machine et on l'envoie dans les bobines des électro-aimants inducteurs.

Ces bobines ne devant recevoir qu'une dérivation, c'est-à-dire une très petite partie du courant que produit la machine, en général la plus faible possible, seront enroulées avec un fil fin et long. Ce fil étant très

fin se comportera comme un mince tuyau, il ne laissera passer qu'un courant faible et comme il est long, il fera un grand nombre de fois le tour des bobines, ce qui utilisera mieux le courant et la place disponible.

Mettons l'induit d'une telle machine en mouvement, nous savons que dès les premiers instants elle fonctionnera comme une magnéto à cause du magnétisme rémanent des inducteurs, un courant très faible va se produire et va circuler dans le fil fin des bobines inductrices qui est constamment relié par ses extrémités aux deux balais (fig. 57).

Si le sens de ce courant est *convenable* les lignes de force qu'il produira s'ajouteront aux premières et la machine pourra s'amorcer. La force électromotrice augmentera, mais elle atteindra vite une valeur bien définie qu'elle ne dépassera pas, limitée qu'elle est par la vitesse et aussi par l'état de *saturation* du fer des inducteurs ou de l'induit.

Nous savons, en effet, que dans un électro-aimant on a beau augmenter outre mesure l'intensité du courant qui circule dans le fil des bobines on n'augmente pas en proportion l'aimantation. Dès le début c'est exact; mais peu à peu, le fer, la fonte, ou l'acier des inducteurs se *saturent*, c'est le vrai mot, de lignes de force et n'en laissent presque plus passer. C'est ce phénomène qui limite la force électromotrice de la dynamo, car lorsque les inducteurs sont saturés on atteint la force électromotrice maxima pour la vitesse à laquelle tourne la machine.

Cet inconvénient est ici une qualité, car il fait de notre machine un générateur à force électromotrice constante ou à peu près, pourvu que la vitesse le soit, ce qui rend la dynamo comparable à une pile ou à un

accumulateur. Tandis que la machine-série ne produisait pas de courant tant qu'aucun appareil ne lui était relié, la dynamo shunt est toujours prête à fournir, elle dépense il est vrai pour son excitation un courant qui est presque le même à vide ou en charge mais cette dépense est si faible qu'elle rachète bien des inconvénients.

On voit de plus que l'on aura beau allumer des lampes, on ne risquera plus de les griller, comme c'était le cas avec une dynamo-série, car le courant qui les alimente n'a aucun rapport avec celui qui passe dans les inducteurs, puisqu'on a deux circuits bien distincts reliés aux balais. Lampes aussi bien qu'inducteurs reçoivent de l'induit une tension constante pourvu toutefois que la vitesse de la machine le soit.

Un court-circuit ou un contact accidentel des fils venant de la dynamo ne fera ni sauter la courroie ni brûler les fils de l'induit, en effet, si le contact est franc la machine se désamorcera, car tout le courant cherchera à passer par cette large issue et rien ne passera plus dans les inducteurs dont le fil fin et long oppose trop de résistance. L'aimantation disparaît du coup et la machine cesse de produire du courant, elle n'absorbe donc à ce moment aucune puissance, en sorte qu'au lieu de charger le moteur à vapeur et la courroie, un court-circuit bien franc les décharge, ce qui est certainement préférable.

Nous avons dit précédemment que quel que soit le nombre de lampes allumées la tension produite par la machine ne variait pas et cela parce que le circuit des lampes et celui des inducteurs n'avaient aucun rapport entre eux. C'est exact en théorie, mais en pratique la tension a toujours une tendance à dimi-

nuer un peu à mesure que l'on allume des lampes, cet inconvénient est moins grand que celui qu'offrait la machine-série, car une baisse dans la tension fait que les lampes éclairent moins, tandis qu'une élévation de tension amène au contraire infailliblement leur rupture si elle est trop grande.

Cherchons à corriger cet inconvénient et à ramener la tension et l'éclat des lampes qui en est l'image à leur valeur, il faut connaître pour cela, la cause de cet abaissement de la différence de potentiel; c'est ce que nous allons étudier.

Réaction d'induit. — L'induit examiné isolément n'est pas autre chose, en somme, qu'un électro-aimant de forme spéciale; nous y trouvons, en effet, du fil de cuivre recouvert de coton enroulé autour d'un noyau de fer. Nous savons que si un courant circule dans le fil, le noyau s'aimantera, et cela d'autant plus que le courant sera plus intense, jusqu'à ce que la saturation soit atteinte. Introduisons l'induit dans son système inducteur et faisons-le tourner, la machine va s'amorcer, phénomène bien connu pour nous maintenant. Allumons des lampes, la dynamo outre le courant bien faible demandé pour son excitation va en fournir d'autant plus que nous aurons plus de lampes allumées. Que va-t-il arriver? C'est que ce courant qui circule dans les fils de l'induit crée des lignes de force comme dans tout électro-aimant, mais ici malheureusement, elles viennent contrarier celles des électro-aimants inducteurs. C'est comme si deux armées étaient en présence, la logique veut que ce soit la plus forte, la plus nombreuse, qui l'emporte; c'est aussi ce qui se passe, et les inducteurs restent toujours les plus forts, mais il n'en est pas moins vrai que le champ magnétique qu'ils fournissent se

trouve affaibli par ces lignes antagonistes et la tension que produira la machine le sera aussi.

L'induit *réagit* donc sur ses inducteurs et cela d'autant plus qu'il fournit plus de courant, aussi a-t-on donné le nom de *réaction d'induit* à ce phénomène qui s'explique très bien comme on le voit.

Il y a encore une autre cause qui contribue à diminuer la tension utile dont nous pouvons disposer entre les balais, c'est une cause purement électrique. Le fil de l'induit a beau être en cuivre rouge, métal très conducteur, il oppose au courant électrique une résistance qui dépend de sa section et de sa longueur. A mesure que l'on allumera des lampes, le courant que devra produire la machine augmentera, mais de même qu'un courant d'eau qui circule dans une canalisation trop étroite perd de sa pression, comme on dit vulgairement, de même le fil opposera une résistance au passage du courant qui se traduira par une perte de pression ou de tension, puisqu'en langage électrique tension veut dire pression.

A la réaction d'induit vient s'ajouter cette deuxième cause, on voit donc pourquoi la tension diminue à mesure que la machine produit du courant.

Que faire pour remédier à ces inconvénients?

Nous allons prendre des inducteurs *puissants* qui maîtriseront mieux la réaction d'induit, nous choisirons pour l'induit un fil aussi gros et aussi court que possible afin de diminuer la perte de charge. Nous atténuerons ainsi les effets mais nous ne les compenserons pas, la réaction d'induit existera toujours et la perte de charge aussi.

Rhéostat d'excitation. — Disposons sur nos inducteurs un fil plus gros que celui qui est nécessaire

pour obtenir la tension voulue entre les balais de notre machine.

Si nous mettons notre machine en marche en reliant les deux extrémités du fil des inducteurs aux balais comme nous l'avons indiqué précédemment, la machine s'amorcera et nous aurons une tension qui dépassera celle de nos lampes, car les inducteurs absorbent plus de courant que tout à l'heure.

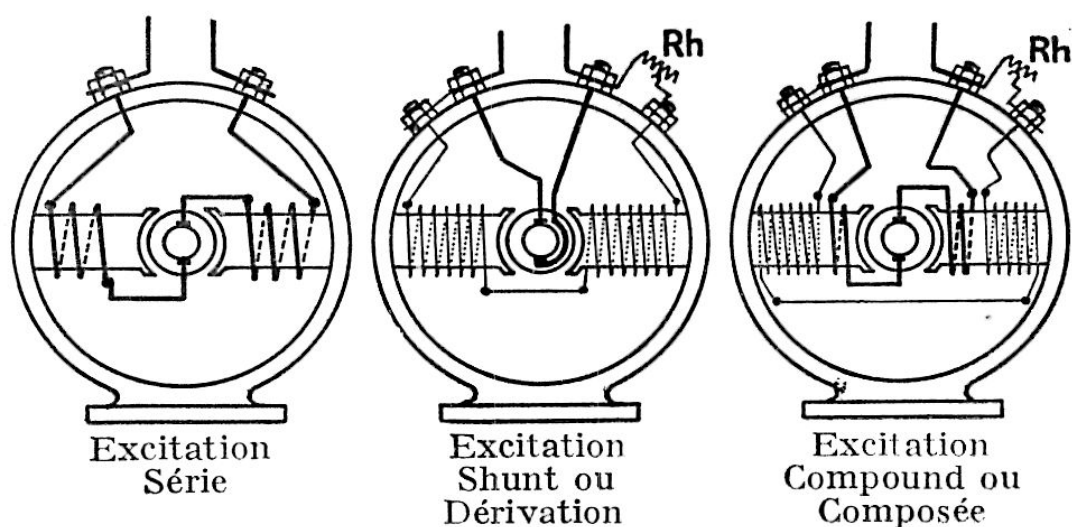


Fig. 57. — Différents modes d'excitation.

Pour la diminuer il y a un moyen bien simple, c'est d'allumer toutes nos lampes à la fois, la réaction d'induit nous viendra en aide comme on vient de le voir; mais ce moyen est un peu brutal et souvent inapplicable.

Au lieu de cela intercalons dans le fil des inducteurs une résistance c'est-à-dire un fil très résistant, en maillechort, par exemple, dans lequel nous obligerons le courant des inducteurs à passer.

Cette résistance aura pour effet de diminuer le courant d'excitation et aussi les lignes de force qui

sortent des inducteurs; la force électromotrice sera diminuée de ce fait.

A mesure que l'on allumera des lampes, la réaction d'induit se fera sentir mais nous agirons aussitôt sur notre résistance et nous diminuerons la longueur du fil de maillechort intercalé à l'aide d'un frotteur comme l'indique la figure 57.

Quand toutes les lampes seront allumées, il nous faudra pousser notre curseur jusqu'au bout de façon à ce qu'il n'y ait plus de résistance dans le circuit, car c'est à ce moment que la réaction d'induit sera la plus forte.

En un mot, la résistance agit comme un vrai robinet régulateur de tension, aussi toutes les machines à enroulement inducteur en dérivation en sont-elles munies. Cette résistance variable porte le nom de *rhéostat d'excitation*, on en construit de toutes formes mais le principe est toujours le même; c'est d'intercaler dans le circuit une longueur plus ou moins grande d'un fil résistant de maillechort.

Avec cet appareil on règle à volonté le nombre de lignes de force des inducteurs et par suite la force électromotrice de la machine, cet avantage est immense et il suffirait à lui tout seul pour faire préférer les dynamos aux magnétos si la faible puissance des aimants n'avait pas fait abandonner ces dernières machines depuis longtemps déjà.

Excitation compound. — La commande du rhéostat exige que quelqu'un soit constamment occupé au réglage de la tension; aussi dans bien des usines préfère-t-on rendre cette manœuvre automatique. On a imaginé des dispositifs excessivement ingénieux composés généralement d'un petit moteur électrique mis

en marche dans un sens ou dans l'autre par la hausse ou la baisse de tension et qui suffisait pour manœuvrer le rhéostat. Le grave défaut de la plupart des instruments de ce genre c'est que, comme des carabiniers jadis célèbres, « *ils arrivent toujours trop tard* ».

Il faut que l'action sur le rhéostat soit presque instantanée et certains de ces appareils ne s'y prêtant pas on a dû chercher autre chose ; c'est en somme l'enroulement *compound* des inducteurs qui donne les meilleurs résultats.

Compound est un mot anglais qui veut dire *composé*, et il est de fait que ce nouvel enroulement n'est autre qu'une combinaison des deux précédents.

Sur les inducteurs d'une machine dynamo excitée en dérivation, mettons quelques spires de gros fil parcourues par le courant total de la machine. Veillons à ce que les lignes de force que produiront ces spires s'ajoutent à celles de l'enroulement shunt et nous aurons réalisé le compoundage de la machine.

On devine, rien qu'au seul aspect de la figure 57, que tandis que l'enroulement en dérivation ou à fil fin fournit l'excitation donnant à vide la tension voulue entre les balais de la machine, l'enroulement à gros fil lui viendra en aide à mesure que l'on allumera des lampes et si son nombre de tours de fil a été convenablement choisi il pourra compenser exactement la réaction d'induit, en sorte que la machine fournira une tension pratiquement constante.

C'est ce mode d'excitation que l'on choisit pour les dynamos génératrices fournissant du courant aux tramways électriques. Au moment du démarrage d'une voiture il se produit sur la ligne un afflux de courant souvent considérable qui tend à faire baisser

brusquement la tension par suite de la réaction d'induit. Grâce aux spires de l'enroulement série parcourues par le même courant qui passe dans l'induit, la réaction est aussitôt contre-balancée et la tension reste constante.

Il y a une remarque à faire à propos de l'emploi de ces machines génératrices, c'est que le compoundage n'est assuré que pour une vitesse déterminée, indiquée par le constructeur. On devra donc se conformer strictement à cette observation et la vitesse de la machine devra être invariable. Si la machine tournait plus vite elle deviendrait *hyper-compound*, c'est-à-dire que la tension aux balais augmenterait avec la charge.

C'est ce que l'on cherche à obtenir dans certains cas, quand l'on veut compenser la perte en ligne, lorsque la machine alimente des lampes situées à une assez grande distance de celle-ci. Le cas le plus général est cependant celui du compoundage ordinaire, c'est celui qu'on emploie le plus fréquemment.

Les dynamos à enroulement compound ont un grave inconvénient, c'est que leur enroulement série ne permet pas de les employer à la charge des accumulateurs ou du moins sans de grandes précautions.

Cet enroulement à gros fil parcouru par le courant total de la machine se rendant aux accumulateurs, peut être la cause des plus graves mécomptes. Supposons en effet que la vitesse de la machine vienne à diminuer pour une cause quelconque, la force électromotrice qu'elle produit va faiblir et pourra devenir inférieure à celle des accumulateurs, ces derniers enverront un courant dans la machine qui sera en sens inverse du courant de charge.

Le courant se renversera donc dans l'enroulement à gros fil et avec lui le sens des lignes de force qui au lieu de s'ajouter à celles de l'enroulement à fil fin comme précédemment se retrancheront. La force électromotrice diminuera de plus en plus et finalement le courant des accumulateurs augmentant toujours pourra brûler les fils de la machine et les accumulateurs eux-mêmes s'abîmeront. On voit donc le danger que l'on court en chargeant des accumulateurs avec une machine compound.

Pôles de commutation. — Nous avons vu, p. 144, que le courant qui circule dans l'induit d'une machine dynamo produit un champ magnétique qui tend à *réagir* sur le champ magnétique des inducteurs.

Pour contre-balancer cette *réaction* de l'induit, certains constructeurs intercalent, entre les pôles principaux des inducteurs, des pôles plus *petits*, généralement plats, recevant un enroulement à gros fil en série avec le courant de l'induit. Ces pôles sont appelés *pôles de commutation*; ils ont pour effet de maintenir la ligne neutre invariable et d'éviter la production d'étincelles à mesure que la charge augmente. Le rôle de ces pôles est donc excellent, mais à une condition, c'est qu'il soient bien montés. La règle, facile à retenir pour obtenir un bon fonctionnement, est la suivante : Dans les dynamos génératrices, à tout pôle principal des inducteurs succède, dans le *sens de la rotation* de la machine, un pôle auxiliaire de nom *contraire*.

Lorsque la machine est employée comme moteur, c'est l'inverse, c'est-à-dire que dans le sens de la rotation tout pôle principal est suivi d'un pôle auxiliaire de même nom.

Dynamos à trois balais. — Les machines série, shunt ou compound fournissent leur courant à une vitesse bien déterminée qui ne doit pas varier, mais dans certains cas il est utile de pouvoir disposer de dynamos donnant un courant à peu près constant quelle que soit la vitesse (automobiles, éclairage des trains, moulins à vent, etc.), on peut alors faire appel à la dynamo à trois balais (fig. 57 bis). Une telle machine est en somme une dynamo shunt dans laquelle un 3^e balai C est intercalé entre les deux balais principaux A et B, l'enroulement d'excitation reçoit son courant de l'un des balais principaux A et du 3^e balai C.

A condition d'alimenter une batterie d'accumulateurs qu'elle charge en tampon, la dynamo à trois balais donne un courant qui, loin d'augmenter avec la vitesse décroît plutôt. La chose s'explique par le fait de la réaction d'induit (voir page 144) qui déplace la ligne neutre. Le courant de charge qui circule

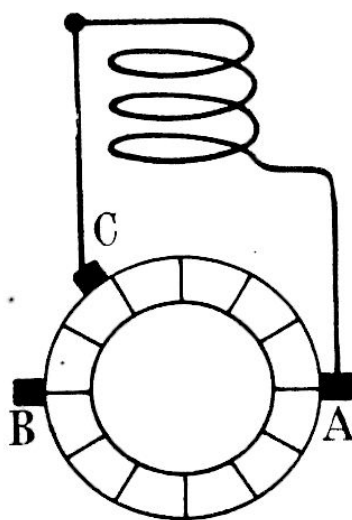


Fig. 57 bis.

dans l'induit produit un champ magnétique qui contrebalance et tend même à affaiblir le champ inducteur, lequel par le 3^e balai puise son courant d'excitation dans une région du collecteur où la tension tend à diminuer du fait du déplacement de la ligne neutre. On devra se souvenir qu'il faut toujours faire débiter une telle dynamo, sans cela aux grandes vitesses aucune réaction d'induit n'intervenant, on risque d'avoir une tension dangereuse capable de brûler la machine.

CHAPITRE V

CONSTRUCTION PRATIQUE DES BOBINES INDUCTRICES

Le fil des inducteurs est en cuivre rouge recouvert de une ou deux couches de coton que l'on imprègne pendant le bobinage de vernis. Dans les premières machines ce fil était enroulé sur des bobines en bois que l'on enfilait ensuite sur les électro-aimants. De nos jours on a abandonné, ou à peu près, le bois qui est trop volumineux et qui se fend à la chaleur et on enroule le fil sur des bobines en zinc ou en tôle recouvertes de papier comme les tôles des induits. On emploie également des bobines en fibre rouge, en carton comprimé, etc., enfin on peut ne pas en employer du tout, comme le font les Américains qui se contentent de passer sur les inducteurs une couronne de fil convenablement recouverte de toile isolante (moteur démonté de la fig. 59 et dynamo, fig. 58 et 60).

Nous avons vu que l'emploi d'inducteurs en acier permettait de réduire considérablement les dimensions des machines, c'est ainsi qu'on admet que pour

laisser passer un nombre donné de lignes de force, on a besoin de donner aux inducteurs en fonte une section *double* de celle qu'ils auraient en acier coulé. Il en résulte que sur les machines modernes la place est très réduite et on ne peut plus employer de

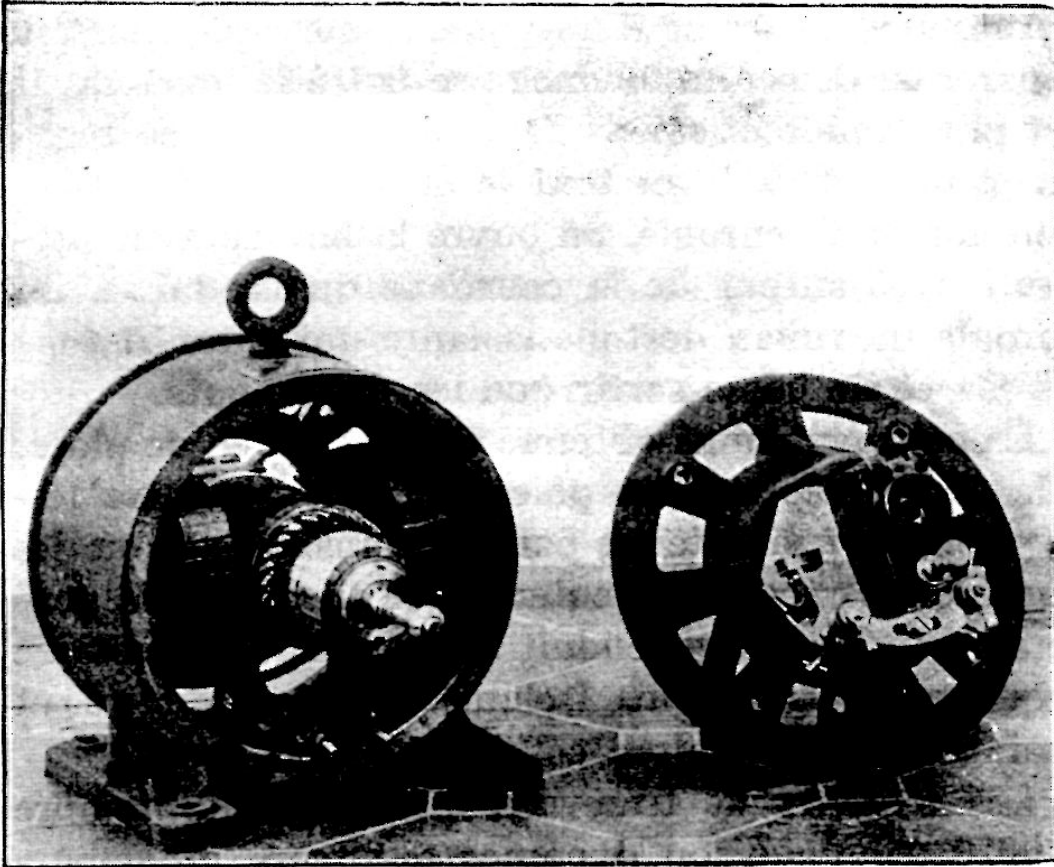


Fig. 58. — Dynamo blindée à deux pôles démontée, de la Société alsacienne de Belfort. Vue des bobines inductrices.

bobines épaisses; c'est pourquoi on les fait de préférence en zinc ou en carton comprimé et on les maintient en place à l'aide de petites équerres fixées par des vis dans les pièces polaires.

En Suisse, certains constructeurs ont supprimé les joues des bobines en faisant des enroulements coniques ou en gradin; il suffit de laisser à l'extrémité de chaque couche un tour de fil de moins et

de prendre les fils qui sont au bord dans des rubans isolants sur lesquels on enroule la couche suivante.

Les Américains, en gens pratiques, suppriment, comme nous l'avons dit, toute espèce de bobine : ils enroulent le fil qui doit constituer l'enroulement inducteur sur un moule en bois en deux pièces ayant absolument la forme d'une bobine que l'on pourrait séparer en deux. Le bobinage se fait à la machine, il est plus rapide et mieux fait qu'à la main, sa régularité permet de loger tout le fil dans peu de place. Une fois le fil enroulé, on ouvre la bobine avec précaution et autour de la couronne qu'elle laisse, on enroule un ruban de toile isolante qui garantit tous les fils et ne laisse sortir que les deux bouts.

La couronne ainsi obtenue tient très peu de place, elle est enfilée sur les pôles inducteurs contre lesquels elle est maintenue par des coins en bois ou des équerres vissées. Bien entendu, le fil doit être pendant, son bobinage enduit de vernis à la gomme laque ou autre vernis isolant qui le protégera et maintiendra les spires collées entre elles.

Les moteurs de tramways et un grand nombre d'autres moteurs ou dynamos ont leurs inducteurs enroulés de la sorte (voir la bobine sur la droite de la figure 59 représentant un moteur démonté).

Remarque. — Ici se place une remarque qui a son importance quand on s'occupe de l'entretien et du bon fonctionnement d'une installation de dynamos, c'est la question des connexions ou liaisons des bobines entre elles. Il arrive souvent qu'une dynamo refuse de s'amorcer ou qu'un moteur s'emballe brusquement sans cause apparente. En cherchant et en examinant avec soin tous les circuits, on s'aperçoit que le fil d'une bobine inductrice est cassé à sa

sortie dans sa gaine isolante, cela suffit pour empêcher le passage du courant d'excitation et les accidents que nous avons signalés se produisent. Pour réparer la machine il faut la démonter, enlever la bobine endommagée et la dérouler complètement car c'est généralement au bout que l'on trouve la cassure.

Cet inconvénient ne se produit plus ou du moins est fortement atténué, si l'on a soin de souder aux deux bouts commençant et finissant de chaque bobine un *fil souple* constitué par la réunion d'une

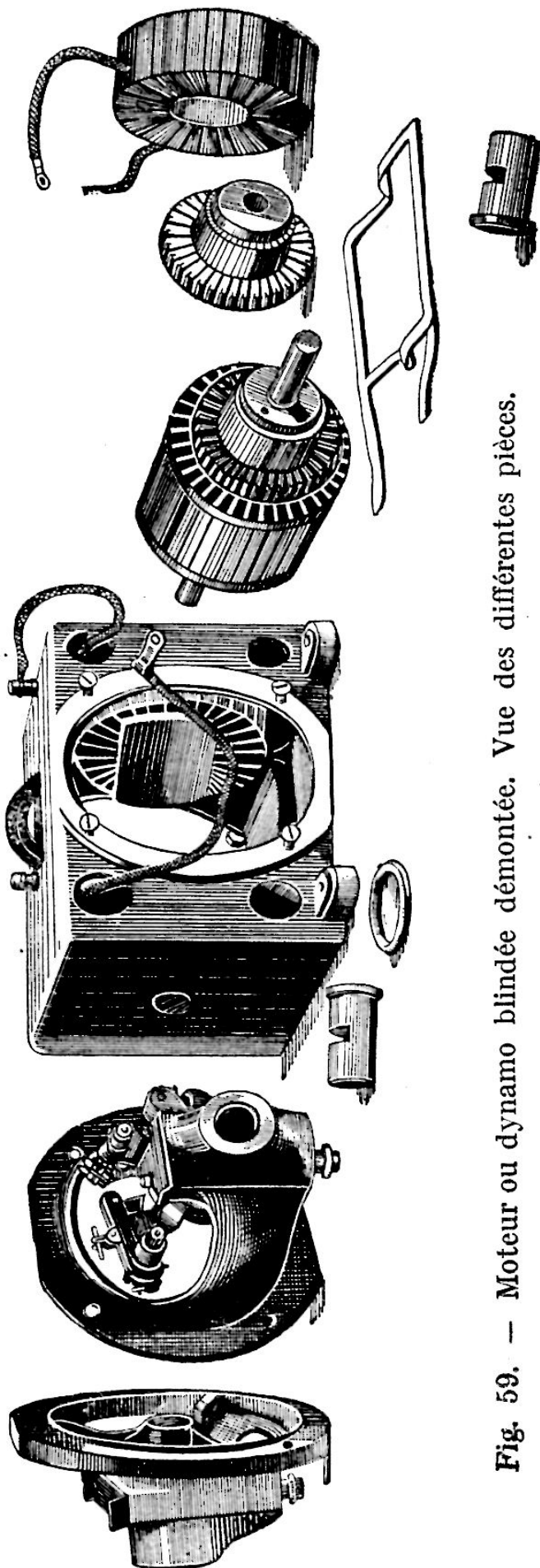


Fig. 59. — Moteur ou dynamo blindée démontée. Vue des différentes pièces.

multitude de fils fins qui cassent beaucoup moins facilement que ne le ferait un gros fil. Cette soudure, comme toutes les soudures électriques, doit se faire à *la résine* et jamais à l'esprit de sel. On isolera le joint en le recouvrant de toile isolante et on fera sortir le fil souple en le faisant passer entre deux feuilles de mica contre lesquelles pourront appuyer sans danger les couches successives de l'enroulement.

Le raccordement des fils souples entre eux se fera à l'aide de serre-fils fixés au bâti de la machine de façon à rendre le démontage facile. Des contre-écrous empêcheront le desserrage des vis. Si on n'a pas à démonter souvent les bobines, mieux vaudra joindre les fils par une soudure qui est encore le meilleur moyen d'assurer une jonction durable et invariable, pourvu qu'elle soit bien faite.

CHAPITRE VI

ACCESSOIRES DES MACHINES

Paliers. — Les paliers sont des supports recevant des coussinets dans lesquels l'arbre de la machine peut tourner librement. Ces paliers sont le plus souvent venus de fonte avec le socle même de la machine (fig. 47), d'autres fois ils sont portés par des bras ou croisillons en bronze boulonnés à la carcasse des inducteurs (fig. 51). Quel que soit leur mode de montage, ils doivent être très robustes en vue de résister aux violents efforts de la courroie, et aussi afin de ne pas vibrer lorsque l'induit tournera à de grandes vitesses.

Cette vitesse, atteignant parfois 1.500 à 2.000 tours par minute, il est de toute nécessité d'avoir à chaque instant un graissage parfait des coussinets. Dans les premières machines, on se contentait de placer un graisseur compte-gouttes du modèle bien connu employé sur les machines à vapeur et on en réglait le débit de façon à n'avoir aucun échauffement nuisible. Ce système offrait de graves inconvénients, d'abord il suffisait que l'on oublie de remplir un

godet lorsqu'il était vide pour avoir un échauffement amenant souvent l'arrêt de la machine, ensuite on dépensait une grande quantité d'huile qu'il était difficile de récupérer. Depuis longtemps, heureusement, ce système de graissage a fait place à un autre bien plus commode et bien plus ingénieux, c'est le graissage par *bagues*.

Imaginons que l'arbre tourne au-dessus d'un

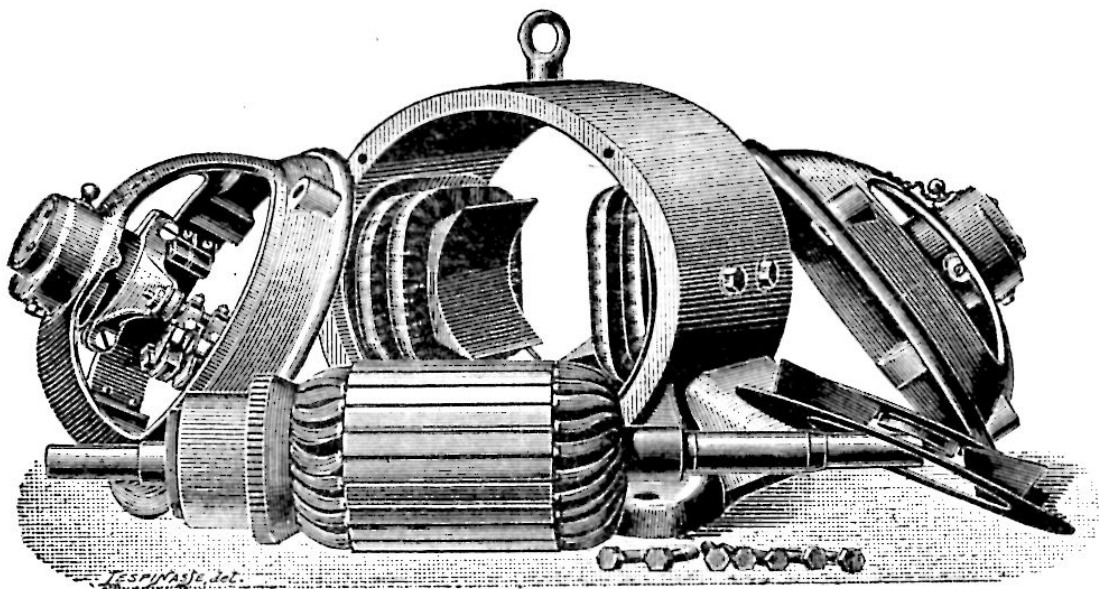


Fig. 60. — Vue des différentes pièces d'une dynamo.

réservoir plein d'huile, passons autour une chaîne ou une bague trempant dans l'huile par son extrémité. Il est évident que l'arbre va entraîner la chaîne ou la bague dans sa rotation et cette dernière jouera le rôle d'une noria en puisant l'huile dans le réservoir et en la remontant sur l'arbre. Ce phénomène se manifeste d'autant plus que l'huile est plus épaisse, il ne faut pas cependant qu'elle le soit trop, sans quoi la bague ne tournerait plus.

Les constructeurs réalisent ce dispositif en

employant des paliers creux qui jouent le rôle de réservoir (fig. 61), le coussinet est fendu jusqu'à la moitié pour que la bague puisse reposer sur l'arbre et être entraînée par lui. On devine rien qu'au seul aspect de la figure 61 que dès que la machine tournera la bague ira puiser l'huile dans le réservoir et la déversera sur l'arbre qui sera abondamment lubrifié, elle s'écoulera dans le coussinet en glissant le long de l'arbre et retournera au réservoir d'où elle est partie. Ce procédé est des plus économiques, car c'est toujours la même huile qui sert.

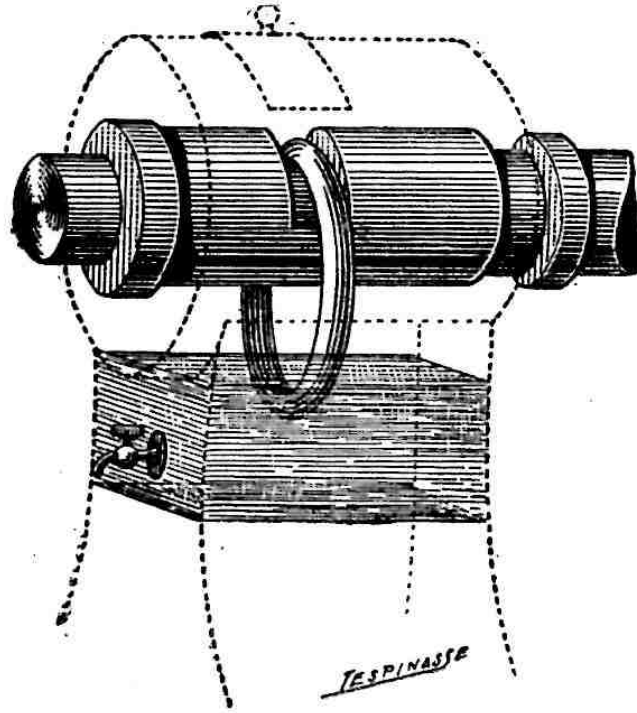


Fig. 61. — Palier à bague.

Au bout d'un ou deux mois, il convient de changer l'huile en vidant le palier à l'aide du robinet que l'on voit sur le côté. Le graissage est automatique, car il est assuré dès que la machine se met à tourner; on doit cependant vérifier de temps en temps si aucun corps étranger n'empêche la bague d'être entraînée ce qui pourrait arriver si l'huile était trop épaisse ou chargée de poussières et de limailles. Dans les pièces du moteur démonté de la figure 59 on reconnaît le coussinet fendu et la bague.

Aujourd'hui, presque toutes les machines possè-

dent ce mode de graissage, sur les grosses dynamos on place 3 ou 4 bagues suivant la largeur du palier, mais le principe reste le même.

Pour les toutes petites machines destinées à la commande des machines-outils, on vient d'adopter, après des essais infructueux au début, des paliers à *billes* qui remplacent avantageusement les paliers à bagues.

Tout le monde connaît le montage des coussinets à billes employés sur les bicyclettes; la couronne de billes sur laquelle repose l'arbre remplace en somme la bague des paliers précédents. Pendant la rotation, cette couronne est entraînée et déverse sur l'arbre l'huile contenue dans les cuvettes.

Ce système d'un montage et d'un réglage peut être un peu délicats donne une grande douceur dans les roulements, on perd une puissance bien moins considérable dans les frottements et le rendement des toutes petites machines se trouve amélioré de ce fait.

Signalons simplement cette tentative qui semble digne d'intérêt, aujourd'hui que l'industrie du cycle et de l'automobile a fait faire de grands progrès à la fabrication en grand des billes d'acier trempé.

Rails tendeurs. — Les machines-dynamos tournent en général très vite, avons-nous dit, surtout celles de puissance réduite ne dépassant pas 50 chevaux; on ne peut donc songer à les accoupler directement à un moteur à vapeur comme on le fait pour les grosses machines multipolaires et on est conduit à les commander par courroie. Malheureusement, les courroies se détendent à la longue, souvent même pendant la marche, de sorte que l'on se trouve obligé

de les retendre fréquemment et cela sans interrompre le service.

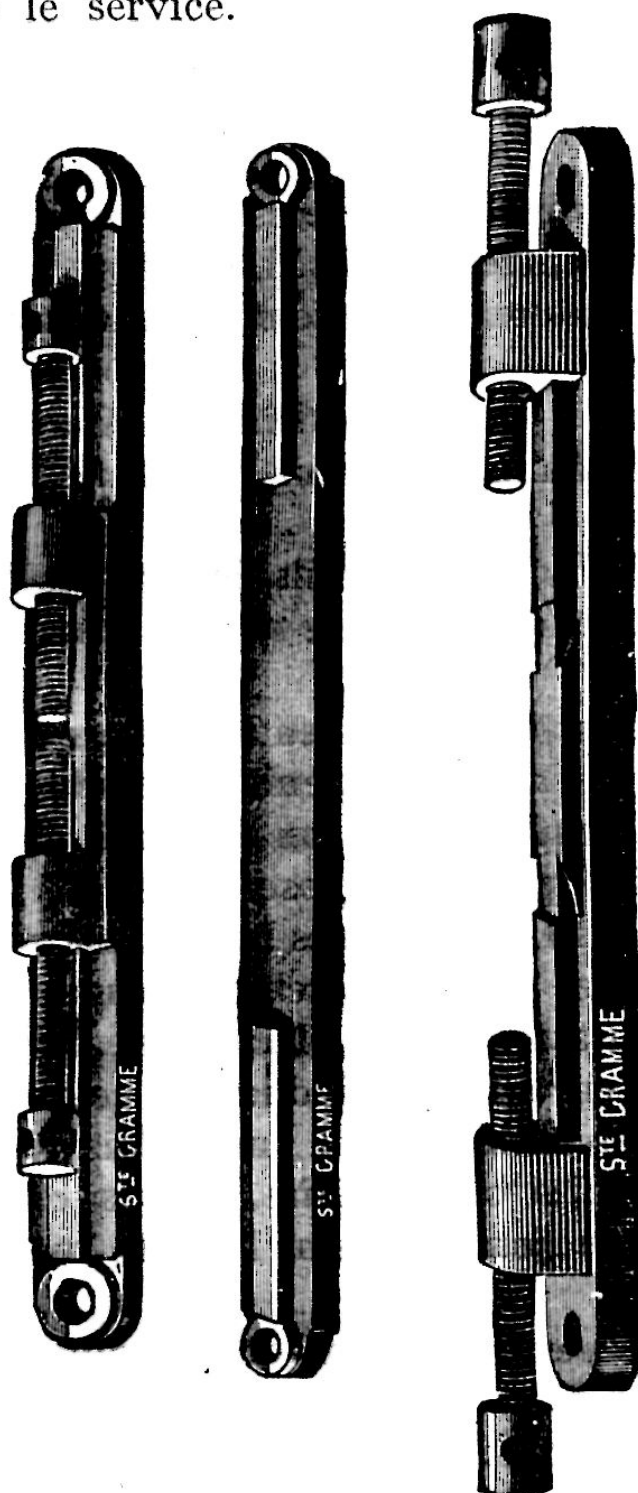


Fig. 62. — Glissières et rails tendeurs pour dynamos.

Ce résultat est obtenu pratiquement en montant la dynamo sur des glissières ou *rails tendeurs* et en la maintenant en place à l'aide de vis (fig. 62).

Pour tendre la courroie on desserre les vis du côté opposé à la courroie tandis qu'on serre celles situées de son côté, la dynamo recule tout en restant fixée entre les vis comme elle le serait entre les griffes d'un étau.

Pour plus de sûreté, le socle est retenu par quatre boulons passant entre les rails. Le serrage simultané des vis et des boulons maintient la machine solidement en place.

Nous verrons à propos de l'installation des machines dynamo comment les rails sont fixés au sol.

Bornes. — Tous les appareils électriques comportent des bornes et les dynamos ne font pas exception à la règle.

Les bornes sont des pièces en laiton ou en bronze destinées à serrer et à maintenir en contact les fils ou câbles qui aboutissent à un appareil électrique, avec les circuits qui le composent.

Sur une dynamo on place des bornes aux points où l'on doit attacher les câbles reliant la machine aux appareils d'utilisation, on en place aussi souvent aux extrémités de l'enroulement inducteur, ce qui permet de relier cet enroulement soit aux balais soit à une source extérieur, si on le désire, sans avoir à faire chaque fois une jonction sur les fils mêmes des bobines.

On évite une perte de temps et le contact est souvent mieux assuré.

On a créé des quantités de modèles de bornes, mais nous ne citerons que les principales, celles que la pratique indique comme étant les meilleures.

La figure 64-1 est la borne classique, c'est un cylindre en laiton percé d'un trou dans lequel on

engage les fils ou câbles à relier que l'on serre ensuite à l'aide de la vis supérieure (des bornes de ce genre

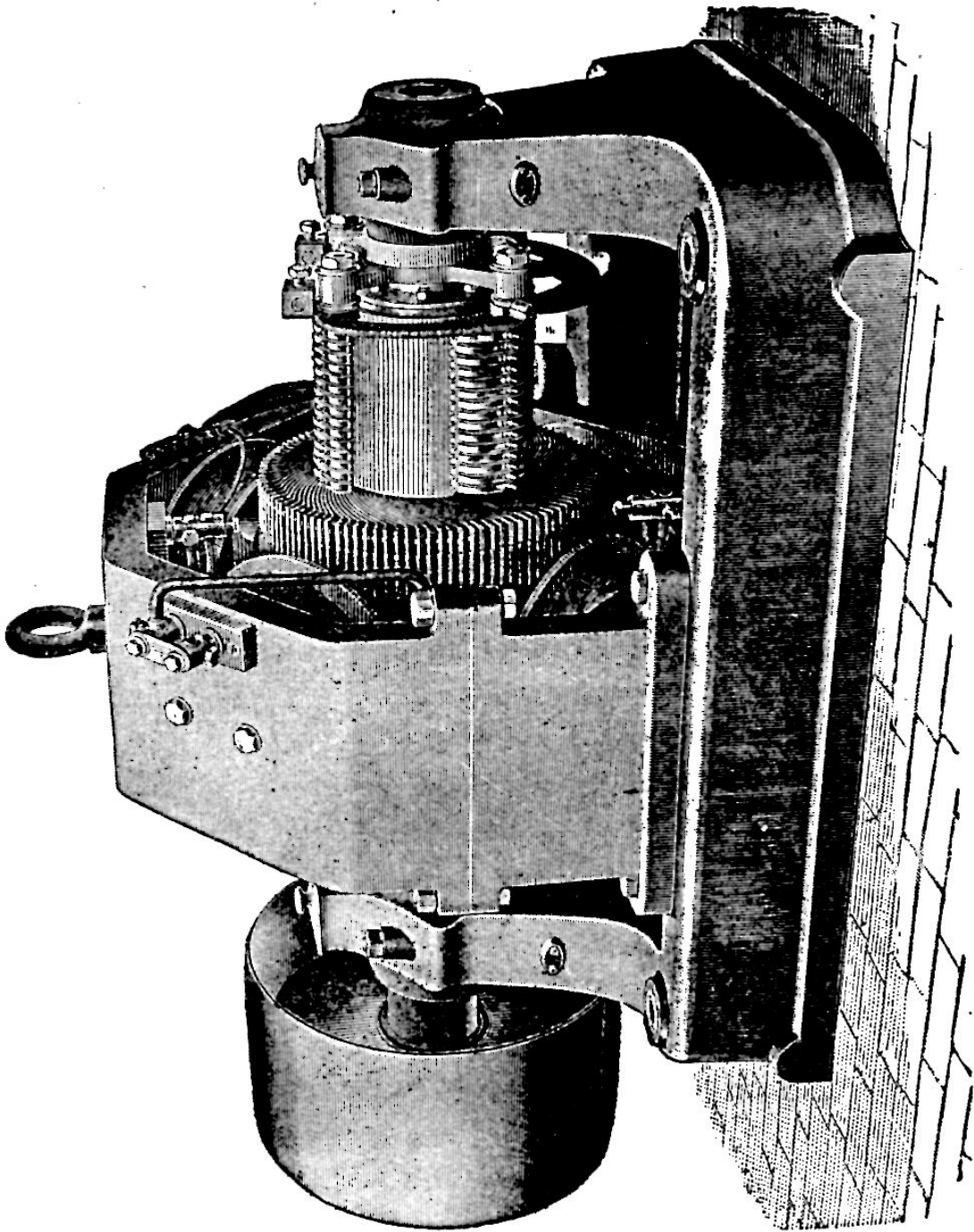


Fig. 63. — Disposition des bornes sur une dynamo.

sont visibles sur la machine 63 près de l'anneau de suspension).

La vis inférieure sert à fixer la borne sur un socle

isolant en bois ou en fibre vissé lui-même sur la machine.

Souvent le courant de la machine est amené à la borne à l'aide d'une lame de cuivre que l'on pince sous la vis inférieure; en tout cas, ce genre de borne

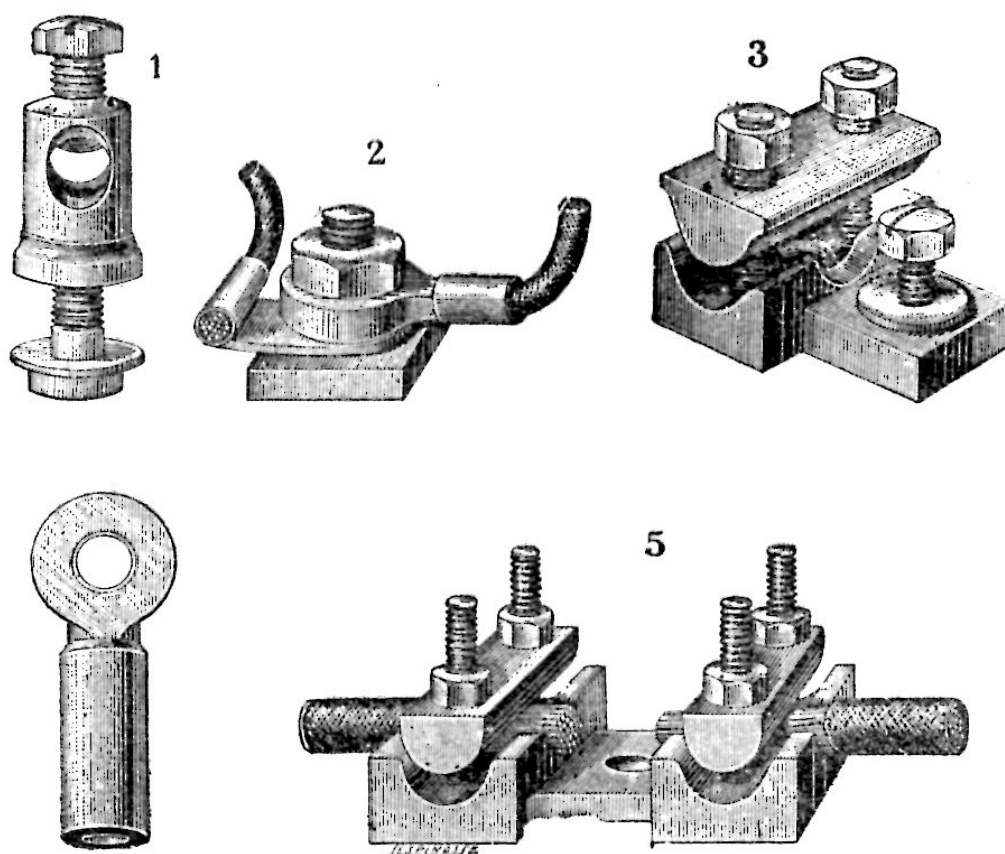


Fig. 64. — Bornes diverses.

n'est employé que sur les petites machines et les petits appareils.

La borne (fig. 64-2) est un modèle plus robuste et plus moderne; c'est tout simplement un boulon reposant sur un socle isolant fixé au bâti de la machine. L'écrou qui est généralement à six pans sert à serrer l'un contre l'autre deux *cosse*s terminant les câbles à relier.

Qu'est-ce qu'une cosse?

La cosse tend à s'employer de plus en plus dans les constructions électriques, c'est tout simplement un œillet terminant un fil ou un câble. On leur donne généralement la forme de la figure 64-4, on voit distinctement l'œillet que l'on passe dans le boulon et qui se termine par un tube dans lequel on soude le câble. Cette soudure se fait très facilement à la lampe, on chauffe la cosse en tenant le tube vertical son ouverture dirigée vers en haut, on l'étame consciencieusement en le décapant à la résine et en faisant fondre de l'étain, puis on y introduit le câble à relier soigneusement décapé et étamé, on maintient le tout dans la flamme de la lampe en même temps qu'on fait couler de la soudure dans le tube; quand il est plein et que le câble est noyé dans le métal on laisse refroidir. Il ne reste plus qu'à recouvrir le câble de toile isolante jusqu'à la cosse et on peut le fixer sous la borne.

L'autre cosse que l'on voit figure 64-2 est plus facile à faire, c'est une lame de cuivre rouge étamé percée d'un trou pour passer dans la vis du boulon et dont l'autre extrémité est repliée en forme de tube se moulant autour du câble soigneusement décapé. Le câble est soudé dans ce tube à la lampe comme précédemment, on donne un coup de lime pour faire effleurer les fils à un des bouts et l'on recouvre le câble de toile isolante comme tout à l'heure.

Le serrage de ces deux pièces dans le boulon peut être très énergique en s'aidant d'une clef, on réalise ainsi une excellente jonction très solide et très durable. Si la machine est soumise à des trépidations on ajoutera un contre-écrou et on aura un montage aussi excellent au point de vue mécanique qu'au point de vue électrique.

Les mâchoires représentées figures 64-3 et 64-5 constituent d'excellentes bornes donnant de très bons contacts avec des câbles même très gros.

La borne-mâchoire (fig. 64-3) est destinée à recevoir d'une part une cosse soudée à un câble que l'on

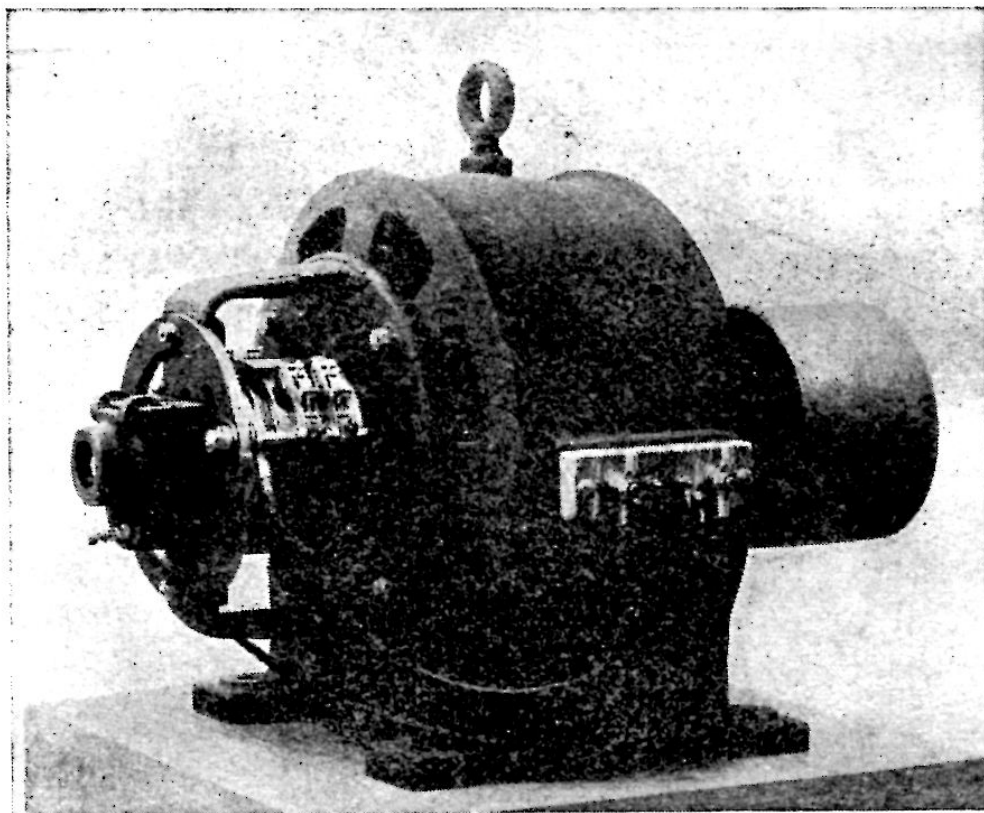


Fig. 65. — Dynamo de la Société alsacienne de Belfort ; dynamo (fig. 58) remontée. — Vue d'ensemble montrant le mode d'attache des câbles et le collecteur.

serrera sous la vis que l'on voit en avant, ce sera le câble souple allant aux balais d'une dynamo par exemple. D'autre part elle se termine par une sorte de presse constituée par deux vis dans lesquelles peut glisser une barrette de laiton. On introduit le câble soigneusement dénudé entre les deux vis sous la barrette et avec une clef on serre les écrous, le câble

s'aplatit et tous ses fils entrent en contact. On obtient ainsi une jonction rapide et sûre.

La double mâchoire (fig. 64-5) est destinée à relier deux câbles entre eux, dans un montage rapide lorsqu'on n'a pas le temps de faire une épissure ou un raccord en règle et dans bien d'autres cas, comme borne-prise de courant par exemple.

Elle se compose comme on le voit d'une pièce fondue en laiton ou en bronze travaillée suivant une forme spéciale en vue de recevoir un câble à chacune de ses extrémités.

Les câbles sont maintenus en place à l'aide de deux barrettes en laiton ou bronze étamé que l'on fait appuyer sur eux à l'aide d'écrous vissant sur de solides tiges filetées.

En s'aidant d'une clef et en agissant sur tous les écrous à la fois on obtient une compression énergique du câble qui remplit la cavité qu'on lui a ménagée et avec laquelle il entre en excellent contact. Ce modèle de borne-mâchoire est surtout employé pour les liaisons de gros câbles; elles se font de toutes grandeurs.

Il existe bien d'autres systèmes de fixation des fils, et en général chaque constructeur a son type de borne, comme il a son type d'inducteurs, mais nous n'avons voulu citer que les principaux modèles, ceux que l'on rencontre le plus souvent et qui ont en tous les cas fait leurs preuves et ont donné de bons résultats; suivant les cas on adoptera tel ou tel système, nous conseillons cependant vivement l'emploi de cosses soudées qui réalisent une jonction simple et élégante lorsqu'elles sont bien faites. On en peut voir un exemple aux extrémités des câbles des machines (fig. 59 et 65) qui figurent dans cet ouvrage.

CHAPITRE VII

INSTALLATION, CONDUITE ET ENTRETIEN D'UNE MACHINE DYNAMO

Installation. — On choisira pour installer la machine un endroit ou un local autant que possible sec et frais, à l'abri des limailles et des poussières métalliques.

La dynamo ne doit pas être installée dans les ateliers où se travaillent le coton, la laine, la farine, le lin, etc., et toutes autres matières facilement inflammables, ni dans la salle même où se trouve une batterie d'accumulateurs.

Fondations. — On creusera dans le sol un trou de profondeur variable en vue d'établir les fondations, il sera de 30 centimètres environ pour les petites machines de la puissance de 1 cheval, de 50 centimètres pour une machine de 8 à 10 chevaux et il pourra atteindre un mètre pour des machines de 40 à 50 chevaux.

Ce trou sera garni de béton, on aura soin d'élever la maçonnerie à 10 ou 15 centimètres au-dessus du sol de façon à constituer un socle sur lequel reposera la machine (fig. 66 et 67).

Montage. — La dynamo n'est pas fixée directement sur la maçonnerie, on commence par disposer les rails tendeurs sur des madriers en bois en les main-

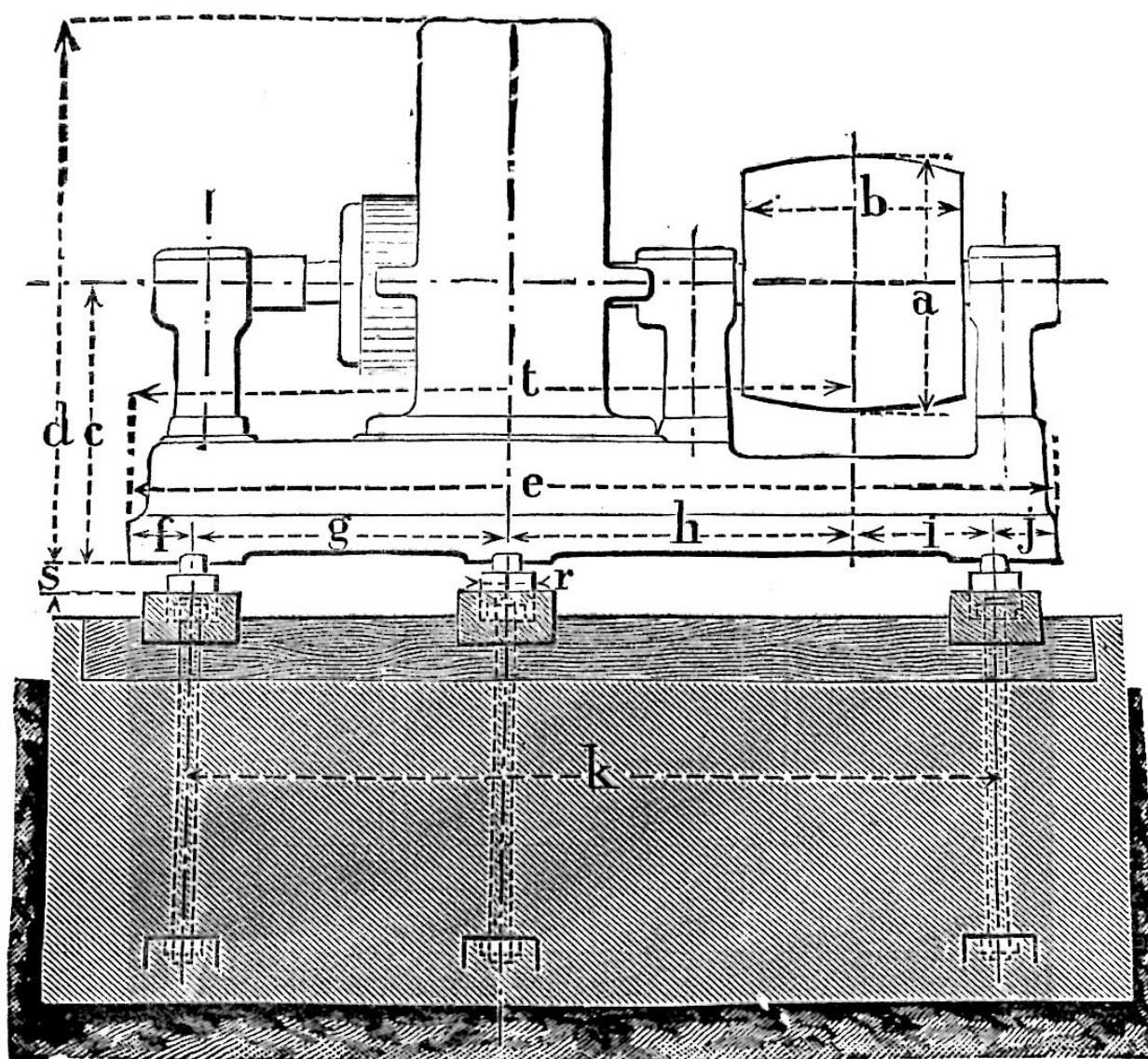


Fig. 66. — Schéma de l'installation d'une dynamo.
(Vue en long.)

tenant en place à l'aide de solides tire-fond ou vis à bois, puis ces madriers sont fixés eux-mêmes sur le socle en maçonnerie au moyen de boulons scellés dans le béton. Les figures 66 et 67 représentent le schéma d'installation d'une machine multipolaire.

On aura soin de noyer dans le bois les écrous des boulons de scellement de manière à ce qu'ils ne puissent toucher nulle part les rails tendeurs. Cette

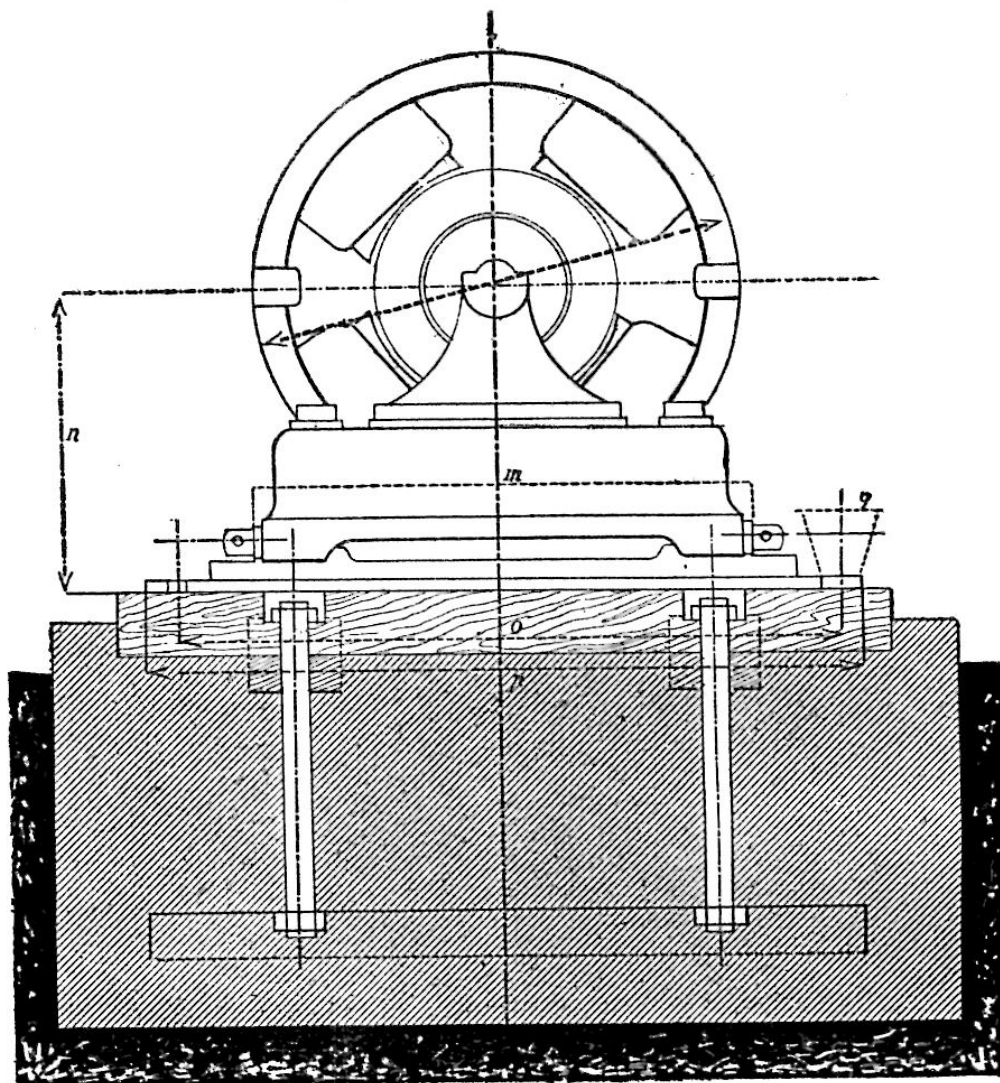


Fig. 67. — Schéma de l'installation d'une dynamo.
(Vue de face.)

façon de procéder assure à la dynamo un bon isolement de son bâti, ce qui évite souvent des avaries provenant de la rupture de l'isolant des fils sous l'action d'élévations accidentelles de tension, surtout si le réseau alimenté par la machine est mal isolé.

La machine sera posée sur les rails tendeurs en s'aidant d'un pont roulant, d'un palan ou à défaut en la faisant glisser sur des madriers formant un plan incliné.

La dynamo étant mise en place, son axe bien paral-

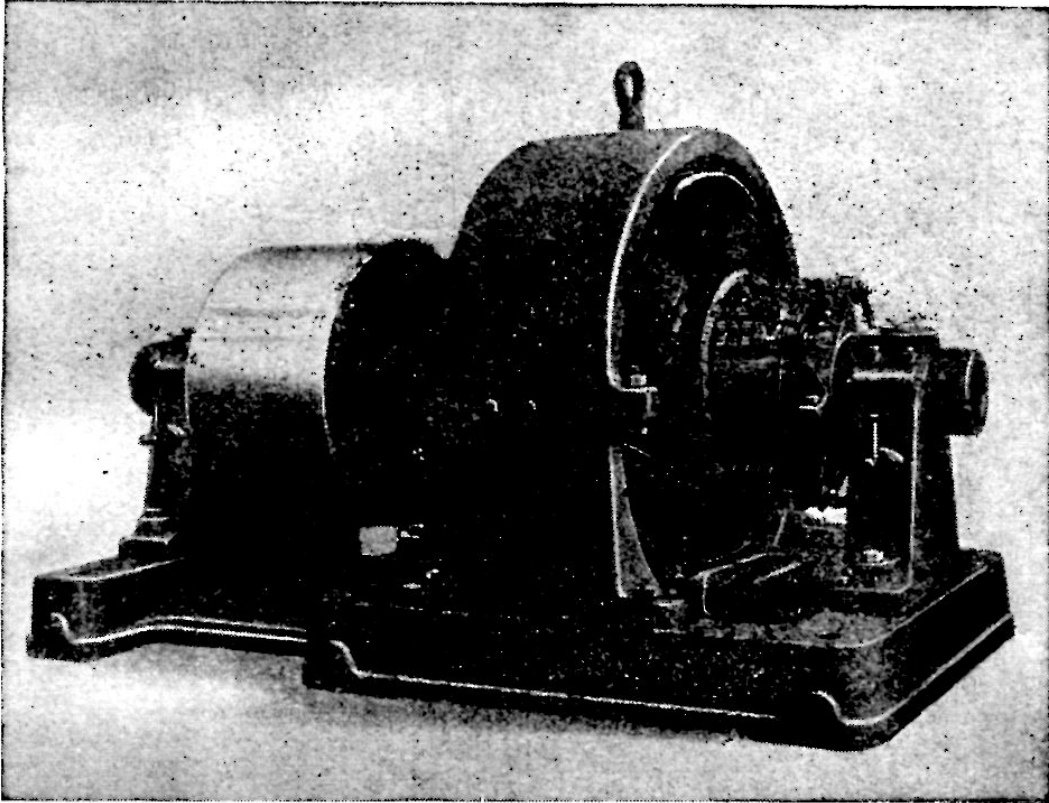


Fig. 68. — Dynamo à 3 paliers.

lèle à celui de l'arbre de commande, les écrous des boulons de fondation étant serrés, il faut s'assurer que l'induit tourne très librement, en lui donnant une impulsion à la main et que l'arbre peut prendre un léger déplacement suivant son axe.

Ce déplacement doit pouvoir s'observer même une fois la machine en marche; loin d'être un défaut, c'est une preuve du bon réglage et du graissage régulier des parties frottantes.

Après avoir mis de l'huile dans les paliers et s'être assuré du bon fonctionnement des bagues de graissage on peut mettre la courroie.

Les courroies à employer avec les machines dynamo-électriques devront être larges et souples, d'épaisseur bien uniforme, ne présentant aucun ressaut à l'intérieur, de façon à éviter tout à-coup dans la marche; elles doivent toujours être modérément tendues, afin de rendre faible l'échauffement des paliers qui tend toujours à se produire; toutefois elles doivent l'être suffisamment pour ne pas exagérer les glissements.

Manœuvres des rails tendeurs. — Nous avons vu que la machine glissait sur deux rails fixés par des tire-fond sur un cadre en bois scellé lui-même solidement dans le sol. Ce mouvement est commandé par quatre vis de butée; il est guidé par quatre boulons fixant la dynamo sur les rails et dont les têtes glissent dans une rainure pratiquée dans ces rails (fig. 62).

Pour tendre la courroie, on desserrera légèrement les quatre boulons fixant la dynamo sur les rails, puis on agira sur les deux vis de butée placées du côté de la commande jusqu'à ce qu'on ait obtenu la tension convenable. Resserrer alors les quatre boulons et ramener les deux autres vis de butée au contact. Il est indispensable de faire tourner chacune des vis de butée du même nombre de tours, afin que le parallélisme avec l'axe de l'arbre de commande ne soit pas détruit par le déplacement de la dynamo.

Réglage des balais. — Il faut donner aux frotteurs en charbon ou aux balais au moyen des vis de réglage des ressorts, une légère pression sur le collecteur. Un excès de pression amène un trop grand échauffement du collecteur et un contact insuffisant occasionne des étincelles.

La pression convenable oscille entre 300 et 150 grammes par centimètre carré de surface frottante.

Lorsque les balais en charbon sont neufs ils n'épousent pas exactement la surface du collecteur; on arrive à rectifier la surface de contact en donnant un mouvement de va-et-vient à une bande de papier verre que l'on place entre les frotteurs et le collec-

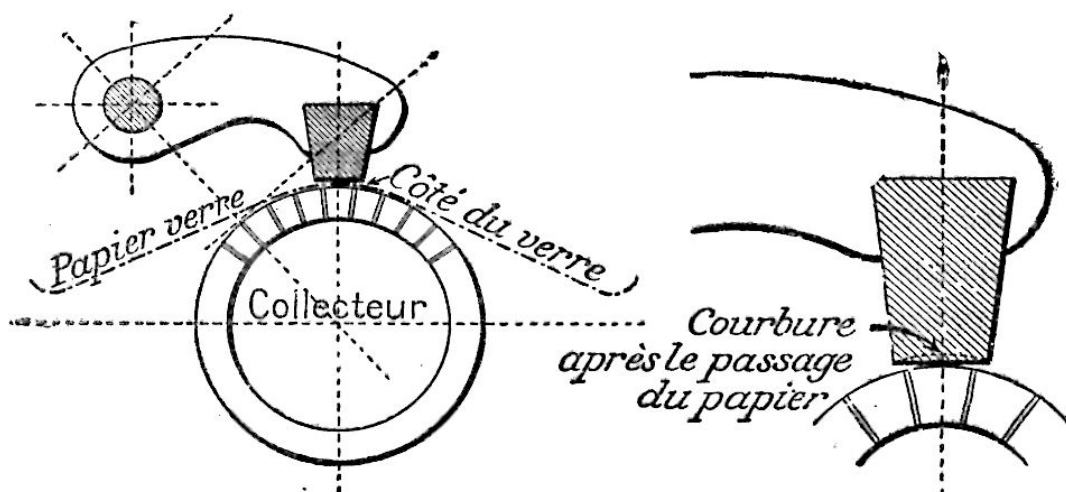


Fig. 69. — Ajustage des balais en charbon sur un collecteur.

teur, la partie recouverte de verre étant tournée du côté des charbons (fig. 68), on use ainsi la surface frottante en lui donnant la forme voulue et la machine est prête à fonctionner.

Mise en marche. — La première mise en marche d'une dynamo doit être l'objet d'une attention toute spéciale. Les vérifications à faire avant la mise en marche sont de la plus haute importance.

On s'assurera :

1° Que les écrous ou les vis fixant les frotteurs en charbon sont bien serrés et que les vis servant à tendre les ressorts sont convenablement réglées, de

façon à ce que les frotteurs restent constamment appliqués sur le collecteur;

2° Que les porte-balais ne risquent pas de toucher la bobine en mouvement;

3° Qu'aucune pièce où circule le courant n'est en contact métallique avec le bâti en fonte de la dynamo;

4° Que tous les interrupteurs reliant la machine aux divers circuits qu'elle doit alimenter sont à la position d'arrêt;

5° Que tous les écrous, bornes et vis, sont serrés à fond;

6° Que la courroie est tendue et bien unie;

7° Que les graisseurs sont remplis d'huile très propre et suffisamment fluide.

Lorsqu'on est sûr que toutes ces conditions sont bien remplies, on peut mettre la machine en marche et on la laisse tourner à vide pendant une heure environ à la vitesse de régime qui est généralement inscrite sur la machine même.

Si aucune partie de la dynamo ne s'échauffe d'une manière anormale, on ferme le circuit d'excitation de ses inducteurs et on s'assure que la machine s'amorce et que le voltmètre relié à ses bornes indique que la tension est convenable.

On commence à charger peu à peu la machine en envoyant le courant successivement à des intervalles de deux à trois minutes dans les circuits qu'elle doit alimenter.

Si la dynamo étant en marche ne donne pas la tension normale, même en manœuvrant le curseur de la résistance d'excitation, cela tient généralement à ce que la vitesse n'est pas convenable, soit que la courroie glisse, soit que le moteur ne tourne pas assez vite.

Il faudra dans ce cas soit projeter de la résine en poudre sur la poulie, soit tendre la courroie, soit, si elle ne glisse pas ou s'il n'y en a pas, augmenter la vitesse du moteur en particulier dans le cas où la

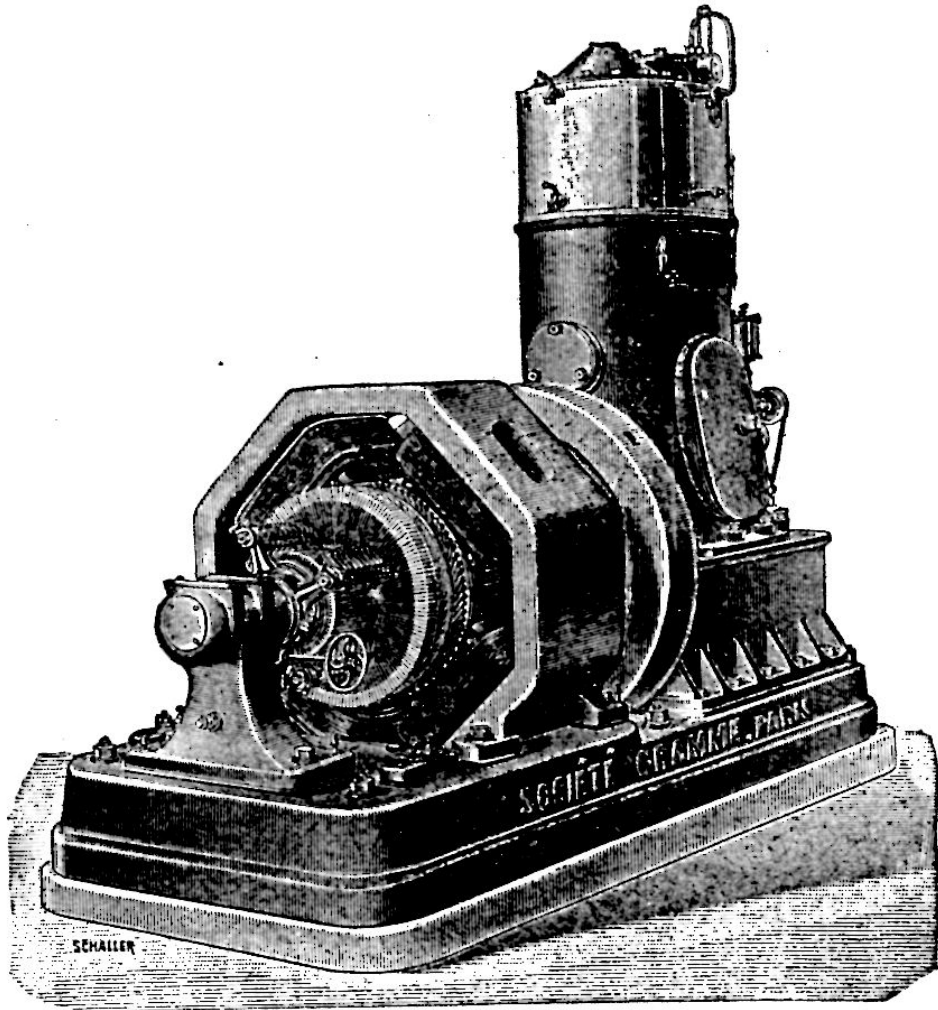


Fig. 70. — Machine dynamo actionnée directement par un moteur à vapeur à grande vitesse.

dynamo est actionnée par une machine spéciale (fig. 70). Il ne faut pas, toutefois, dépasser pour quelque raison que ce soit, la tension normale de plus de 5 % sous peine de détruire très rapidement les lampes à incandescence.

Entretien de la dynamo. — Pendant la marche on ne devra approcher aucune pièce de fer de la machine et, dans le cas où l'on aurait à employer auprès d'elle un outil en fer, le tenir très fortement. Des objets de cette nature peuvent en effet se trouver attirés par les pièces polaires de la dynamo qui sont, pendant la marche, on le sait, de puissants aimants, ils viendraient s'engager dans l'entrefer (espace séparant le fer de l'induit en mouvement du fer des inducteurs) et les pires accidents seraient à redouter.

Il est utile de se munir, pour le graissage, d'une burette en cuivre ou en zinc, celles en fer-blanc étant attirées.

S'assurer de temps en temps que les paliers ne chauffent pas par suite d'un mauvais graissage ou d'une tension exagérée de la courroie.

Avant d'arrêter la machine, mettre à la position d'arrêt tous les interrupteurs.

Toutes les parties de la dynamo devront être entretenues dans le plus grand état de propreté. La poussière, l'huile et surtout la limaille provenant de l'usure du collecteur seront journellement enlevées de la machine. La jonction des fils de l'induit avec les lames du collecteur sera particulièrement tenue nette de toute poussière métallique.

Le nettoyage de la dynamo doit être fait avec des chiffons de toile et non des déchets. La poussière ou les limailles entre les fils devra être enlevée au soufflet.

Le collecteur devra être entretenu parfaitement uni. On le polira fréquemment avec du *papier verre*, jamais avec du papier ou de la toile émeri; s'il est profondément rayé ou déformé, il faudra le tourner

avec un outil tranchant qui ne laisse aucune bavure entre les lames.

Quand la dynamo devra rester pendant un certain temps sans fonctionner, il faudra, après l'avoir bien nettoyée, vider toute l'huile des paliers, graisser les parties en acier poli, fermer soigneusement les couvercles des paliers à bague et recouvrir la machine d'une bâche imperméable.

L'huile la plus convenable pour les paliers de dynamos est l'huile de naphte de densité 0,905.

L'huile recueillie à la partie inférieure du palier peut être employée à nouveau sans inconvénient, à la condition d'avoir été convenablement filtrée.

Les groupes électrogènes. — Pour fournir du courant électrique à une maison, loin de toute distribution d'énergie électrique, pour les armées en campagne, ou pour dépanner une usine on fait usage de groupes électrogènes composés d'un moteur à essence ou mieux à mazout qui actionne par accouplement direct soit une dynamo à courant continu, soit un alternateur.

Grâce à la vitesse angulaire élevée des moteurs à explosion il devient possible de coupler directement le moteur à la dynamo ainsi qu'on peut le voir sur les figures 38, 106 et 107 de notre *Traité pratique d'électricité* (Garnier frères, éditeurs). La seule précaution à prendre est de choisir un moteur pourvu d'un régulateur de vitesse à *action rapide* qui empêche l'emballement de la machine lorsqu'on coupe la charge.

Dans le groupe électrogène de la figure 38, page 61 du *Traité pratique d'électricité* on peut voir à droite un cylindre renfermant un électro-aimant à plongeur dont le rôle est de modérer ou d'accélérer l'arrivée des gaz au moteur quand la charge de la dynamo varie.

CHAPITRE VIII

DÉRANGEMENTS DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

Le mauvais fonctionnement d'une machine-dynamo peut provenir : soit de la dynamo elle-même, soit du moteur qui l'actionne, soit de défauts sur la canalisation électrique qu'elle alimente.

Nous n'envisagerons que les dérangements qui peuvent se produire dans la machine même, qui seuls nous intéressent pour le moment.

Il y a évidemment beaucoup de causes de non fonctionnement et certaines constituent de vrais cas particuliers; nous essaierons de les classer en plusieurs catégories qui permettront de trouver plus rapidement le moyen d'y remédier.

Les défauts constatés peuvent être les suivants :

1° La dynamo ne s'amorce pas et ne fournit pas de courant;

2° Echauffement exagéré de certaines parties de la dynamo;

3° Fortes étincelles sur le collecteur;

4° Bruit et trépidations.

La dynamo ne s'amorce pas. — 1^o *Mauvais contacts.*
— Une des premières causes de non fonctionnement d'une dynamo provient souvent de mauvais contacts dans le circuit d'excitation.

Il arrive fréquemment, en effet, que les vis des bornes sous lesquelles sont serrés les fils des bobines inductrices se desserrent, le fil s'agite dans le trou sous l'action des trépidations et ne touche plus d'une façon continu le corps de la borne, cela suffit pour que la dynamo ne s'amorce pas.

On vérifiera donc avec soin les *bornes et serre-fils* en nettoyant les contacts avec du papier verre et en serrant à bloc toutes les vis; plus ces dernières seront nombreuses et plus on aura de chances de non fonctionnement. On comprend maintenant pourquoi nous avons insisté sur l'emploi des soudures de fils entre eux, ou dans des cosses solidement réunies par des boulons.

Il peut arriver aussi que, par suite des trépidations ou d'un long usage, le fil des bobines inductrices soit cassé, juste à la sortie d'une de ces bobines, et qu'il reste cependant en place maintenu par la gaine isolante. Il semble au premier examen que le courant puisse passer et cependant il existe une solution de continuité. En touchant avec la main les divers fils on trouvera vite ce défaut, car en cet endroit le fil n'a plus sa rigidité et se tortille facilement.

2^o *Magnétisme rémanent faible ou disparu.* — Une dynamo ne s'amorcera pas si les inducteurs ont perdu toute trace de magnétisme rémanent. Cela peut se produire si le métal des inducteurs est très doux et si la machine est restée très longtemps sans fonctionner. Le voisinage d'autres dynamos peut aussi quelquefois, suivant leur position, amener la désai-

mantation des inducteurs de la première. Des accumulateurs chargés par la machine et que l'on laissera se décharger, ne serait-ce que quelques instants, dans la dynamo peuvent produire une inversion des pôles inducteurs empêchant ensuite l'amorçage de la machine, si cette dernière est *série* ou *compound*.

On s'aperçoit que le défaut tient à l'absence de magnétisme rémanent en approchant *au repos* des pièces polaires de la machine des objets légers en fer, s'il n'y a aucune attraction, c'est qu'il n'y a plus trace d'aimantation.

Pour permettre à la machine de s'amorcer on détachera les fils qui vont des bobines inductrices aux balais et on les mettra quelques instants en communication avec les pôles d'une pile ou d'une batterie d'accumulateurs. On rétablira ensuite la communication des inducteurs avec les balais et on remettra la machine en marche; si par hasard la machine ne s'amorçait pas et que toutes les communications soient bien établies, on ferait passer de nouveau le courant dans les bobines inductrices, mais en sens *inverse*.

On indique aussi un moyen rapide d'amorcer la machine qui consiste à mettre les bornes de la machine en court-circuit en les réunissant par un fil de plomb fusible. Mais ce procédé, qui réussit avec une machine à excitation série ou compound, ne vaut rien dans le cas d'une dynamo shunt ou en dérivation, car la mise en court-circuit des bornes d'une telle machine empêche par cela même le courant qui pourrait se produire de passer dans les inducteurs. Pour cette raison encore, si une telle machine ne s'amorce pas, il faut veiller à ce que tous les interrupteurs qui la réunissent au circuit exté-

rieur soient à l'arrêt de façon à ce qu'ils ne dérivent aucun courant.

3° *Porte-balais en court-circuit.* — Il arrive souvent que des limailles de cuivre arrachées au collecteur se déposent et adhèrent aux porte-balais, surtout si ces derniers sont un peu gras. Or, nous avons vu, page 110, que tous les porte-balais d'une machine sont généralement fixés à une couronne ou à des bras dont ils sont isolés par des rondelles de fibre, d'ébonite ou de mica. Les limailles de cuivre ou la poussière de charbon, en se déposant sur ces rondelles, forment un conducteur continu et l'isolement n'existe plus. Cela équivaut à mettre les balais en court-circuit et tout le courant passe par ce chemin court et peu résistant, il n'en circule plus dans les inducteurs et la machine se désamorce ou ne s'amorce pas lorsqu'on la met en marche.

Il suffira de nettoyer à l'essence le porte-balai et de veiller à ce qu'il ne s'y dépose plus de limailles conductrices.

4° *Bobines excitatrices en court-circuit.* — Lorsqu'une machine a travaillé pendant longtemps il peut arriver que, sous l'action des trépidations ou des échauffements exagérés, la gaine isolante des fils des bobines inductrices se désagrège. Si la bobine possède une carcasse métallique, il pourra y avoir contact des fils avec cette carcasse, ou bien les fils entrant et sortant s'ils sont voisins pourront communiquer entre eux. Le courant, choisissant toujours pour passer le chemin le plus court et le moins résistant, sautera d'un fil à l'autre par la carcasse ou par le court-circuit et ne circulera plus autour des inducteurs; la machine ne pourra s'amorcer.

On reconnaît assez bien un semblable défaut dans

une dynamo à l'aide d'une pile et d'une sonnerie électrique *peu résistante*, une de ces sonneries à bon marché que l'on ne rencontre que trop fréquemment aujourd'hui, et dans lesquelles on met le moins de fil possible sur les bobines ou en tout cas un fil assez gros.

En réunissant les bornes de cette sonnerie à l'aide de deux fils aux pôles de la pile elle tintera assez fort. Si on intercale dans ce circuit une bobine inductrice d'une dynamo en bon état, elle tintera faiblement et pourra même à peine vibrer parce que le fil de cette bobine oppose une résistance assez grande au passage du courant, mais si les fils viennent à se toucher dans cette bobine ou à se trouver réunis par la carcasse métallique, la sonnerie tintera presque aussi fort que lorsqu'elle est reliée directement à la pile.

Avec un peu d'habitude on se rendra vite compte si les inducteurs sont en court-circuit ou non, d'autant plus que les machines ont généralement au moins deux bobines inductrices et que l'on pourra faire entre elles des expériences comparatives.

Le seul remède consiste à les dérculer et à changer le fil dont l'isolement est devenu insuffisant.

5° *Les balais vibrent et appuient mal sur le collecteur.* — Nous avons souvent eu l'occasion de constater un refus d'amorçage sur des machines en parfait état, mais dont les balais insuffisamment serrés vibraient sur leur support. Il suffit alors d'appuyer avec la main sur deux paires de balais voisines pour voir la machine s'amorcer. D'autres fois les vibrations tiennent à ce que le collecteur n'est pas très rond ou parce qu'une de ses lames dépasse les voisines, à chaque tour de la machine cette lame soulève les balais et empêche l'amorçage.

Il peut arriver aussi, dans des machines mal entretenues, abandonnées longtemps au repos, que le collecteur sali ou oxydé ne laisse plus passer le courant allant aux balais lorsqu'on remet la dynamo en marche; le seul remède consiste à polir le collecteur avec du *papier verre*, mais jamais avec du papier ou de la toile émeri qui renferment souvent des grains conducteurs s'interposant entre les lames et formant court-circuit. Rien de tel ne peut se produire avec le *papier verre*.

De même si les balais d'une machine ont été accidentellement *déplacés* et ne correspondent plus aux bobines qui sont *au milieu* de l'intervalle polaire, la machine peut ne pas s'amorcer.

Il est difficile d'indiquer une règle fixe pour le calage des balais, car les fils reliant les bobines au collecteur sont fréquemment courbés en arc de cercle et amènent quelquefois la ligne neutre du collecteur presque sous un pôle. Le mieux est de tourner lentement le porte-balai à la main jusqu'à ce que l'on trouve une position pour laquelle la machine s'amorce. Le plus souvent le constructeur indique cette position par un repère qu'il est facile de retrouver.

6° *Circuit interrompu dans l'induit*. — On observe quelquefois qu'une machine ne s'amorce pas par suite de la rupture du fil d'une des bobines de l'induit, le plus souvent ce fil se casse près de sa soudure avec la lame du collecteur, en sorte qu'en tâtant à la main successivement toutes les soudures on a vite fait de trouver le fil rompu.

On ne peut employer, pour rechercher ce défaut, une pile et un galvanomètre ou une pile et une sonnerie comme on le croirait à première vue. Si on

essaie avec ces instruments de voir si le courant passe entre deux lames consécutives du collecteur, on s'aperçoit qu'il circule régulièrement, même si le fil d'une des bobines est rompu. Il suffit de regarder le schéma d'un anneau Gramme pour en connaître la raison (fig. 17). Ne pouvant aller d'une lame à la suivante par la bobine endommagée, le courant circule autour de l'induit et fait le tour par les autres bobines qui lui offrent un chemin plus long, c'est vrai, mais entièrement métallique comme il est facile de le voir.

Il y a un moyen simple, quoiqu'un peu barbare, de trouver rapidement une rupture dans l'induit si l'on peut faire tourner quelques instants la dynamo en réceptrice, c'est-à-dire en lui envoyant du courant continu à la même tension que celui qu'elle produit ou à peu près, provenant soit d'une autre machine, soit d'une batterie d'accumulateurs. Quoiqu'il y ait un fil de rompu, la machine se met à tourner; pendant la marche, on remarque sur le collecteur des étincelles formant un cercle de feu. Au bout de quelques instants on arrête la machine et on observe avec soin le collecteur. Les lames correspondant à la bobine endommagée sont marquées par des *brulures* caractéristiques.

7° *Inversion des fils allant aux inducteurs.* — Une machine que l'on avait envoyée chez son constructeur pour être réparée ne put s'amorcer à son retour, malgré toutes sortes de tentatives et d'essais qui furent faits en vue d'y arriver. Les jonctions de fils entre eux étaient en excellent état, la vitesse de la machine était celle de régime, on constatait au repos l'existence de magnétisme rémanent, etc. On essaya en dernier lieu de croiser les fils allant des balais

aux inducteurs et la machine s'amorça aussitôt.

Après enquête, voici ce qui s'était passé : la dynamo une fois réparée et essayée aux ateliers du constructeur avait été envoyée à l'atelier de peinture. Pour ne pas être gênés, les peintres enlevèrent les fils réunissant les bobines inductrices aux balais et les remirent n'importe comment; ils se trouvèrent justement dans le *mauvais sens* et la dynamo ne put s'amorcer.

Mais pourquoi dans le mauvais sens, nous dirait-on?

On se rappellera que nous avons dit à propos de l'auto-excitation (page 138) qu'une machine fonctionne au début comme une magnéto, à cause du magnétisme rémanent de ses inducteurs; si on envoie dans les bobines inductrices le faible courant que produit l'induit sous l'action de ce magnétisme rémanent et si on a soin de disposer les communications pour que le sens de ce courant soit tel que les lignes de force qu'il va produire s'ajoutent à celles qui existaient déjà, la machine s'amorcera.

Dans le cas précédent, il se trouvait que les jonctions des bobines inductrices avec les balais étaient telles que le courant venant des balais tendait à détruire le magnétisme rémanent; de sorte qu'au lieu de grandir, la force électromotrice que produisait la machine diminuait. En croisant les fils on avait au contraire l'effet désiré et la machine pouvait s'amorcer.

Il peut arriver aussi, lorsqu'on démonte une machine, que l'on oublie de repérer la position exacte des bobines inductrices; en les remontant on pourra les placer sur leurs noyaux dans un sens opposé au sens normal, et le même inconvénient se produira;

il suffira même qu'une seule des bobines soit mal placée pour que la machine ne donne pas de courant.

En faisant circuler dans les inducteurs le courant d'une pile ou d'un accumulateur, on se rendra vite compte, à l'aide d'une petite boussole, si deux pôles voisins de la dynamo attirent la même extrémité de l'aiguille de la boussole ou non. Ils devront attirer l'un la pointe bleue, l'autre la pointe opposée.

Echauffement exagéré de certaines parties de la dynamo. — On constate souvent qu'une dynamo s'échauffe soit régulièrement dans toutes ses parties, soit irrégulièrement. Le premier cas est moins à redouter que le deuxième qui indique un phénomène anormal.

On admet que la température d'une dynamo doit être telle que l'on puisse poser la main dessus et supporter le contact même prolongé (1); dans ce cas on est sûr que la température ne dépasse pas 50° à 60°, ce qui est raisonnable. Lorsque, au contraire, on ne peut appliquer la main, soit sur les paliers, soit sur les bobines inductrices, soit sur l'induit après l'arrêt de la machine, il devient indispensable de rechercher le plus tôt possible la cause de cet échauffement local et exceptionnel.

1° *Echauffement de l'induit.* — Lorsque toutes les bobines d'un induit sont uniformément chaudes, l'élévation de température provient le plus souvent d'un courant trop intense que la machine a dû fournir. Il convient de ne pas surcharger la dynamo

(1) Bien entendu, il s'agit ici des dynamos à courant continu, à basse tension, du genre de celles que l'on rencontre dans la plupart des usines aujourd'hui; il serait dangereux et souvent mortel de faire cette opération sur des machines à haute tension.

et de ne pas dépasser l'intensité de courant indiqué par le constructeur ou du moins pas pendant longtemps.

On devra donc surveiller avec soin l'ampèremètre et éviter que son aiguille aille au delà du chiffre prévu en éteignant au besoin des lampes sur les circuits que la dynamo alimente.

Si on constate que seule une des bobines est brûlante, cela tient à ce qu'elle est en court-circuit soit par suite de la présence d'un grain de limaille entre les touches du collecteur auxquelles elle est reliée, soit parce que les bouts de cette bobine sont dénudés et se touchent. On démontera le collecteur ou bien on isolera et on séparera les fils suivant les cas.

Certaines machines mal construites, il faut bien le dire, s'échauffent à vide, tandis que l'induit ne fournit que le très faible courant demandé par l'excitation. Cela tient à ce que les feuilles de tôle du noyau induit ne sont pas suffisamment isolées, elles laissent passer des courants de Foucault qui circulent dans le fer et l'échauffent. Le seul remède consiste à renvoyer la machine chez son constructeur ou à changer l'induit. Fort heureusement ce défaut est assez rare aujourd'hui.

2° *Echauffement des bobines inductrices.* — On peut avoir besoin de faire produire à une dynamo une tension plus grande que celle qu'elle doit fournir en temps normal, par exemple on peut avoir à charger une batterie d'accumulateurs devant éclairer une usine ou une ville la nuit, après l'arrêt de la dynamo. Tant que la machine éclairera les lampes directement, tout ira bien, mais si on veut charger avec elle la batterie de façon à ce qu'elle puisse plus

tard éclairer ces mêmes lampes, on devra faire donner à la machine une tension bien plus grande, afin que le courant de charge puisse passer et surmonter les résistances que les fils et la batterie lui opposent.

Le phénomène se complique en réalité du fait de la polarisation, mais son étude complète nous entraînerait trop loin. Pour élever la tension de la machine il faudra accroître l'aimantation des inducteurs et par suite le courant d'excitation en agissant sur le rhéostat, mais comme le fer commence à être saturé, il faut quelquefois augmenter beaucoup l'excitation pour élever la tension; cet accroissement de courant fait chauffer les bobines et le seul remède est une ventilation énergique.

D'autres fois on constatera que les bobines s'échauffent plus que de coutume, même avec une tension normale aux balais. Cela tient à ce qu'il y a des spires en court-circuit dans l'une d'elles. On localisera facilement ce défaut à l'aide d'une pile et d'un petit galvanomètre. En observant la déviation de l'aiguille de cet appareil, obtenue en opérant sur une bobine saine, on aura une déviation moins forte qu'avec la bobine endommagée. Il sera nécessaire de retirer cette dernière et de la dérouler; si l'isolant n'est pas trop abîmé, on pourra se contenter de recouvrir la partie dénudée avec de la toile et de refaire le bobinage en séparant les spires qui étaient en court-circuit par des feuilles de mica que l'on maintient en place avec du vernis à la gomme laque. Si l'isolant est carbonisé, on devra changer le fil.

3° *Echauffement des paliers.* — Un accident bien plus fréquent est celui de l'échauffement des paliers provenant de la courroie trop tendue ou du graissage défectueux.

Généralement, les paliers les plus voisins de la courroie s'échauffent plus que les autres; si leur température s'élève outre mesure, il faut, après s'être assuré que le défaut ne provient pas du manque de graissage, détendre légèrement la courroie en agissant sur les rails tendeurs.

Avec les anciens paliers, dont le graissage se faisait par des godets, ces accidents étaient fréquents, soit parce que les godets se vidaient trop vite, soit parce qu'ils étaient bouchés.

Les paliers à bagues ont permis de diminuer beaucoup ces chances de mauvais fonctionnement, mais il faut que les bagues tournent régulièrement et que l'huile ne soit ni trop sale, ni trop boueuse.

Lorsqu'un palier commence à chauffer, le mieux est d'arrêter *tout de suite* la machine; s'il y a impossibilité absolue, il faut essayer de détendre la courroie ou de diminuer la charge, tout en refroidissant le coussinet avec des linges humides qu'on arrose fréquemment.

Quelquefois le défaut provient d'un arbre faussé ou de coussinets trop serrés ou mal alignés à la suite d'un remontage trop hâtif, mais comme l'échauffement se manifeste tout de suite après la mise en marche, il est facile d'y porter remède en donnant du jeu ou en redressant les parties en mauvais état.

Fortes étincelles aux balais. — 1^o *Mauvais calage.* — On peut voir fréquemment des étincelles se former sur le collecteur des dynamos en marche; le plus souvent elles proviennent d'un mauvais calage des balais et il suffit de déplacer les porte-balais pour les diminuer et les réduire presque complètement. Il peut arriver cependant que les balais ne soient pas

tous à la fois sur la ligne neutre. On devra compter le nombre de lames du collecteur et diviser ce nombre par le nombre de pôles. Le résultat obtenu indiquera l'écart que doivent avoir deux porte-balais voisins. Ainsi par exemple une machine bipolaire qui aura 40 lames à son collecteur devra avoir ses balais distants de 20 lames. Si elle est à 4 pôles il n'y aura que 10 lames entre chaque balai; s'il y en avait 11 il pourrait se produire des étincelles que l'on n'éviterait pas en déplaçant le porte-balai général.

On doit chercher à supprimer ces étincelles, parce qu'elles détruisent le collecteur et brûlent les balais; elles agissent comme un outil de tour en laissant derrière elles un sillon profond souvent inégalement creusé.

On remarque, sur bien des machines réglées pour ne pas donner d'étincelles à vide, qu'il s'en produit de nombreuses en charge. On est alors conduit à avancer le porte-balai dans le sens de la rotation, jusqu'à extinction à peu près complète des étincelles. Ce phénomène est dû à la réaction d'induit dont l'effet augmente avec la charge de la machine. Le champ magnétique produit par le courant circulant dans l'induit vient contrarier celui des inducteurs et déplace la ligne neutre ou la région où il ne se produit pas d'étincelles.

Causes des étincelles. — Ce dernier point nous amène à parler des causes qui provoquent les étincelles sur le collecteur. Quoique les phénomènes qui se passent sous le balai soient très complexes, il est un fait certain, c'est que le balai, à cause de ses dimensions, appuie à la fois au moins sur deux touches consécutives du collecteur qu'il met en court-circuit. Si la bobine qui est reliée à ces deux touches coupe

des lignes de force, elle est le siège d'un courant jusqu'au moment où, par suite du déplacement, le court-circuit sera supprimé. Une étincelle de rupture jaillira comme dans un allumoir, plus énergique cependant, au point de brûler les pièces entre lesquelles elle se produit : la lame du collecteur et le balai. Le seul remède est, on le voit, de ne mettre en court-circuit par le balai que des bobines qui ne sont le siège d'aucun courant, c'est-à-dire des bobines passant à égale distance des deux pôles dans une région qu'on appelle pour cela *ligne neutre*.

2° *Surcharge de la dynamo*. — Les étincelles se produisent encore sous les balais lorsque, par suite d'une surcharge, la machine débite un courant plus intense que celui pour lequel elle a été établie. Nous avons vu précédemment qu'il faut se garder de surcharger trop longtemps une machine, à cause de l'échauffement des fils de l'induit qui en résulte; nous répéterons encore cette observation à propos des étincelles qu'il convient à tout prix d'éviter.

3° *Champ magnétique trop faible*. — Certaines machines produisent *toujours* des étincelles; heureusement, elles ne sont pas nombreuses, et les constructeurs scrupuleux évitent de les vendre. On a cherché pendant longtemps la cause de ce défaut; pour la trouver, il a fallu découper les inducteurs à la scie. On a constaté alors la présence de fortes soufflures laissées dans l'acier, qui se coule très mal, et qui suffisent pour étrangler le passage des lignes de force dans les inducteurs. Il en résultait que la réaction d'induit l'emportait et manifestait sa présence par des étincelles.

D'autres fois la mise en court-circuit accidentelle de quelques spires des bobines inductrices, ou de l'une

d'elles, suffit pour amener une dissymétrie dans la distribution des lignes de force; la ligne neutre est déplacée et des étincelles se produisent.

En résumé, il suffit de se rappeler que, pour paralyser la réaction d'induit et avoir une ligne neutre presque immuable, il faut des inducteurs *très puissants* et un entrefer *un peu grand*.

Les inducteurs puissants étoufferont le champ magnétique antagoniste de l'induit, et un entrefer un peu grand offrira une forte résistance au passage des lignes de force de l'induit et les empêchera de venir déplacer la ligne neutre. Ce grand entrefer nuira aussi au passage des lignes de force de l'inducteur; mais comme nous choisissons ces derniers très puissants, il en passera assez pour obtenir la force électromotrice désirée. Le rendement de la machine sera peut-être un peu diminué, mais son fonctionnement sera considérablement amélioré.

C'est en se basant sur ces données que l'on construit les génératrices, dites de « traction », devant fournir le courant nécessaire aux tramways ou aux chemins de fer électriques. Il se produit dans ces applications, au moment des démarrages, de brusques afflux de courant qui feraient constamment *cracher* (1) les balais, c'est-à-dire leur feraient produire des gerbes d'étincelles sans qu'on ait le temps de changer le calage.

Avec ces dynamos le calage reste fixe et, malgré cela, il n'y a pas de différence entre la marche à vide et la marche à pleine charge.

4° *Court-circuit sur l'induit.* — Lorsque deux lames

(1) C'est l'expression consacrée, qui veut dire : produire des étincelles.

du collecteur viennent à se toucher, ou lorsque des spires de fil sont accidentellement en court-circuit dans une ou plusieurs bobines de l'induit, de fortes étincelles se produisent sur le collecteur.

On est vite averti de ce qui se passe par une forte odeur de *brûlé* qui se dégage de la machine, et qui tient à ce que des courants intenses circulent pendant la rotation dans la bobine en court-circuit, qu'ils échauffent au point d'en carboniser l'isolant.

D'autres fois, par suite d'une rupture du fil d'une bobine induite pendant la marche, ou de la cassure d'une soudure du fil avec les lames, il se produit un cercle de feu sur le collecteur, et la machine ne tarde pas à se désamorcer. On retrouve vite la bobine endommagée, grâce aux brûlures dont les traces restent sur les lames correspondantes du collecteur.

5° *Mauvais état du collecteur et des balais.* — Les écrous qui servent à maintenir les lames du collecteur se desserrent quelquefois pendant la marche, surtout s'ils ne sont pas bloqués par des contre-écrous ou autrement; il en résulte que les lames se soulèvent inégalement, et le collecteur ne tournant plus bien rond, les balais vibrent et des étincelles se produisent.

On resserrera énergiquement les écrous, mais il faudra le plus souvent repasser le collecteur sur le tour; on en fera de même lorsqu'il aura fonctionné un certain temps et qu'il présentera des gorges ou des aspérités.

Le meilleur moyen est de le tourner sur place, si l'on peut fixer un petit chariot de tour sur l'un des paliers.

On fera tourner la dynamo à vitesse très réduite, à l'aide d'un petit moteur ou autrement, et on emploiera un outil très coupant en acier trempé. Il faut faire

de nombreuses *passes* (1) et engager très peu l'outil, de façon à enlever peu de métal à la fois. Une fois le collecteur bien cylindrique et bien régulier, on le passe au *papier verre* qui achève de le polir.

La surface frottante des balais doit aussi être arrondie en suivant le procédé indiqué page 173, qui leur permet d'épouser exactement la surface du collecteur.

Bruit et trépidations. — Les dynamos, à cause de la vitesse relativement grande que l'on est obligé de donner à l'induit, produisent souvent du bruit. Les vibrations qui en résultent se communiquent par des murs et charpentes aux édifices voisins d'une façon telle qu'elles ont souvent amené des procès au propriétaire de l'usine où se trouvent ces machines. Nous allons essayer de donner le moyen sinon d'annuler ces trépidations du moins celui de les atténuer.

Le bruit est dû le plus souvent :

1° *Aux joints de la courroie.* — Dans bien des cas les joints qui réunissent les différents morceaux composant une courroie, produisent un choc en battant contre la poulie. C'est pourquoi nous avons recommandé page 172 d'employer des courroies souples ne présentant pas de ressaut à l'intérieur; on conseille dans ce but de coller les joints ou en tout cas de les faire le mieux possible, car ces chocs outre le bruit qu'ils produisent peuvent amener des variations périodiques dans l'éclat des lampes.

2° *Machine mal fixée.* — Les écrous fixant la machine sur ses rails tendeurs peuvent se desserrer

(1) Expression de métier qui veut dire : une couche, en supposant que l'on enlève le métal par couches successives.

à la longue, la dynamo vibre et avec elle son bâti. On recommande de serrer à fond de temps en temps tous les écrous, même ceux des coussinets ou de la poulie qui peuvent laisser les organes en mouvement prendre du jeu; cet inconvénient ne se produit pas si l'on visite soigneusement et fréquemment la machine.

Pour éviter que les vibrations se propagent par le bâti, on a proposé de ménager entre le massif en maçonnerie et le sol qui l'entoure un petit intervalle que l'on remplit de râpure de liège, de tan ou de tout autre corps susceptible d'étouffer et d'empêcher la transmission des trépidations. Naturellement cette précaution doit être prise aussi pour le moteur à gaz ou à vapeur qui actionne la dynamo.

3° *Sifflement des balais*. — Les balais en charbon principalement produisent en frottant sur le collecteur un bruit strident souvent désagréable. Ce bruit est difficile à éviter, il se produit en général d'autant moins que le collecteur est plus poli et les balais mieux taillés. Si on tenait à le supprimer complètement pendant quelques instants pour une raison quelconque, il suffirait de passer le doigt *légèrement* humecté d'huile sur le collecteur. Le sifflement s'arrête comme par enchantement, mais ce procédé n'est pas recommandable, car l'huile et tous les corps gras sont des isolants qui produisent de mauvais contacts et peuvent par suite faire *cracher* les balais, c'est-à-dire leur faire produire des étincelles.

4° *Induit mal équilibré*. — L'induit des petites machines est quelquefois mal équilibré, c'est-à-dire que certaines parties de sa circonférence sont plus lourdes que d'autres; il en résulte que, pendant la marche, la dynamo vibre fortement; on s'en aperçoit

vite du reste rien qu'en posant la main sur le bâti.

Il est facile de se rendre compte par ce procédé que les trépidations varient d'intensité avec la vitesse de la dynamo. Le remède consiste à corriger le défaut d'équilibrage en disposant *solidement* une masse pesante équivalente, de l'autre côté de l'induit où ce défaut est constaté. (Cette masse se loge à l'intérieur des tôles.)

Les Américains emploient un moyen simple et pratique pour résoudre le problème sur les petites machines : ils enfilent sur l'arbre du côté opposé au collecteur une roue pleine en fonte qui est calée solidement sur l'arbre. On fait reposer l'induit par ses portées sur deux traverses horizontales taillées en couteau afin de diminuer les frottements et on le laisse rouler jusqu'à ce que la région la plus lourde s'accuse nettement. On marque la position correspondante sur la roue en fonte et on perce des trous à cet endroit de façon à enlever du métal. On essaye à nouveau l'équilibrage et on continue à percer des trous jusqu'à ce que le métal enlevé représente le supplément de poids qui entraînait l'induit et produisait les trépidations. On peut alors remonter la machine après s'être assuré que la masselotte en fonte ne peut plus bouger et fait bien corps avec l'arbre de l'induit. Les vibrations ne se produiront plus ou seront en tout cas fortement atténuées.

5° *Chocs de sa courroie ou des butées de l'arbre contre le palier.* — Lorsque la courroie glisse sur la poulie ou que ses joints sont mal faits, elle vient frapper périodiquement le palier placé au voisinage; quelquefois aussi par suite du jeu latéral que l'on prévoit dans les machines, jeu nécessaire pour avoir

une usure régulière du collecteur, il se produit des chocs désagréables. On déplacera légèrement la machine ou sa poulie et cela suffira souvent pour faire disparaître le bruit.

CHAPITRE IX

COUPLAGE DES MACHINES

Lorsqu'une machine devient insuffisante pour alimenter un circuit on lui en adjoint une deuxième que l'on couple avec la première. Le cas se produit fréquemment dans une usine ou dans une ville par suite de l'accroissement graduel du nombre de lampes résultant de l'extension des ateliers ou à cause de l'augmentation du nombre des abonnés. Le mode d'association à adopter dépend du but à atteindre et aussi du genre d'excitation que possèdent les inducteurs.

De même que pour les piles on emploie deux modes de couplage : en *tension* ou en *série* et le couplage en *quantité* ou en *parallèle*. Nous n'aurions rien à dire sur ce chapitre et il suffirait de rappeler le couplage des piles si des difficultés particulières ne se présentaient à nous à propos des excitations des machines que l'on veut associer.

Couplages en tension ou en série. — Nous examinerons trois cas :

1^o Couplage en série de deux ou plusieurs machines à excitation série;

2^o Couplage en série de deux ou plusieurs machines à excitation shunt;

3^o Couplage en série de deux ou plusieurs machines à excitation compound.

1^o *Couplage en série de machines excitées en série.* — Ce couplage n'offre rien de particulier; on relie le pôle positif de l'une des machines au pôle négatif de sa voisine et ainsi de suite, sans autre précaution. Comme dans les piles, les tensions s'ajoutent mais l'intensité reste celle que peut fournir une des machines.

Ce système a été très employé en Suisse sous le nom de *système série*; il est dû à un ingénieur de talent M. Thury qui l'a appliqué avec succès à l'utilisation de chutes d'eau éparpillées. On installe une dynamo-série près de chaque barrage et on l'actionne avec une turbine. Ces machines qui sont souvent distantes de plusieurs kilomètres sont reliées en tension à l'aide d'un fil qui va de l'une à l'autre; on obtient dans le conducteur la même intensité que celle que peut fournir une machine prise séparément, mais les tensions des diverses machines s'ajoutent comme la pression de l'eau dans une canalisation où on la refoulerait par des pompes placées en divers endroits (fig. 2).

Ce courant est transmis à travers de grands espaces et va alimenter, dans les villes, des moteurs enroulés eux aussi en série mais munis de mécanismes très ingénieux assurant le réglage de leur vitesse qui reste constante quelle que soit la charge. C'est là que réside toute l'ingéniosité du système qui a en outre sa simplicité comme plus grand mérite.

La figure 71-1 est un schéma de couplage en série de dynamos-série. L'induit est représenté simplement par son collecteur et ses deux balais, l'inducteur est réduit à une bobine de gros fil. C'est du reste ainsi

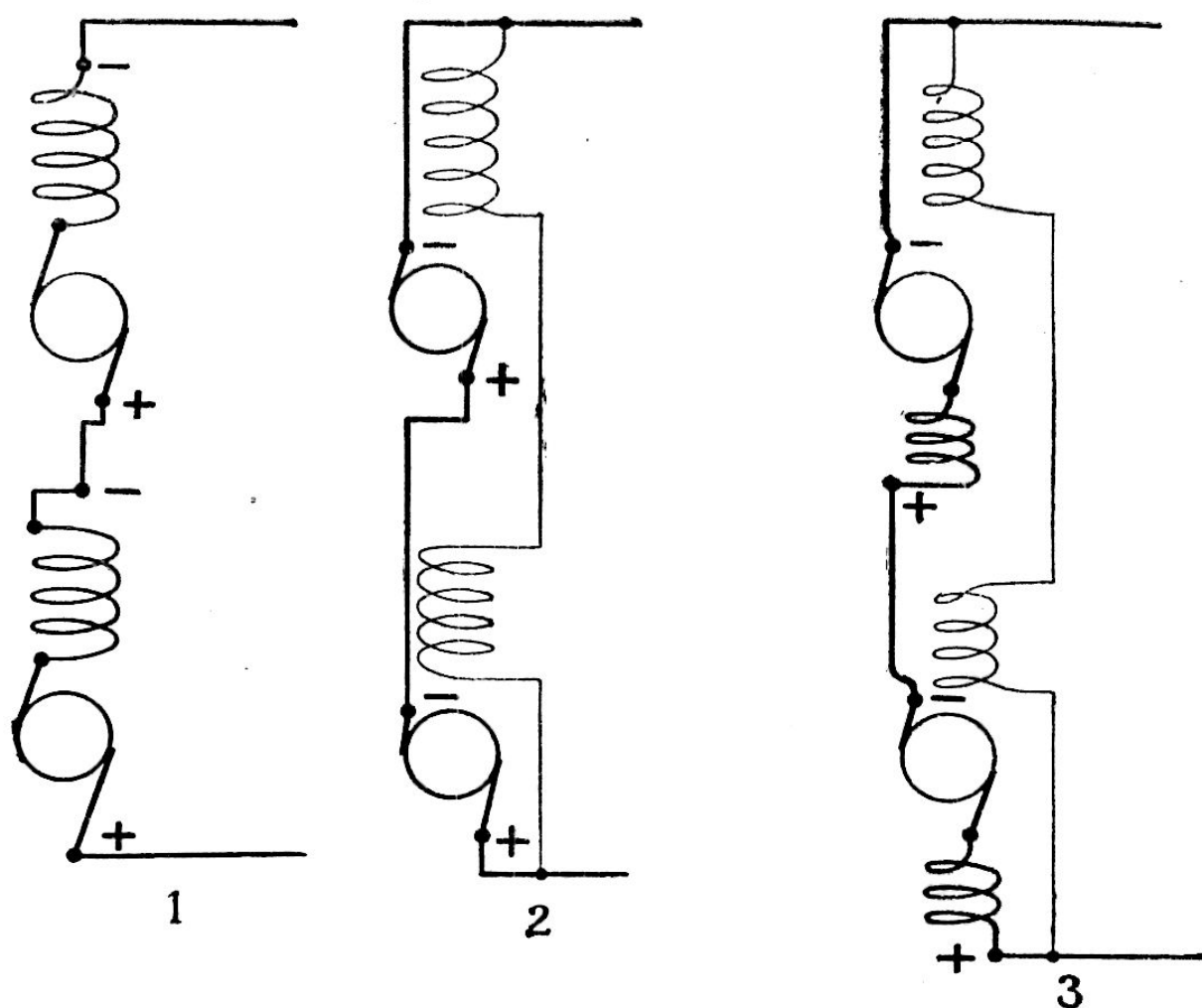


Fig. 71. — Couplages en série des machines dynamo.

que nous représenterons toujours nos dynamos dans les schémas qui suivront.

2^o *Couplage en série de machines excitées en dérivation.* — Si on couplait en série plusieurs machines en dérivation en appliquant la règle bien connue, c'est-à-dire, en réunissant le pôle positif de l'une av

venant de renversements de pôles. Si les inducteurs de l'une des machines sont traversés par le courant provenant de la dynamo voisine une inversion des pôles se produit et, au lieu de s'ajouter, les tensions se retranchent.

Pour éviter ces accidents on réunit séparément en série les induits et les inducteurs comme il est indiqué dans notre schéma (fig. 71-2). Tous les inducteurs sont alors alimentés par le même courant pris sur les fils extrêmes et aucune inversion ne peut se produire. Si une des machines vient à s'arrêter accidentellement elle reste excitée et sa polarité se maintient invariable.

3^o Couplage en série de machines compound. — Ces machines représentent la réunion d'une machine série et d'une machine shunt; leur couplage en série sera donc une combinaison des schémas précédents. On reliera les machines par leurs enroulements à gros fil sans autre précaution que de relier le pôle positif de l'une des machines au pôle négatif de l'autre; les enroulements à fil fin seront montés séparément en tension et reliés aux fils extrêmes (fig. 71-3).

On devra veiller à ce que le sens des lignes de force de ces derniers enroulements soit le même que celui que tendent à produire les enroulements en série. Hâtons-nous d'ajouter que ce couplage est peu employé.

Couplages en quantité ou en parallèle. — Nous examinerons comme précédemment trois cas possibles :

1^o Couplage en parallèle de machines excitées en série;

2^o Couplage en parallèle de machines excitées en dérivation ou en shunt;

3° Couplage en parallèle de machines excitées en compound.

1° *Couplage en parallèle de machines excitées en série.* — Ce couplage s'emploie peu, pour la bonne raison que les dynamos excitées en série sont rarement employées comme machines génératrices, on préfère dans les cas particuliers où on en a besoin les monter en série. Cependant, comme les difficultés que présente ce mode de couplage reviennent dans le groupement analogue de machines compound, nous nous y arrêterons quelques instants.

Le couplage en parallèle ou en quantité de machines excitées en série s'effectue en réunissant ces machines par leurs pôles de même nom, bornes positives ensemble et bornes négatives ensemble; mais il est absolument nécessaire pour avoir un couplage stable que les machines ainsi associées produisent la même force électromotrice.

Ce couplage qui est exact au point de vue théorique ne se maintiendrait pas longtemps en pratique, si l'on n'avait soin de relier aussi entre eux les balais de même polarité comme l'indique le trait pointillé de notre schéma (fig. 72-1).

Supposons pour un instant que cette liaison n'existe pas, tant que les deux machines produiront la même force électromotrice tout ira bien, mais si une des dynamos vient à ralentir, si, par exemple, le moteur qui la commande cale ou diminue de vitesse, la force électromotrice de cette machine deviendra inférieure à celle de sa voisine; elle ne pourra plus fournir du courant à la canalisation, bien au contraire elle recevra du courant de la dynamo voisine qui possède la plus grande force électromotrice.

Les inducteurs seront à ce moment parcourus par

un courant de sens inverse de celui qui les traversait précédemment et les pôles seront changés, cela suffira pour amener les plus graves désordres par suite du courant très intense qui traversera la machine à la suite du renversement de ses pôles.

La liaison pointillée des balais évite ce gros inconvénient, une des machines peut ralentir, la force électromotrice qu'elle produit entre ses balais deviendra plus faible comme précédemment, mais ici le courant

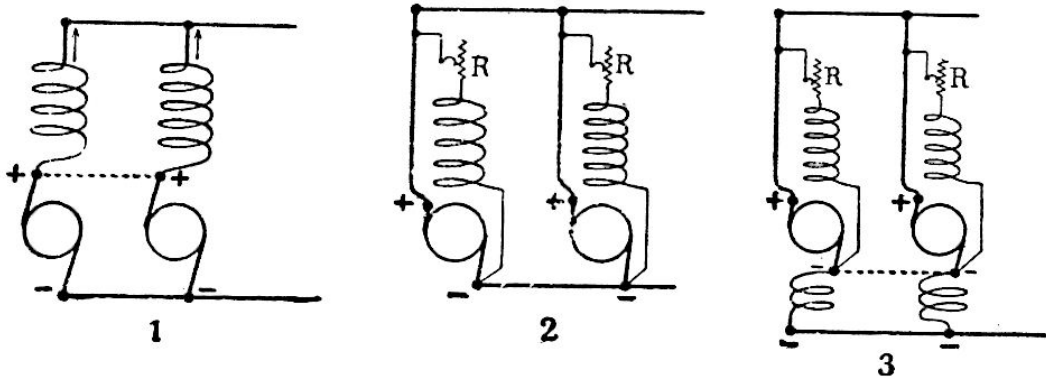


Fig. 72. — Couplages en quantité des machines dynamo.

de la machine à force électromotrice plus forte se déversera dans la plus faible par les fils qui relient les balais, les enroulements à gros fil serviront à faire écouler sur la ligne l'excédent de courant et la polarité restera toujours la même.

2° *Couplage en parallèle de machines excitées en dérivation.* — Plus simple est ce mode de couplage et c'est peut-être aussi celui que l'on réalise le plus fréquemment aujourd'hui.

Nous avons vu précédemment que l'excitation en dérivation était celle qui convenait le mieux à la plupart des applications : éclairage par lampes à arc et à incandescence, charge des accumulateurs, etc. Ce sont des machines de ce genre que l'on a installées depuis de longues années dans les usines particulières

et dans celles qui servent à assurer l'éclairage de beaucoup de petites villes. Dans bien des cas, la machine, choisie au début assez puissante pour l'éclairage que l'on avait en vue, ne pouvait, au bout de quelques années, alimenter les lampes de plus en plus nombreuses qu'on ne cessait d'installer, il a fallu ajouter une autre dynamo et la coupler avec la première, de façon à la soulager.

Le couplage en parallèle des machines shunt se fait très simplement comme l'indique notre schéma, on réunit les machines par leurs pôles de même nom, la seule précaution à prendre est de s'assurer avant d'effectuer le couplage que les machines produisent la même force électromotrice.

De même, lorsqu'une chaudière ne suffit plus pour fournir de la vapeur à une canalisation générale alimentant une usine, on en allume une deuxième que l'on couple avec la première au moment précis où les manomètres placés sur chaque générateur indiquent une même pression; de même, lorsqu'une dynamo excitée en dérivation arrive à sa puissance maxima au delà de laquelle il y aurait danger de la pousser, on en met une deuxième semblable en marche et à l'aide de son rhéostat d'excitation on amène la différence de potentiel qu'elle produit mesurée entre les balais à vide d'un voltmètre, à être exactement la même ou légèrement supérieure à celle qu'indique le voltmètre de la machine en fonctionnement. On peut alors sans danger réunir les machines par leurs balais ou leurs bornes de même nom, bornes positives ensemble, bornes négatives ensemble et le couplage est effectué.

Pour soulager la machine en fonctionnement et faire passer une partie de sa charge sur la première,

il suffit d'agir à la fois sur les rhéostats d'excitation RR de chacune des machines (fig. 72-2), on *augmente* la résistance intercalée dans l'excitation de la machine chargée, tandis qu'on *diminue* la résistance intercalée dans l'excitation de la machine que l'on vient de mettre en marche. Cette manœuvre a pour effet de diminuer la force électromotrice de la première (puisqu'on affaiblit l'aimantation de ses inducteurs), et d'augmenter la force électromotrice de la deuxième. On arrive ainsi, en observant l'aiguille des ampèremètres de chaque machine, à faire débiter à chacune le courant qui leur convient.

Comme il est facile de le voir, ce couplage n'offre aucune difficulté et se réalise toujours très bien, il faut avoir soin cependant de ne fermer l'interrupteur reliant une machine à sa voisine qu'après s'être bien assuré que les deux machines produisent la même tension. Il arrive quelquefois que par inattention l'on ferme l'interrupteur tandis que la machine qu'il commande n'est pas excitée, il se produit alors un vrai court-circuit, tout le courant de la machine en marche se déversant dans la machine qui ne produit pas de force électromotrice, les courroies peuvent sauter ou les fils de l'induit peuvent brûler.

Pour éviter ces accidents et dans le but de confier ces manœuvres à un personnel peu expérimenté, certains constructeurs ont eu l'idée de *verrouiller* les interrupteurs.

Le verrouillage qui s'emploie couramment aujourd'hui sur les signaux de chemin de fer évite les fausses manœuvres; dans le cas qui nous occupe, il consiste à empêcher que l'on ferme l'interrupteur d'une machine la réunissant à sa voisine tant que cette dynamo n'est pas excitée et ne produit pas la

du courant lorsqu'on la fait tourner, c'est alors une génératrice; ou bien elle peut tourner et fournir de la force motrice lorsqu'elle reçoit de l'énergie électrique, elle devient à ce moment un moteur électrique.

Cette merveilleuse propriété fait que l'on rencontre aujourd'hui dans beaucoup de manufactures, des dynamos génératrices alimentant non seulement les lampes de l'usine, mais aussi une légion de petits moteurs ou de petites dynamos identiques à la première, sauf dans ses dimensions et qui donnent la vie à des machines-outils disséminées un peu partout.

Il nous reste à examiner une autre classe de générateurs mécaniques d'énergie électrique, ce sont les machines à courants alternatifs que l'on emploie couramment aujourd'hui quand il s'agit de transmettre l'énergie à des distances un peu considérables. Le courant qu'ils produisent n'a pas toutes les qualités du courant continu qui se prête à une foule d'applications, mais on peut, comme nous le verrons en dernier lieu, à l'aide de machines spéciales passer des courants alternatifs au courant continu. La facile transformation et la facile production des courants alternatifs les ont fait adopter chaque fois qu'il s'est agi d'obtenir en grand l'énergie électrique et d'utiliser de puissantes chutes d'eau.

TROISIÈME PARTIE

LES MACHINES A COURANTS ALTERNATIFS

CHAPITRE I

PRINCIPE DES MACHINES

Les premiers générateurs mécaniques d'énergie électrique basés sur les déplacements d'aimants devant des bobines de fil de cuivre isolé, étaient tous des sources de courant alternatif. Les machines de Pixii et de Clarke, construites vers 1832, d'une simplicité remarquable, représentaient la première application pratique des phénomènes d'induction électromagnétique découverts par Faraday; malgré cela elles n'entrèrent pas dans l'industrie et sauf quelques modifications de ces machines, telles que la machine de Méritens que l'on utilisa dans les phares, elles tombèrent presque dans l'oubli.

Lorsque Gramme, vers 1870, ainsi que Siemens, créèrent les premières dynamos industrielles à courant continu, l'électricité entra enfin dans la voie des

applications pratiques et se développa subitement comme l'on sait. La dynamo à courant continu qui avait provoqué ce mouvement resta à sa tête jusque vers 1889. A cette date, les transports d'énergie à distance commençaient à se développer, et les dynamos à courant continu devenant insuffisantes, on reprit les machines à courant alternatif délaissées depuis si longtemps.

La cause de cet abandon est bien simple : au moment où Faraday fit sa découverte, et lorsque les machines de Pixii et autres furent construites, les physiciens ne se servaient guère, dans leurs laboratoires, que de courant continu fourni par les piles. Le courant alternatif de ces premières machines venait déranger toutes leurs études, et ne pouvant s'en servir, ils les laissèrent de côté. Toute autre est la question industrielle, et depuis que l'on possède d'excellents transformateurs permettant de passer, d'une façon simple, de la basse à la haute tension, et réciproquement, le courant alternatif mérite d'être repris et appliqué. Le principe des machines n'a pas changé depuis Pixii, c'est celui que nous avons exposé chapitre III, page 29; seule, la construction s'est remarquablement améliorée, et nous pouvons dire que l'industrie possède aujourd'hui de nombreux types de générateurs à courants alternatifs, parfaitement construits et bien étudiés; nous allons les passer en revue dans leurs détails, comme nous l'avons fait pour le courant continu.

Principe des machines à courants alternatifs. —

Nous avons vu au chapitre III que le seul fait d'approcher un aimant d'une bobine de fil de cuivre isolé dont les extrémités sont reliées à un galvano-

mètre faisait naître un courant circulant dans le fil avec un certain sens; en éloignant l'aimant, le courant changeait de sens. L'étude de ce phénomène nous a amené à la loi suivante que nous répétons, parce qu'elle est fondamentale :

Toute variation du nombre de lignes de force embrassées par un circuit donne naissance à un courant si ce circuit est fermé. Ce courant est de sens tel qu'il tend à s'opposer à la variation. On en déduit que la durée de ce courant est égale à la durée de la variation, car une fois qu'elle a cessé le courant n'a plus sa raison d'être.

On pourra, en partant de ce principe, réaliser des machines fort simples, la figure 73 en est un exemple.

Un aimant NS est fixé par un de ses pôles, S par exemple à un arbre mis en mouvement par un moteur quelconque, une machine à vapeur par exemple. Sur un bâti fixe MN nous disposerons une bobine B de fil de cuivre isolé relié à un galvanomètre. Cette bobine contiendra un noyau de fer, métal qui, nous le savons, a la propriété de se laisser facilement traverser par les lignes de force magnétiques. Disposons les choses pour que l'aimant en tournant vienne passer devant la bobine à une petite distance de son noyau de fer et examinons ce qui se passe.

Tant que l'aimant occupe la position 1, les lignes de force qui s'en échappent ne rencontrent pas la bobine et rien ne se produit. A mesure qu'il s'en approche, quelques lignes commencent à traverser la bobine et un courant prend naissance dans le fil, il va en augmentant, car le nombre de lignes de force traversant la bobine, qui était nul en 1, devient de plus en plus grand. L'aimant arrive en 2, toutes les lignes de force traversent maintenant la bobine,

il n'y a plus de variation, le courant s'annule.

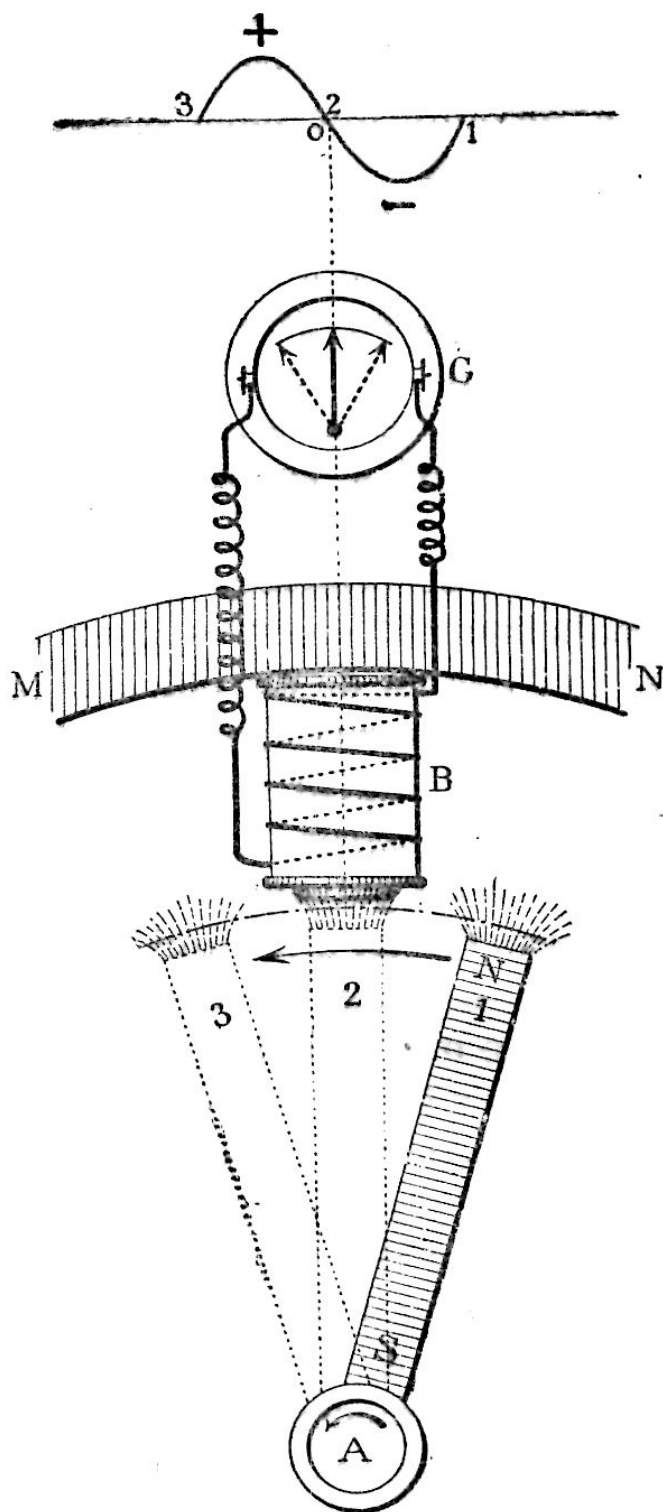


Fig. 73. — Principe des machines à courants alternatifs.

le courant s'annule.

A mesure que l'aimant s'éloigne il passe moins de lignes de force, il y a donc variation dans leur nombre et un courant prend naissance dans la bobine, mais de sens inverse cette fois, car tandis que tout à l'heure il tendait à s'opposer à leur augmentation, il tend maintenant à s'opposer à leur diminution. Lorsque nous serons en 3 il ne passera plus de lignes et le courant s'annulera.

Nous avons représenté au haut de la figure l'allure du courant ainsi qu'on a coutume de l'indiquer. Le zéro est représenté par une ligne horizontale. D'un

côté de cette ligne, vers le bas par exemple, nous

porterons les valeurs des courants correspondant aux diverses positions de l'aimant en 1 et 2 et de l'autre côté, vers le haut, nous porterons les valeurs des courants correspondant aux positions de l'aimant de 2 en 3. Ces valeurs seront lues par exemple pour chaque position de l'aimant sur le galvanomètre G par un opérateur que nous supposerons être assez habile.

La forme de cette courbe est bien connue des mathématiciens, c'est une *sinusoïde*. Nous supposons comme on le fait généralement que les machines donnent un courant dont la courbe est une sinusoïde semblable à celle que nous avons figurée; en réalité bien peu la donnent, car les variations des lignes de force embrassées par les bobines ne sont pas si régulières que nous le supposons, à cause de la forme des aimants, de celle des noyaux de fer, de l'induit, etc. Les efforts des constructeurs à l'heure actuelle tendent à nous donner des générateurs fournissant une sinusoïde aussi *pure* que possible et ce n'est pas chose facile, car il suffit de bien peu de chose pour déformer la courbe.

C'est que l'étude des machines à courants alternatifs si simple à première vue se complique en réalité de nombreux phénomènes qui se répercutent dans les canalisations en y causant les plus graves ennuis, nous ne les envisagerons pas ici, car cela nous entraînerait trop loin et nécessiterait des calculs fort longs et fort ennuyeux pour le lecteur. Nous supposons donc que les machines donnent un courant alternatif de forme régulière et nous nous contenterons d'étudier la construction pratique de ces générateurs.

Définitions. — Reprenons la courbe de courant représentée au haut de la figure 73.

La partie AB de la courbe qui sépare deux changements consécutifs de sens du courant est appelée la *période* (fig. 74).

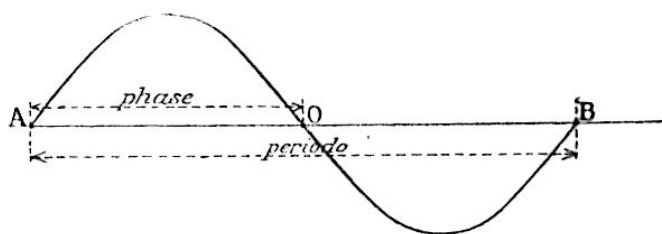


Fig. 74. — Sinusoïde ou courbe des courants alternatifs.

Le nombre de périodes par seconde s'appelle la *fréquence* du courant.

C'est ainsi que telle machine à courant alternatif sera indiquée par son constructeur pour donner une fréquence de 50; cela voudra dire que le courant éprouve 50 changements complets de sens dans une seconde. Telle autre machine aura une fréquence de 25, telle autre de 30, etc.

On appelle *phase* la succession des valeurs que prend le courant entre deux passages consécutifs par zéro, AO représente la phase du courant produit par notre machine d'expérience.

Enfin depuis quelques années, on désigne sous le nom d'*alternateurs* les machines qui produisent des courants alternatifs.

Alternateurs industriels. — Le grand avantage des machines à courants alternatifs, ce qui fait leur vogue actuelle, est l'absence de collecteur. C'est en somme la machine la plus simple que nous puissions imaginer; il suffit de jeter les yeux sur la figure 73 pour s'en convaincre.

Il faut bien le reconnaître, les machines à courant continu sont plus compliquées, le collecteur ou plutôt,

comme on devrait l'appeler, le *commutateur* qui est nécessaire pour redresser les courants dont l'état naturel est d'être alternatif, le collecteur, disons-nous, coûte cher, demande de l'entretien, occasionne parfois des étincelles et se trouve être une source d'ennuis. Il limite de plus la tension que peut produire la machine, à une valeur voisine de 1.000 volts à cause de l'isolement entre lames qui n'est plus suffisant au delà de cette tension.

Les bobines induites des alternateurs peuvent être fixes et bien isolées, elles sont faciles à surveiller et à démonter, leurs extrémités sont reliées à deux bornes et c'est tout.

Cependant, une machine telle que celle de la figure 73 ne serait pas très puissante. D'abord l'aimant inducteur ne pourra jamais posséder une aimantation bien grande, ensuite on ne peut mettre que peu de fil sur une seule bobine.

Dans les alternateurs industriels on emploie à la place des aimants de gros électro-aimants fixés sur le pourtour d'un volant ou d'une roue de façon à pouvoir se déplacer rapidement. Ces électro-aimants reçoivent le courant continu nécessaire à leur excitation d'une petite dynamo placée généralement sur le prolongement de l'arbre de la machine comme il est facile de le voir figure 83.

Les bobines induites, en nombre égal à celui des électro-aimants inducteurs, sont placées à l'intérieur d'une couronne de fonte à des intervalles correspondant exactement à ceux des pôles inducteurs; il en résulte que quand un pôle inducteur quitte sa bobine induite tous les autres pôles inducteurs en font autant.

Il y aura donc simultanéité dans les émissions de

courant et on comprend très bien que les effets puissent s'ajouter, si toutefois on a relié convenablement les bobines entre elles. La figure 75 représente une machine de ce genre à 6 pôles inducteurs alternativement nord et sud. Pour qu'ils produisent un effet utile dans les bobines induites 1, 2, 3, 4, 5, 6, ces dernières sont réunies ensemble de façon à ce que les courants s'ajoutent. Il y a une manière bien simple de s'en rendre compte, c'est de supposer que l'on relie les extrémités A et B du fil à une source de courant continu; en suivant la marche du courant dans les bobines successives et en s'aidant de la règle du tire-bouchon, on voit qu'il se développera sur les extrémités des bobines regardant l'inducteur une série de pôles alternativement nord et sud. Supprimons le courant continu ou plutôt envoyons-le dans les bobines inductrices couplées d'une façon analogue et faisons tourner la machine.

En analysant ce qui se passe pour chaque bobine induite prise séparément, nous verrons par exemple que lorsqu'un pôle nord s'approche de la bobine 2 les lignes de force qui s'échappent de N tendent à entrer dans 2. Or, la loi de l'induction nous dit qu'un courant va prendre naissance dans 2 et son sens sera tel qu'il s'oppose à l'entrée des lignes de force. Il devra pour cela produire des lignes de force de sens inverse, c'est-à-dire sortant de 2 et allant à la rencontre de celles de N. Cela indique, d'après le tire-bouchon (qu'il faut dévisser) un courant tournant en sens inverse des aiguilles d'une montre quand on regarde 2 en se plaçant au centre de la machine.

Il en sera naturellement de même dans les bobines 2, 4, 6, qui tendent à être traversées par des lignes de force émanant des autres pôles N.

Les pôles sud s'approchent en même temps des bobines 1, 3, 5; un courant va prendre naissance dans ces bobines et on devine qu'il sera de sens inverse de celui induit par les bobines N, mais comme ces bobines 1, 3, 5 sont enroulées en sens inverse des

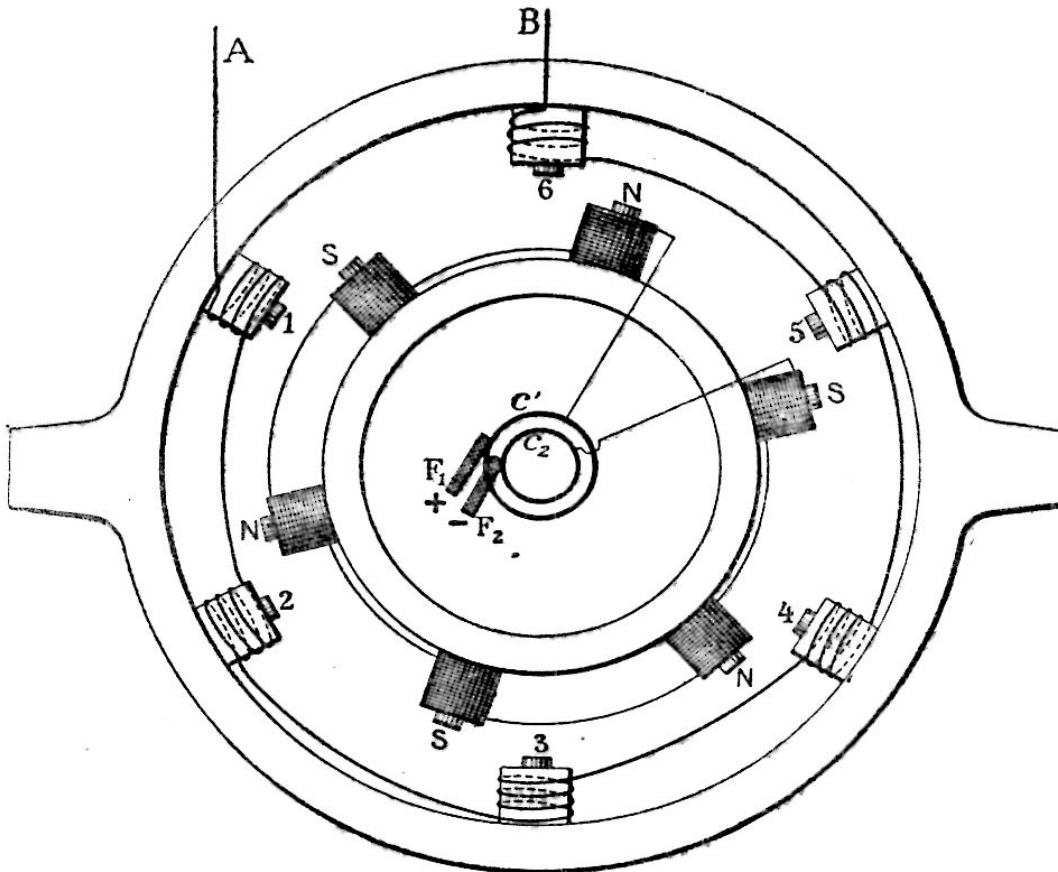


Fig. 75. — Alternateur à six pôles.

bobines 2, 4, 6 et qu'elles leurs sont reliées de façon à ce que les effets s'ajoutent, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte sur la figure, on aura finalement entre les extrémités A et B une tension qui sera la somme des tensions produites par chaque bobine.

C'est comme si nous avions groupé en tension 6 éléments de pile 1, 2, 3, 4, 5 et 6 dont nous changerions les attaches des éléments entre eux un grand nombre de fois par seconde.

On réalise plus simplement la chose dans les alter-

nateurs et l'on obtient du courant sans le secours d'aucun commutateur.

La fréquence, c'est-à-dire le nombre d'inversions par seconde du courant dans une telle machine dépendra du nombre de pôles inducteurs et de la vitesse de la machine, on pourra la calculer facilement dans chaque cas particulier.

On peut se demander comment on arrive à alimenter les bobines inductrices NS avec du courant continu tandis qu'elles tournent. C'est bien simple, on relie les extrémités du fil qui recouvre les électro-aimants en faisant le tour de la machine à deux bagues isolées en bronze C_1C_2 fixées sur l'arbre. Deux frotteurs F_1F_2 appuient sur ces bagues. Si on a eu soin de relier F_1F_2 aux deux pôles d'une source de courant continu, accumulateurs ou dynamo auxiliaire, ce courant sera transmis aux bagues et de là aux bobines NS quelle que soit l'allure de la machine.

Classification des alternateurs. — On peut réaliser des alternateurs de trois manières différentes :

1° En laissant *l'induit fixe* et en faisant tourner le système inducteur;

2° En laissant *l'inducteur fixe* et en faisant tourner l'induit;

3° En employant un inducteur et un induit *fixes* et en faisant tourner entre les deux des masses de fer doux.

1° *Alternateurs à induit fixe.* — Ce sont les plus répandus, la raison en est facile à comprendre : si nous faisons tourner l'induit nous ne pourrions recueillir le courant qu'il produit qu'à l'aide de bagues tournant avec lui et sur lesquelles frottent des balais, ce système qui est commode pour de basses tensions

devient délicat s'il s'agit de tensions un peu élevées comme on en fait produire aujourd'hui aux alternateurs. De plus, l'isolement des bobines induites est plus facile à assurer et à surveiller sur un induit fixe que sur un induit mobile. Enfin la force centrifuge qui exige des attaches solides des fils sera plus facilement combattue si on emploie des inducteurs à pôles boulonnés sur un volant comme on le fait aujourd'hui, ainsi que nous le verrons plus loin.

2° *Alternateurs à induit mobile.* — Les premiers alternateurs industriels créés vers 1889 étaient calqués sur les machines dynamo à courant continu, aussi avait-on pris des inducteurs fixes et un induit mobile. Pour les raisons d'ordre pratique que nous venons d'exposer on n'emploie plus ces alternateurs, du moins pas pour les grosses puissances, nous n'en signalerons que quelques petits spécimens qui dérivent directement de la dynamo à courant continu.

3° *Alternateurs à induit et inducteur fixes.* — Ce système bien séduisant, puisque aucun des circuits électriques n'est en mouvement, a eu son moment de vogue mais on l'a un peu abandonné aujourd'hui parce que le courant qu'on obtient avec lui est loin d'avoir comme courbe une sinusoïde parfaite; nous avons vu que c'était, au contraire, ce que l'on cherchait à cause des perturbations provoquées dans les canalisations par des courants alternatifs de formes de courbes variées.

En principe pour réaliser un tel alternateur on dispose les bobines inductrices et induites en regard et à une certaine distance les unes des autres. On excite les bobines inductrices à l'aide d'un courant continu et on fait passer entre les systèmes induit et inducteur des palettes de fer doux portées par une roue.

C'est en somme comme si nous prenions un alternateur de la forme de celui de la figure 75 et que nous arrêtions les bobines inductrices en regard des bobines induites. Supposons que par construction il y ait un assez grand *entrefer*, c'est-à-dire assez de jeu entre les noyaux de fer d'une bobine inductrice et de la bobine induite qui lui fait face. Disposons sur une roue autant de palettes de fer doux qu'il y a de pôles et faisons-les passer rapidement entre les bobines inductrices et induites.

Les lignes de force qui circulaient difficilement d'une bobine à l'autre à cause de l'intervalle d'air assez grand qui sépare les noyaux trouveront un passage facile lorsqu'une palette de fer s'interposera. Ce fer formera un pont qui laissera passer brusquement les lignes de force à travers la bobine induite. Il y aura variation du nombre de ces lignes et nous savons que toute variation de ce genre est liée à la production d'un courant.

Ce courant sera alternatif, car tandis que la palette s'approche, le nombre de lignes de force qu'elle laisse passer va en augmentant puis lorsqu'elle s'éloigne, le nombre de lignes de force va en diminuant. Ces phénomènes se répétant à la fois dans toutes les bobines grâce à l'espacement des palettes que l'on a supposées convenablement écartées, on voit que les courants pourront s'ajouter tout comme dans notre alternateur de la page 217. Avec un tel système il n'y a plus aucun collecteur, seulement 4 bornes que l'on peut isoler aussi soigneusement que l'on veut : 2 bornes de circuit induit et 2 bornes de circuit inducteur; c'est la machine électrique la plus simple, malheureusement pour la raison indiquée plus haut et pour d'autres encore, on l'emploie peu.

CHAPITRE II

ALTERNATEURS A COURANTS TRIPHASÉS

Tandis que l'exposition de 1889 ne renfermait qu'un très petit nombre de machines à courants alternatifs simples, celle de 1900 n'était pas mieux partagée à ce point de vue. Le développement des *courants alternatifs triphasés* a, en quelque sorte, arrêté l'essor des alternateurs simples dont nous venons de voir le principe.

Il n'y avait, en effet, à l'Exposition de 1900 que sept alternateurs ordinaires contre plus de soixante à courants alternatifs triphasés. Cet abandon tient à ce que, grâce aux progrès réalisés pendant ces dernières années, les courants triphasés possèdent non seulement les mêmes qualités et tous les avantages des courants alternatifs simples, mais encore ils en possèdent un grand nombre d'autres pour la production de la force motrice, son transport à distance et la transformation facile en courant continu.

Mais comment obtient-on des *courants triphasés*?

Principe des alternateurs à courants triphasés. —
Considérons un alternateur à six pôles du genre de

celui de la figure 75, on peut voir que les bobines induites sont assez espacées l'une de l'autre. Plaçons entre deux de ces bobines, deux autres bobines iden-

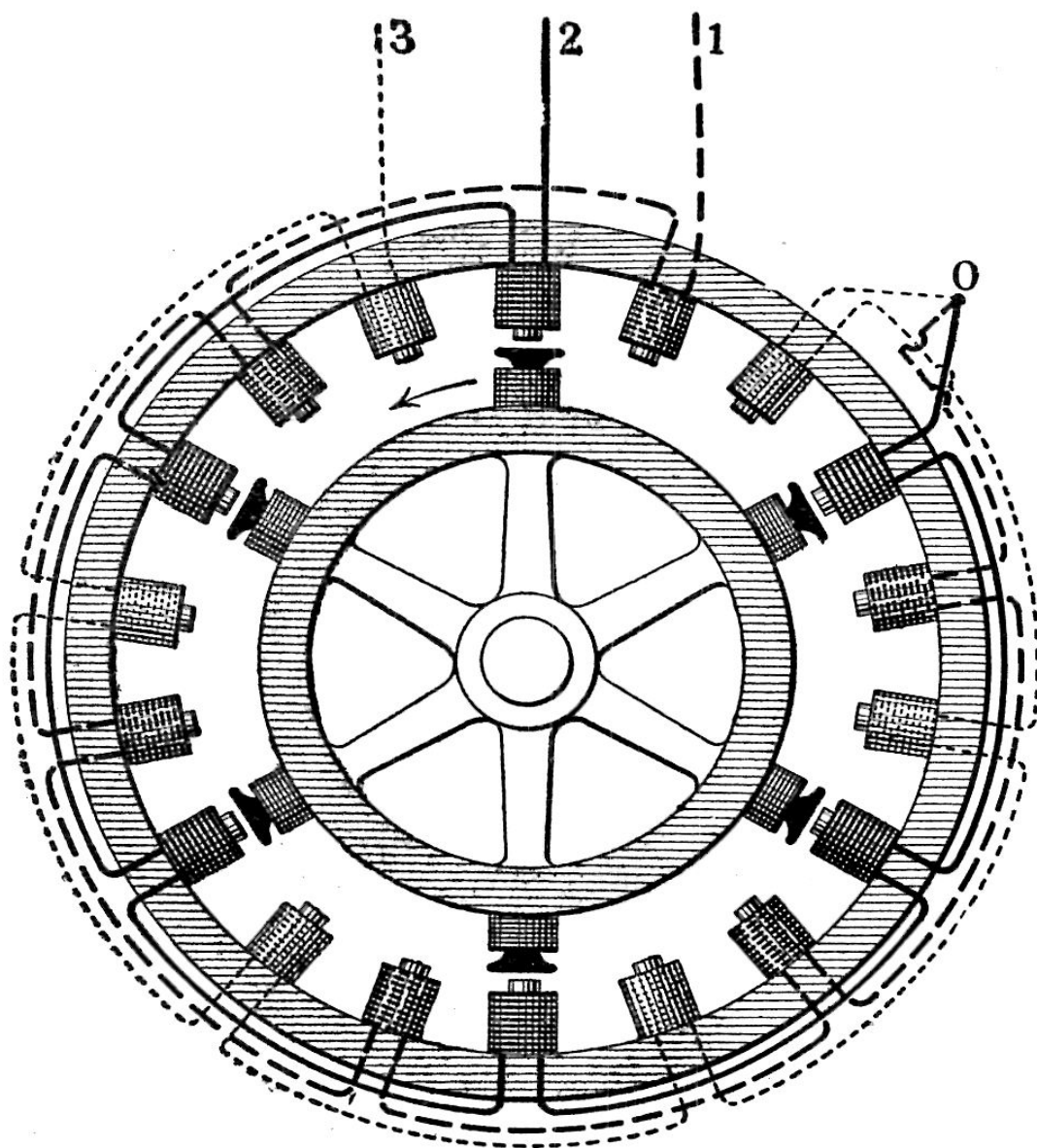


Fig. 76. — Principe des alternateurs à courants triphasés.

tiques et répétons l'opération entre toutes les bobines de notre alternateur (fig. 76).

Nous pourrions relier les fils de ces deux nouvelles rangées de bobine de façon à constituer deux circuits distincts, comme l'indique la figure.

Ces deux nouveaux circuits et l'ancien constituent en somme trois alternateurs dans le même : nous avons :

- | | |
|--|---------------------|
| 1° Le circuit 1 figuré en traits espacés | — — — |
| 2° Le circuit 2 | — pleins ———— |
| 3° Le circuit 3 | — pointillés |

Lorsque nous ferons tourner le système inducteur ses bobines passeront successivement devant les circuits 1, 2 et 3 dans lesquels elles induiront des courants alternatifs.

Ces trois courants alternatifs ne se produiront pas au même instant, mais à un très petit intervalle qui sera de un *tiers de la période* du courant de l'alternateur primitif puisqu'il y a deux bobines intercalées entre celles de l'alternateur simple.

Comme on le voit, la machine sera mieux utilisée; c'est déjà une des raisons qui fait préférer les alternateurs triphasés. Chacun de ces circuits pris séparément donne du courant alternatif simple, mais pendant un tour complet de l'inducteur on voit qu'il a provoqué trois fois plus d'émissions de courant que précédemment.

Si nous représentons les courbes des trois courants (fig. 77), nous aurons trois sinusoïdes enchevêtrées, mais avec un peu d'attention nous reconnaitrons vite chacune d'elles. Supposons que le système inducteur de l'alternateur triphasé (fig. 76), tourne en sens inverse des aiguilles d'une montre, on voit que ses pôles passeront successivement devant les bobines correspondant au circuit 1 (— — —) puis au circuit 2 (———) et enfin au circuit 3 (... ..). La période étant l'intervalle qui sépare deux changements de sens, intervalle qui est le même dans cha-

cun des trois circuits, on voit que l'on aura trois phases successives 1, 2, 3, séparées par un tiers de

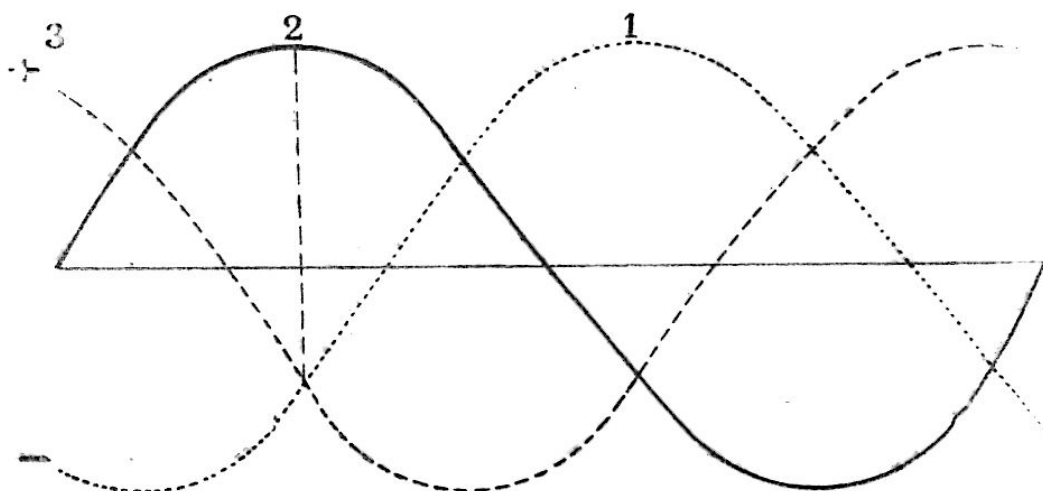


Fig. 77. — Diagramme des courants triphasés.

période; c'est de là qu'est venu le nom de *triphases* donné à ces courants (1).

Couplage des circuits. — Ces trois alternateurs concentrés dans le même vont nous conduire à employer six fils qui seront bien gênants pour la transmission des courants à distance.

En réalité on n'en emploie que trois, on relie les trois autres bouts entre eux comme nous l'avons représenté en O et ce point est appelé le *point neutre*. On peut combiner ces trois circuits de deux façons différentes; ou bien réaliser avec eux le montage en étoile (fig. 78), c'est ce que nous venons de faire, ou bien le montage en triangle. Avec chacun de ces cas on n'a besoin que de trois fils. Sur les alternateurs on

(1) Une remarque curieuse résulte de l'examen attentif des courbes, c'est qu'à un instant quelconque, la somme des intensités des trois courants est nulle. Au moment où 2 passe par le maximum positif, par exemple, on voit que 1 et 3 sont au-dessous du zéro et que leur intensité est la moitié de celle de 2, mais de signe contraire, la somme sera nulle. etc.

emploie de préférence le montage en étoile, car il évite les *courants de circulation* qui se produisent quelquefois avec le triangle lorsque la symétrie n'est pas parfaite.

Nous avons vu à propos des induits multipolaires en quantité des machines à courant continu qu'il circulait des courants analogues à l'intérieur de la machine, quand on reliait entre eux certains points de l'induit qui théoriquement étaient parfaitement

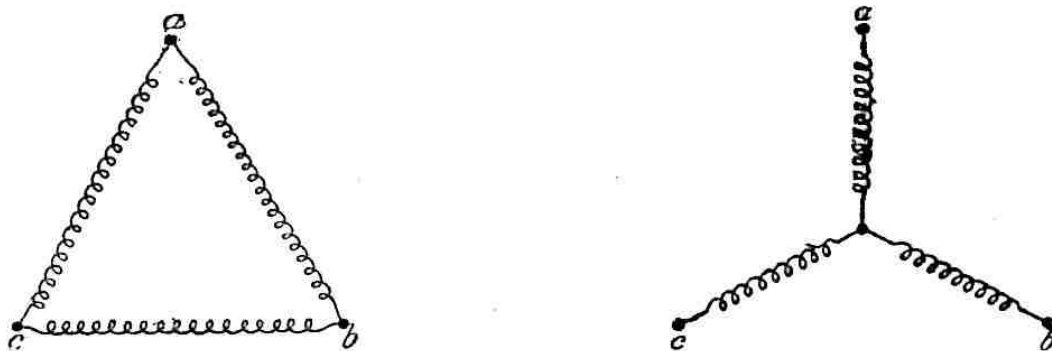


Fig. 78. — Couplage des circuits d'un système triphasé.

symétriques et en réalité ne l'étaient pas. Il en est de même avec les alternateurs triphasés et pour cette raison et pour d'autres encore d'ordre économique on adopte le montage en étoile.

Le montage en triangle est employé pour le groupement des transformateurs entre eux, quelquefois sur des moteurs et enfin par construction sur certains alternateurs ou transformateurs que nous étudierons plus loin et qui résultent de l'emploi de machines à courant continu.

Propriétés des courants triphasés. — Une première propriété des courants triphasés est celle que nous avons indiquée au bas de la page 224, mais il en existe une autre bien plus importante, qui les a fait

tout de suite adopter et qui réside dans la facilité qu'ils procurent de donner des champs tournants.

Considérons une carcasse de moteur par exemple dans laquelle nous aurons fixé trois bobines montées

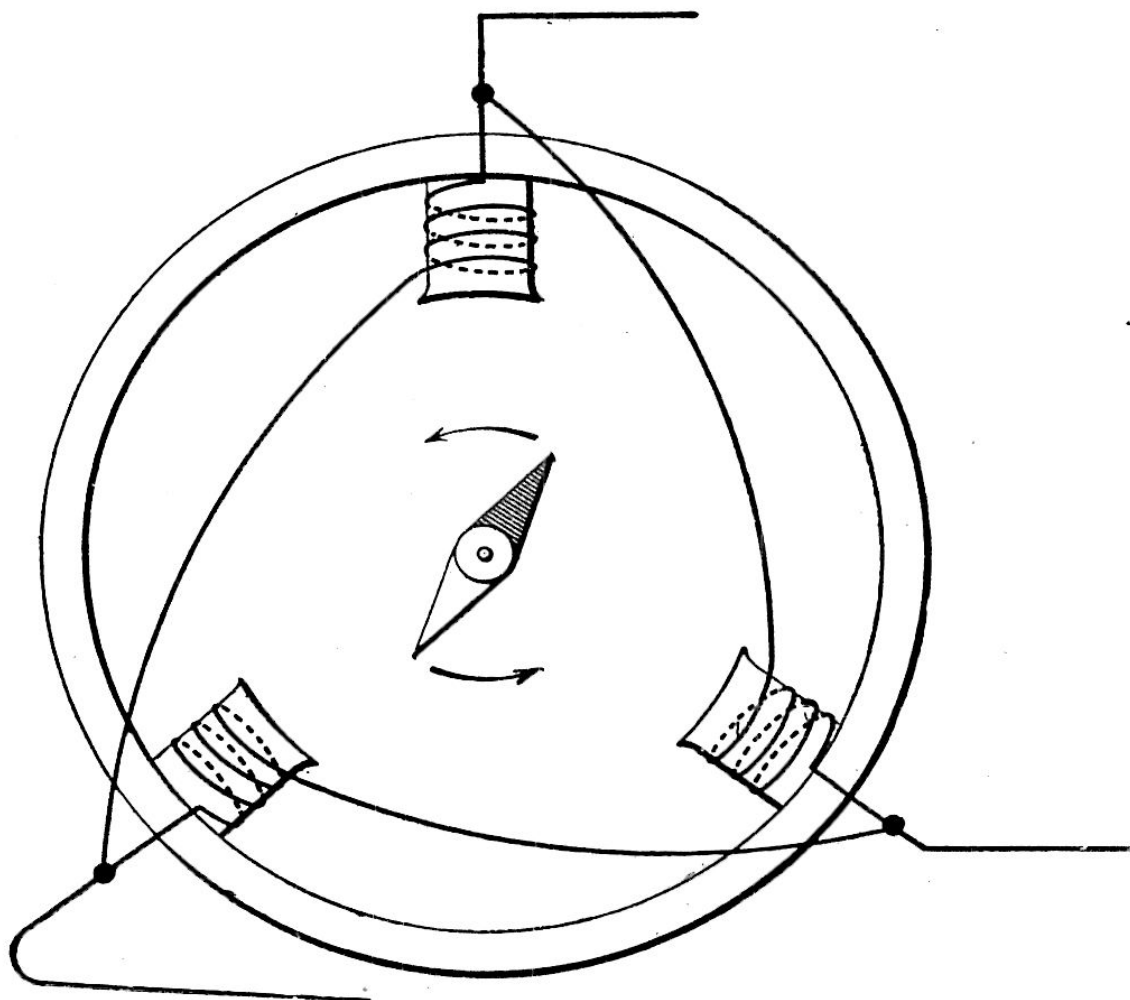


Fig. 79. — Production d'un champ magnétique tournant au moyen de courants triphasés.

sur trois noyaux de fer (fig. 79). Si nous envoyons du courant alternatif dans l'une d'elles, et si nous plaçons au centre une petite aiguille aimantée assez légère pour se mouvoir rapidement, on la verra se déplacer d'un mouvement alternatif. En effet le courant fait naître dans l'extrémité de la bobine tantôt un pôle nord et tantôt un pôle sud, qui agiront alternative-

ment sur l'aiguille. Couplons maintenant nos trois bobines en étoile ou en triangle et relions les trois fils qui en résultent à un alternateur triphasé en fonctionnement.

L'aiguille va tourner d'un mouvement rapide.

Pourquoi cela? — C'est bien simple : les courants triphasés feront naître à un certain moment un pôle nord à la bobine supérieure, puis un tiers de période après, un pôle nord dans la bobine de gauche et un tiers de période après un autre dans la bobine de droite, puis les phénomènes recommenceront, l'aiguille suivra ce pôle en lui présentant toujours une de ses pointes, cela l'obligera à tourner, c'est la cause du mouvement que nous constatons.

Voilà déjà un moteur bien simple sans balai ni collecteur, il ne reste qu'à le perfectionner, et c'est chose faite aujourd'hui. La rotation de l'aiguille aimantée nous indique ici la présence d'un champ magnétique tournant. On arriverait en effet au même résultat en faisant tourner autour d'elle un aimant ou un électro-aimant, mais le procédé est moins élégant que celui qui résulte de l'emploi de courants triphasés. En réalité pour avoir un champ magnétique réellement tournant qui ne saute pas par saccades d'un pôle à l'autre, on multiplie les bobines et on obtient un champ plus régulier se déplaçant avec une vitesse qui dépend de la fréquence des courants et auquel on fait entraîner, non plus une aiguille aimantée, mais un noyau de fer aimanté par des courants induits dans des barres en cuivre qui le traversent. Le moteur ainsi réalisé est idéal, car il ne comporte ni balais ni collecteur, simplement deux paliers et des bobines fixes faciles à surveiller.

CHAPITRE III

CONSTRUCTION PRATIQUE DES ALTERNATEURS

1° Alternateurs à induit fixe.

Nous avons vu que l'on divisait les alternateurs industriels en trois classes : 1° ceux dont l'induit est fixe; 2° ceux dont l'induit est mobile; 3° ceux dont l'induit et l'inducteur sont fixes tous les deux. Les alternateurs appartenant à la première catégorie sont les plus répandus et tendent même à prendre la place des autres; aussi est-ce par eux que nous commencerons notre étude.

Les alternateurs à induit fixe ont presque toujours des inducteurs à pôles rayonnants que nous examinerons tout à l'heure; l'induit peut être constitué, soit par des pôles rayonnants analogues à ceux que nous avons représentés dans les figures précédentes, soit par des bobines encastrées dans des encoches comme les induits à tambour multipolaire de nos machines à courant continu.

Les induits à pôles sont plus faciles à établir et

plus robustes que les autres, car ils permettent un montage très solide des bobines (fig. 80).

Les premiers alternateurs Ganz, Hillairet, etc., qui fonctionnent encore étaient ainsi organisés. Cependant on a été obligé d'abandonner leur construction pour plusieurs raisons : d'abord la courbe du courant que l'on obtient avec eux est loin de ressembler à une sinusoïde, elle

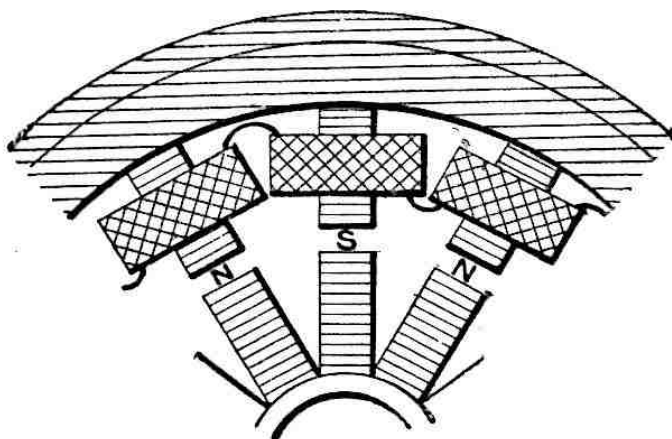


Fig. 80. — Alternateur à pôles.

affecte une forme pointue, très irrégulière, particulièrement en charge et nous savons que l'on a le plus grand intérêt à se rapprocher de la sinusoïde pure. Ensuite il est très difficile d'obtenir une marche à peu près silencieuse, car les pôles agissent comme les aimants, de gigantesques récepteurs téléphoniques et le bruit qu'ils émettent est souvent très intense et s'étend assez loin.

Les induits à encoches (fig. 81) se font en employant une couronne en fer doux feuilleté, c'est-à-dire formée de feuilles minces de tôle de 3 à 4 dixièmes de millimètre d'épaisseur séparées chacune de sa voisine par une feuille de papier ou par du vernis. On doit ici chercher à éviter les courants de Foucault, plus encore que dans les induits à courant continu qui sont soumis pendant le même temps à un moins grand nombre d'inversion du champ magnétique que les induits d'alternateurs. Si l'alternateur a un diamètre trop grand pour que la couronne induite puisse être

découpée dans une tôle d'un seul morceau, on le construit en assemblant des quarts ou des sixièmes de circonférence en tôle découpée et en faisant chevaucher les joints en vue d'avoir plus de rigidité et une masse de fer plus compacte.

Les tôles sont fortement serrées par des boulons, après que les encoches qui ont été découpées en même temps que la tôle, auront été mises bien en regard. On adoucit à la lime l'intérieur des encoches afin d'enlever les bavures qui pourraient détériorer l'isolant des fils.

Enroulement simple. — Examinons le cas d'un

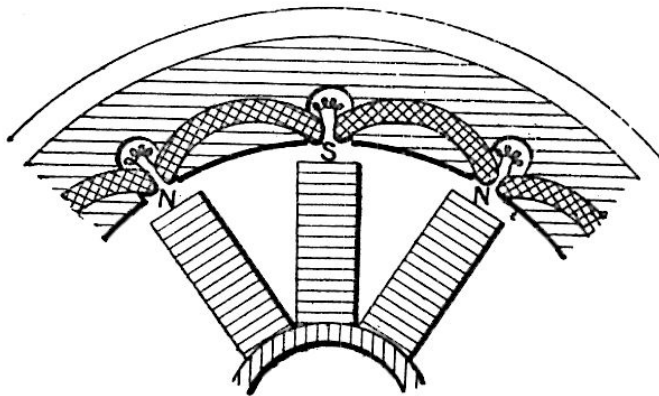


Fig. 81. — Alternateur avec induit à encoches.

alternateur à courant alternatif ordinaire, de tous le plus simple. Nous disposerons les bobines dans deux encoches consécutives que l'on a eu soin de percer à une distance égale à

l'écartement polaire des inducteurs. Dans chaque trou nous logerons le côté d'une des bobines et celui de sa voisine. Chaque bobine correspondra à un pôle, comme dans les alternateurs à pôles saillants, il n'y aura, en somme, de changé que la construction (fig. 81).

Les bobines ayant toutes la même dimension pourront se faire à l'avance sur gabarit comme les bobines des induits multipolaires; on les emboîtera dans les encoches ainsi qu'il est indiqué, en ayant soin de réunir convenablement les fils comme dans l'alternateur à pôles de la figure 75.

Pour maintenir les bobines dans leurs encoches et les empêcher de s'en échapper sous l'action des trépidations, on force dans l'ouverture du trou une cale de bois qui comprime les paquets de fils dans le fond des encoches et les y maintient solidement.

Enfin en vue d'assurer un bon isolement des différentes bobines, celles-ci sont enroulées avec du fil de cuivre recouvert de coton imprégné de vernis. Chaque bobine est recouverte de plusieurs épaisseurs de toile huilée spéciale dans le cas des alternateurs ordinaires; elles sont passées dans des tubes en micanite ou en ébonite (caoutchouc durci) dans les alternateurs destinés à fournir de hautes tensions.

Enroulements triphasés. — Les induits à encoches se prêtent très facilement à l'enroulement triphasé, il suffit de percer trois encoches par pôle inducteur et de les répartir à égale distance sur la couronne induite.

Nous avons représenté figure 82 un alternateur triphasé à 8 pôles, il y aura 3×8 soit **24** encoches pratiquées dans les tôles induites. Bien entendu nous aurions pu de même représenter un alternateur à 60 pôles comme on en rencontre fréquemment et la disposition aurait été la même, mais pour avoir plus de clarté nous nous sommes arrêté à un alternateur à 8 pôles seulement.

Nous devons avoir trois circuits distincts comme dans l'alternateur triphasé de démonstration de la page 222. Ces trois circuits occupent des encoches successives toujours dans le même ordre.

Nous avons représenté les différentes bobines par trois séries de traits :

Les bobines en traits pleins ——— constituent le circuit 1;

Les bobines en traits interrompus — — — constituent le circuit 2;

Les bobines en traits pointillés constituent le circuit 3.

Ainsi que l'on peut s'en rendre compte sur la

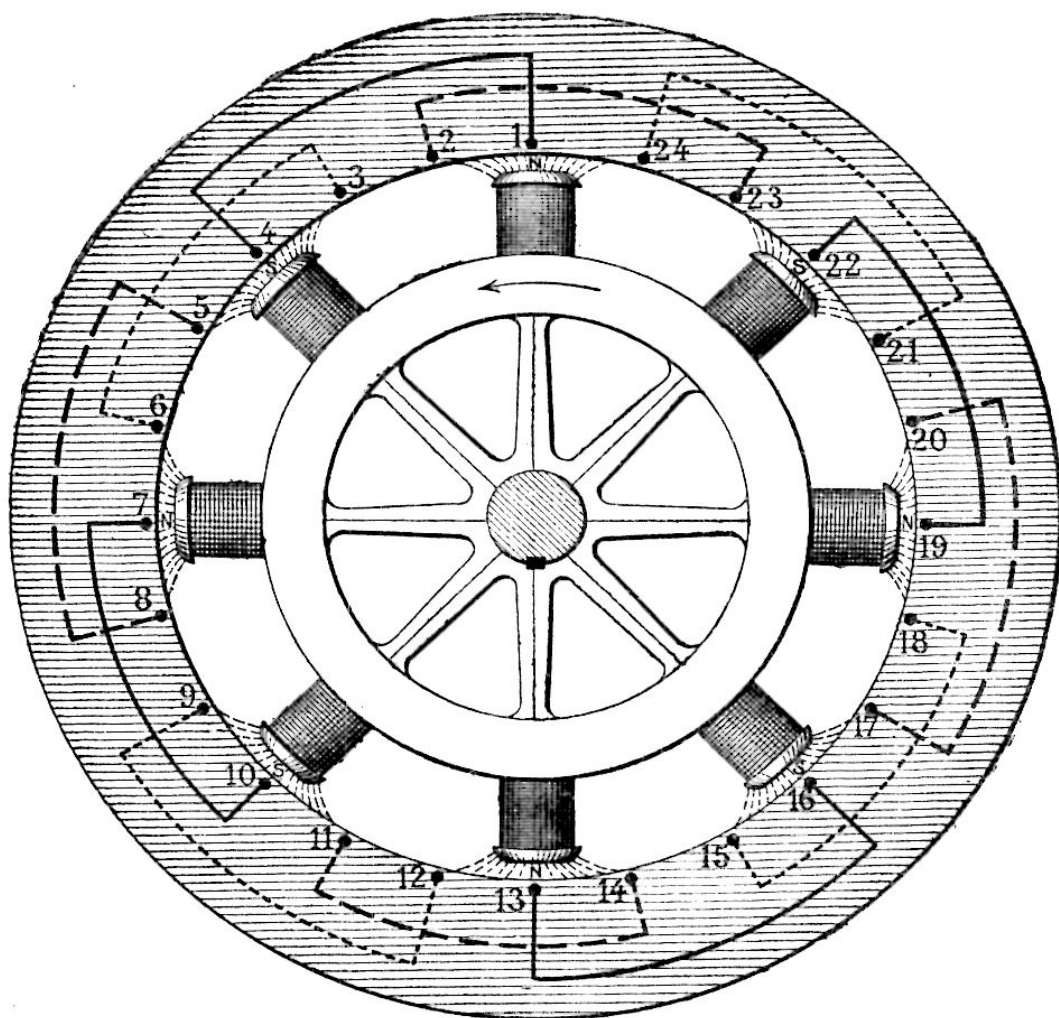


Fig. 82. — Alternateur triphasé avec induit à encoches, et inducteur tournant à pôles saillants.

figure chaque bobine d'un même circuit occupe exactement l'intervalle de deux pôles inducteurs; il s'ensuit que tandis qu'un pôle nord par exemple de l'inducteur vient à passer devant l'encoche 1 appartenant à la première bobine, le pôle sud voisin sera

juste en face de l'encoche 4 contenant la même bobine, de même pour 2, 5 et 8, 3, etc.

Ceci posé la théorie du fonctionnement de la machine est facile à comprendre.

Pour plus de commodité nous rappellerons l'expérience du conducteur roulant sur des rails et coupant des lignes de force (page 32). Nous savons qu'en coupant ces fils invisibles que l'on appelle lignes de force un courant se produit dans le conducteur, et que l'on peut à l'aide de la règle des trois doigts en déterminer le sens.

Nous savons aussi que cette expérience se rattache à la loi générale de l'induction, car la barre en roulant fait embrasser un nombre variable de lignes de force au circuit qu'elle forme avec les rails.

Dans l'alternateur triphasé à induit à encoches il en est exactement de même :

Considérons le pôle N qui passe devant l'encoche 1; en tournant, le pinceau de lignes de force qui s'échappe de ce pôle se trouve coupé par les conducteurs placés dans l'encoche 1.

Un courant va prendre naissance dans les conducteurs qui l'occupent, peu nous importe son sens.

Au même moment le pôle S voisin est devant l'encoche 4, appartenant à la même bobine, ses lignes vont induire un courant dans les conducteurs de l'encoche 4, mais ce courant sera en sens inverse de celui de l'encoche 1, car nous avons devant 4 un pôle sud tandis qu'un pôle nord passe devant 1.

Ces courants s'ajouteront comme il est facile de le voir à cause de la liaison extérieure, qui relie 1 à 4.

A ce même moment les bobines placées dans les encoches 7,10, — 13,16, — 19,22 seront le siège de courants analogues. En les groupant convenablement

entre elles ces courants pourront s'ajouter comme ceux de l'alternateur simple à pôle de la page 217.

Mais les pôles inducteurs se déplacent, supposons qu'ils tournent dans le sens de la flèche, le pôle N qui était devant 1 va venir devant 2 en même temps que le pôle S à droite viendra devant 23 qui appartient à la même bobine.

La bobine 2,23 sera le siège d'un courant qui aura à ce moment la même valeur dans les bobines analogues (— — —) 5,8, — 11,14, — 17,20.

Remarquons en passant que le courant ne sera pas à ce moment complètement éteint dans les bobines 1, etc., car à cause de l'espace faible qui les sépare de 2, elles couperont encore quelques lignes de force qui s'échappent du pôle N.

Les inducteurs, en continuant à se déplacer, induiront des courants dans les bobines (.....) 3,6, — 9,12, — 15,18, — 21,24.

Puis le pôle N arrivera devant 4 tandis qu'un pôle sud sera devant 1 juste l'inverse de ce qui arrivait tout à l'heure.

Le courant changera de sens dans les bobines en trait plein (—), puis ce sera le tour des bobines à traits interrompus, et enfin celui des bobines en trait pointillé; après quoi les mêmes phénomènes recommenceront.

Nous avons fait observer que les courants ne s'éteignent pas brusquement dans chaque bobine après le passage du pôle, de sorte que dans chacune d'elles on aura un courant alternatif de la forme de la sinusoïde de la page 212.

Les trois sinusoïdes émanant des trois sortes de bobines seront enchevêtrées d'une façon analogue à celles de la figure 77; leur ensemble constituera

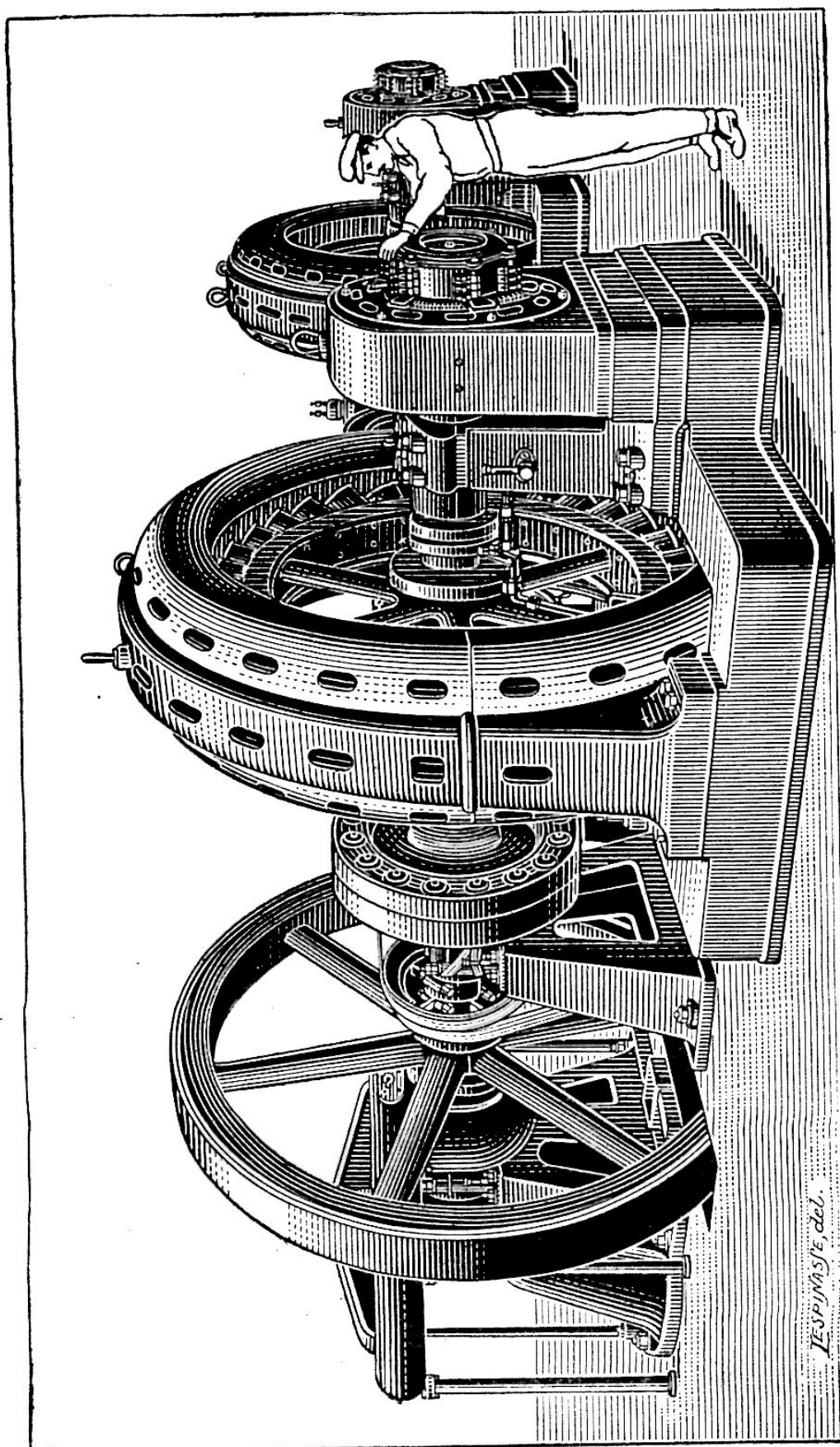


Fig. 83. — Alternateurs et leur excitatrice en bout d'arbre.

les courants triphasés que l'on cherche à produire.

Comme on le voit, c'est simple, plus simple même que la théorie des induits à tambour multipolaire dans laquelle il fallait suivre le courant dans ses zigzags autour de l'induit pour aller d'un balai à l'autre.

Les trois circuits sont couplés en étoile comme ceux de l'alternateur triphasé à pôles qui nous a servi de point de départ, l'enroulement se terminera donc simplement par trois bornes auxquelles nous attacherons les trois fils transmettant au loin les courants triphasés qui nous serviront à toutes sortes d'applications.

L'alternateur comportera en outre deux bagues isolées reliées aux bobines inductrices sur lesquelles appuieront deux balais et qui serviront à leur amener le courant continu nécessaire à l'excitation.

Détails de construction. — La plupart des alternateurs industriels que l'on rencontre aujourd'hui sont, avons-nous dit, à courants triphasés et ils comportent le plus souvent un enroulement identique à celui que nous avons représenté page 232.

Quelquefois on est conduit à répartir le fil de chaque bobine entre plusieurs encoches voisines, mais cela revient au point de vue théorique à n'en avoir qu'une seule plus grande qui contient tous les fils.

Les induits des gros alternateurs sont généralement disposés pour entourer le volant de la machine à vapeur. Sur la jante on a boulonné les pôles inducteurs qui le font ressembler de loin à une gigantesque roue dentée (fig. 83).

Les tôles induites serrées entre des boulons ne seraient pas assez solides pour empêcher la défor-

mation de la couronne qu'elles forment ainsi. On loge le tout dans une carcasse en fonte qui a souvent 4 ou 5 mètres de diamètre et quelquefois plus.

Une telle machine serait difficilement maniable et ne pourrait être transportée sur les chemins de fer à

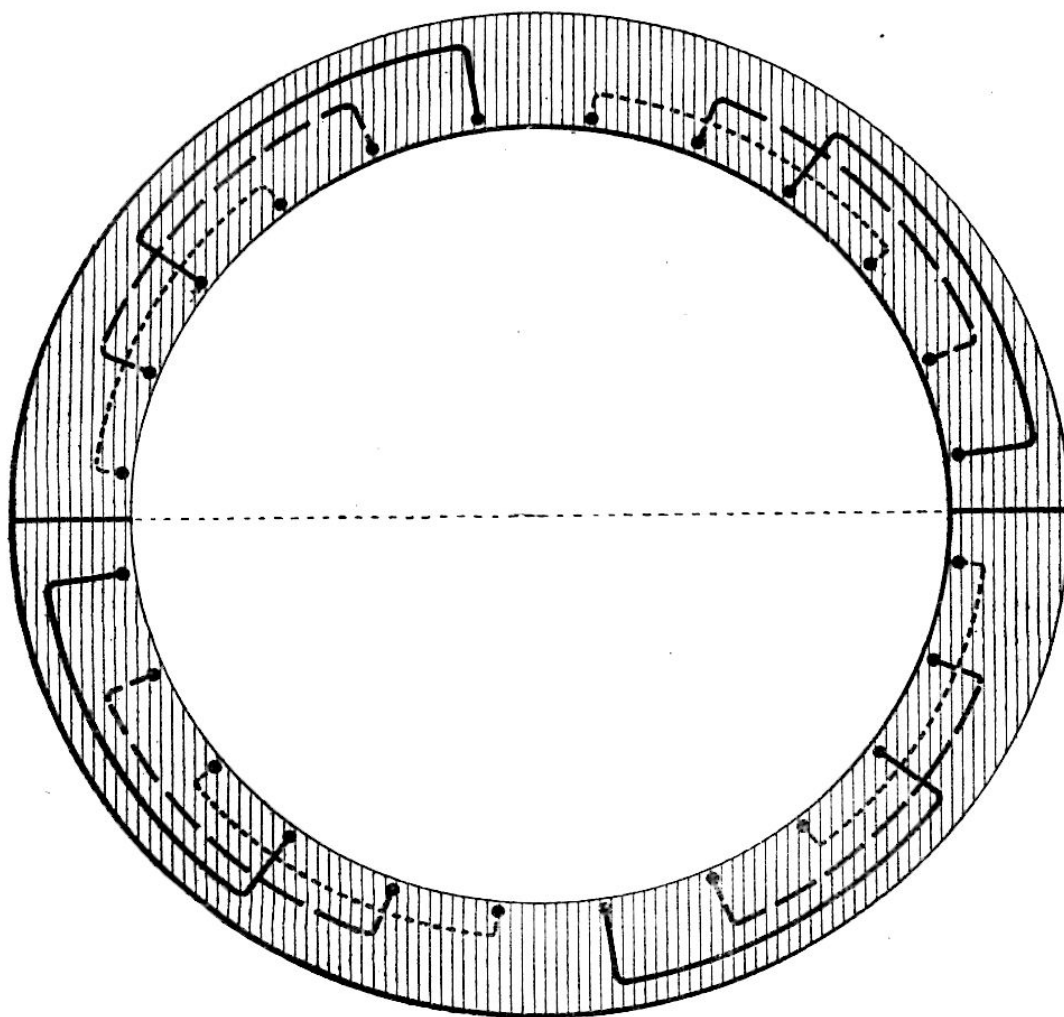


Fig. 84. — Enroulement triphasé rendant la machine démontable.

cause du gabarit de la voie; on est donc conduit à les faire en deux ou plusieurs parties, le plus souvent on partage l'induit en deux moitiés suivant un diamètre horizontal que l'on raccorde ensuite à l'aide de boulons.

Ainsi qu'il est facile de le voir l'enroulement se trouvera coupé en deux et on devra refaire le bobinage aux points de séparation, au moment du montage de la machine.

En vue d'éviter cet inconvénient, plusieurs constructeurs réalisent le bobinage triphasé comme l'indique la figure 84.

On y retrouve les trois séries de bobines trait plein (—), trait interrompu (— — —) et trait pointillé (.....). Mais ces bobines laissent un intervalle libre au milieu qui permettra de séparer l'induit en deux sans inconvénient. On devra seulement refaire les liaisons des bobines entre elles aux points de jonction, mais ce sera plus facile et plus vite fait que la réfection complète d'une ou plusieurs bobines comme c'était le cas avec l'enroulement précédent.

Les connexions des bobines d'un même circuit entre elles devront être faites avec soin de façon à ce que les courants s'ajoutent; avec un peu d'attention, on arrive facilement à ce résultat.

Ce mode d'enroulement permettrait de séparer l'induit en quatre quarts si on le désirait, mais on doit chercher avant tout à avoir le moins possible de joints souvent difficiles à bien assurer au point de vue magnétique.

Montage des inducteurs. — Les inducteurs des alternateurs à induit fixe, qu'ils soient à enroulement triphasé ou non, ont une forme à peu près semblable à ceux des figures 82 et 85, on les constitue par des pôles rayonnants disposés tout autour d'un volant recevant son mouvement d'une turbine ou d'une machine à vapeur. Ces pôles comportent un noyau en fer doux cylindrique ou d'acier doux le plus souvent

de forme rectangulaire autour duquel on a passé la bobine magnétisante.

Le noyau polaire est quelquefois venu de fonte avec le volant qui affecte alors la forme d'une vraie roue dentée, mais le plus souvent il est fixé dessus à l'aide d'un ou plusieurs boulons traversant la jante du vo-

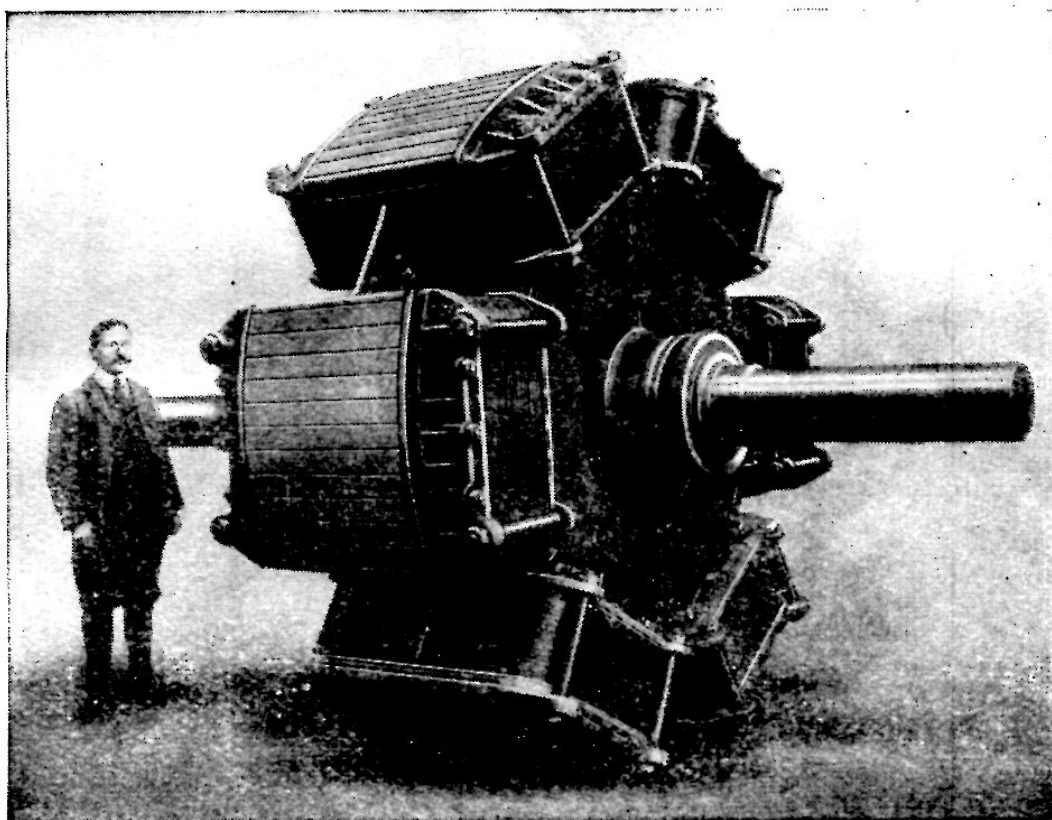


Fig. 85. — Inducteur mobile démonté d'un alternateur

lant. Il ne faut pas oublier en effet que ces pôles seront soumis aux efforts énergiques de la force centrifuge qui se fait sentir d'autant plus que le volant a un plus grand diamètre et que sa vitesse est plus élevée. Certains constructeurs terminent le noyau polaire par une queue d'aronde qui s'emboîte exactement sur une denture de même forme pratiquée dans le volant. Il suffit de deux vis pour maintenir le pôle en place.

L'enroulement est généralement constitué par un conducteur en cuivre isolé tournant autour de chaque pôle dans un sens tel qu'il détermine tantôt un pôle nord et tantôt un pôle sud comme nous l'avons

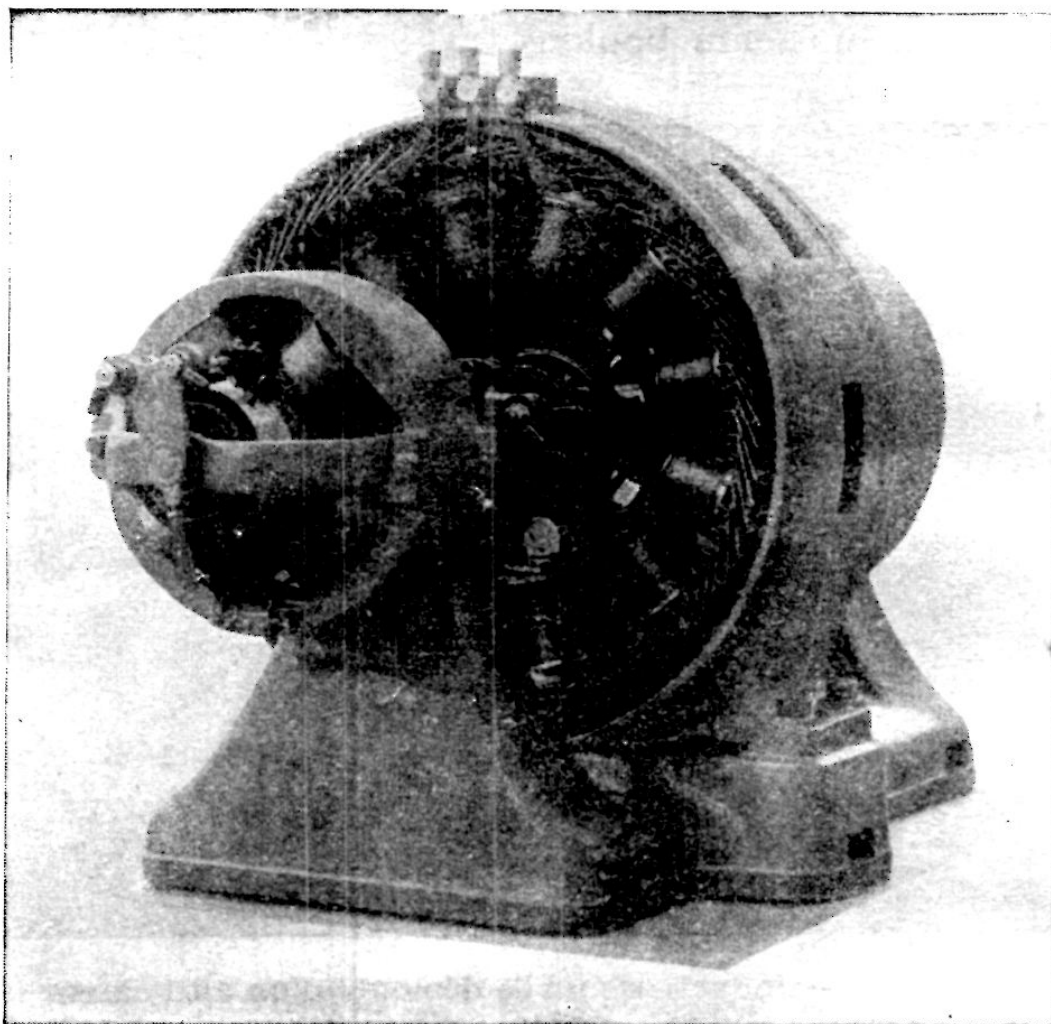


Fig. 86. — Alternateur triphasé et son excitatrice.

indiqué page 217. Ce conducteur est un fil suffisamment gros, isolé au coton et à la gomme laque sur les petites machines, c'est un ruban plat de cuivre rouge enroulé en hélice sur les grosses machines (fig. 85).

On construit couramment aujourd'hui des alternateurs de 1.000 et 2.000 chevaux en vue du transport

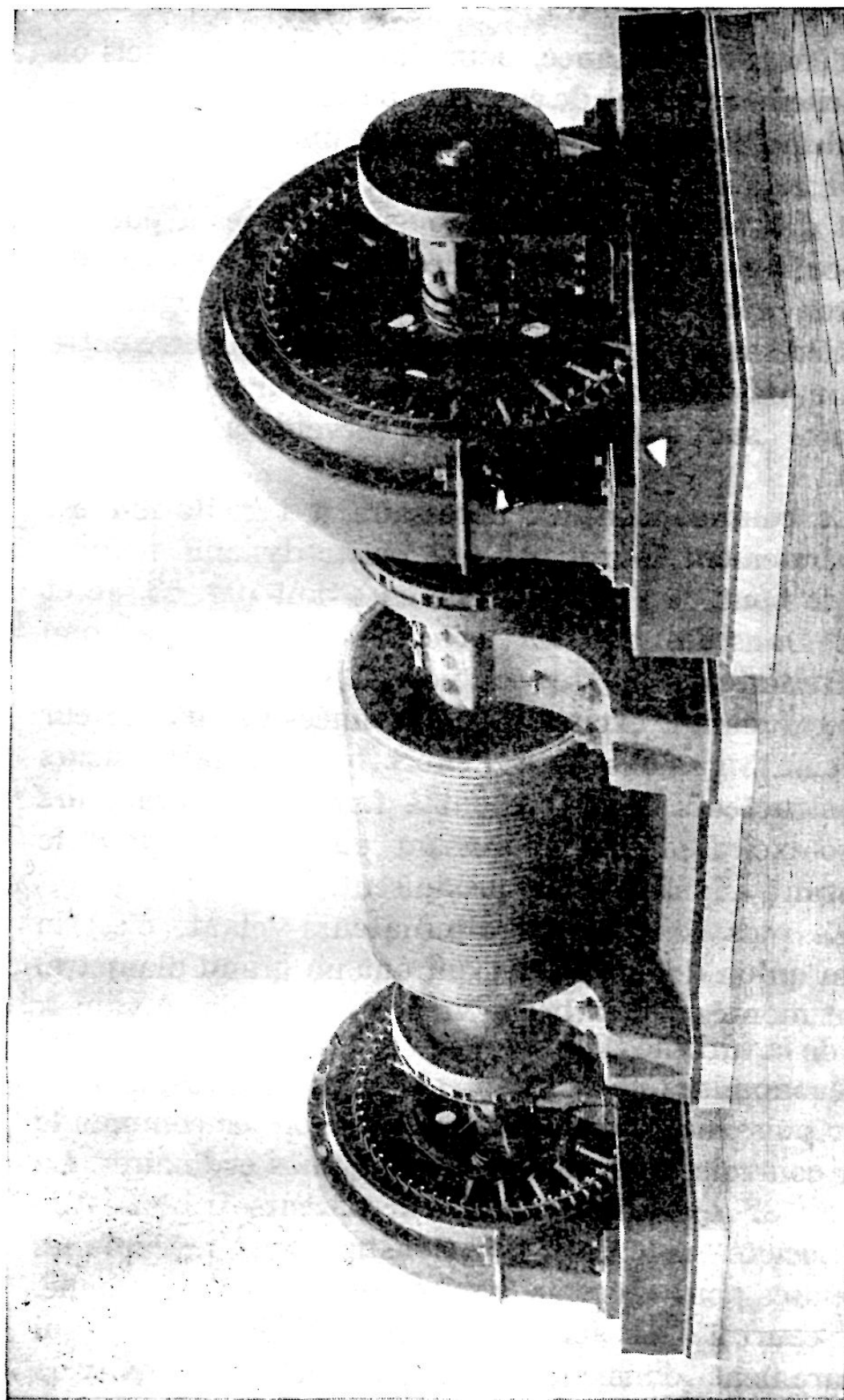


Fig. 87. — Alternateurs actionnés par des cordes.

de l'énergie à distance, pour l'excitation desquels on a facilement besoin de courants de 80 à 100 ampères et au delà; aussi pour laisser passer une telle intensité le fil ne suffit plus, c'est ce qui explique pourquoi il faut des bandes de cuivre rouge enroulées à plat en hélice; on intercale entre les spires successives du carton gomme laqué ou de la toile imprégnée de matières isolantes et l'ensemble fortement serré entre deux joues de métal est passé autour de la pièce polaire sur laquelle des vis servent à l'immobiliser.

Le courant continu nécessaire à l'excitation est généralement fourni par une petite dynamo montée sur le bout de l'arbre visible en avant (fig. 83, 86 et 88). Dans les grandes usines où l'on a beaucoup d'alternateurs on se contente d'employer une ou deux dynamos excitatrices actionnées par un moteur spécial. Signalons aussi l'effort louable de plusieurs constructeurs qui cherchent à faire des alternateurs auto-exciteurs en redressant ou en employant le courant triphasé qu'ils produisent.

Le plus souvent les alternateurs-volant, c'est le nom qu'on donne à ceux qui ont un grand diamètre, sont montés sur l'arbre même de la machine à vapeur ou de la turbine (fig. 83) ce qui réduit l'encombrement et économise une courroie. Dans certains cas, lorsque leur puissance n'est pas très élevée on les commande par courroie, tout comme les dynamos ordinaires. La figure 87 représente deux alternateurs triphasés de la Société Alsacienne de Constructions mécaniques disposés pour recevoir leur mouvement d'une poulie. La courroie est ici remplacée par des cordes qui s'enroulent dans des rainures pratiquées dans la poulie. On distingue nettement les bobines induc-

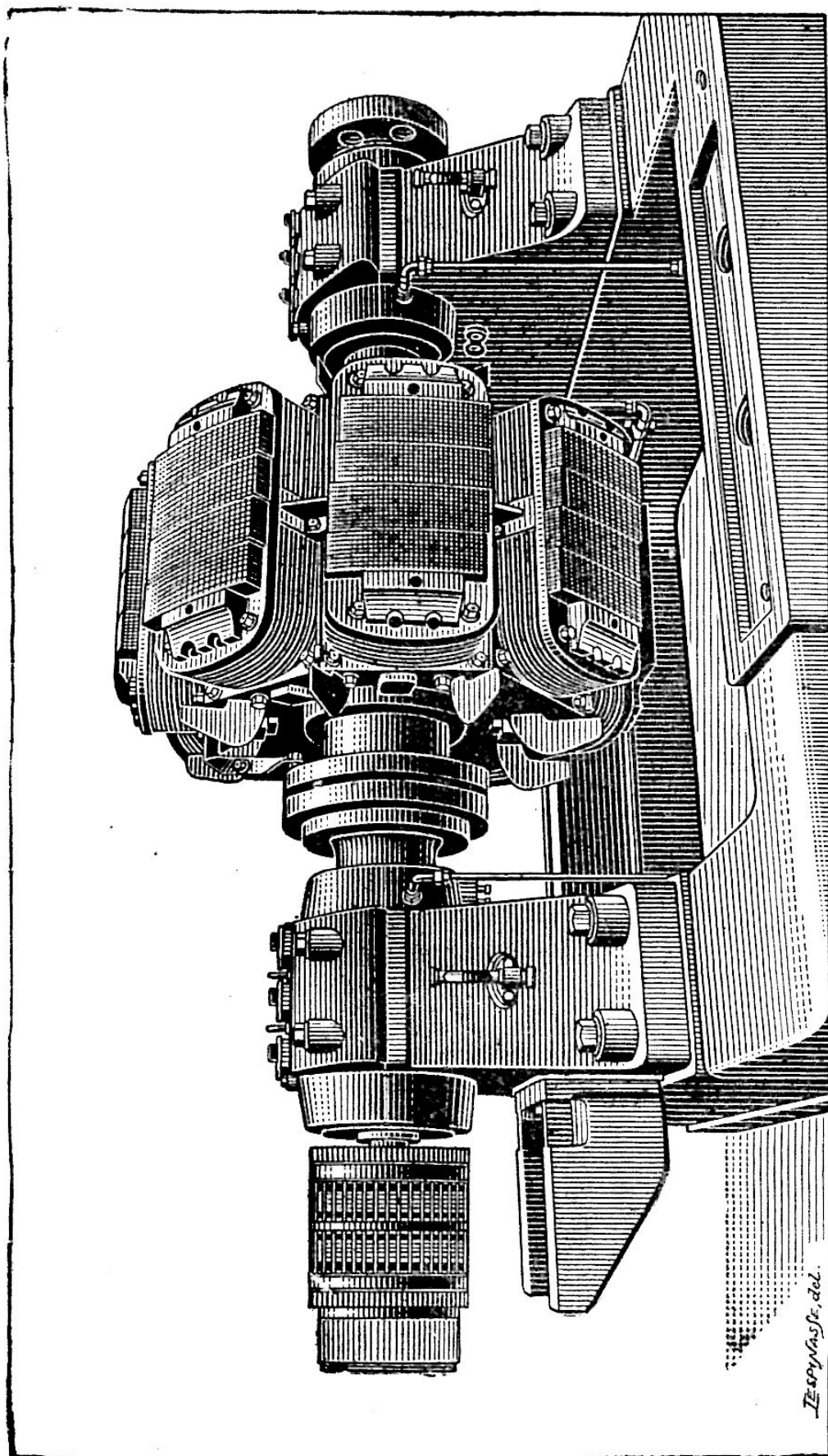


Fig. 88. — Alternateur démonté laissant voir les pôles inducteurs et en bout d'arbre l'induit de l'excitatrice

trices tournantes et l'enroulement induit fixé à la couronne extérieure laquelle peut se séparer en deux parties.

2° Alternateurs à induit mobile.

Les petits alternateurs dont la puissance ne dépasse pas 20 ou 30 chevaux sont généralement à induit mobile. La raison principale qui a fait adopter cette disposition provient de ce que l'on emploie le plus souvent des induits de machine à courant continu dont la construction est très courante aujourd'hui. Ils permettent de plus de rendre l'alternateur auto-excitateur, ce qui évite l'emploi d'une dynamo spéciale.

Toute machine dynamo-électrique à courant continu du genre de celles que nous avons examinées peut se transformer facilement en alternateur.

Alternateur simple. — Considérons pour plus de

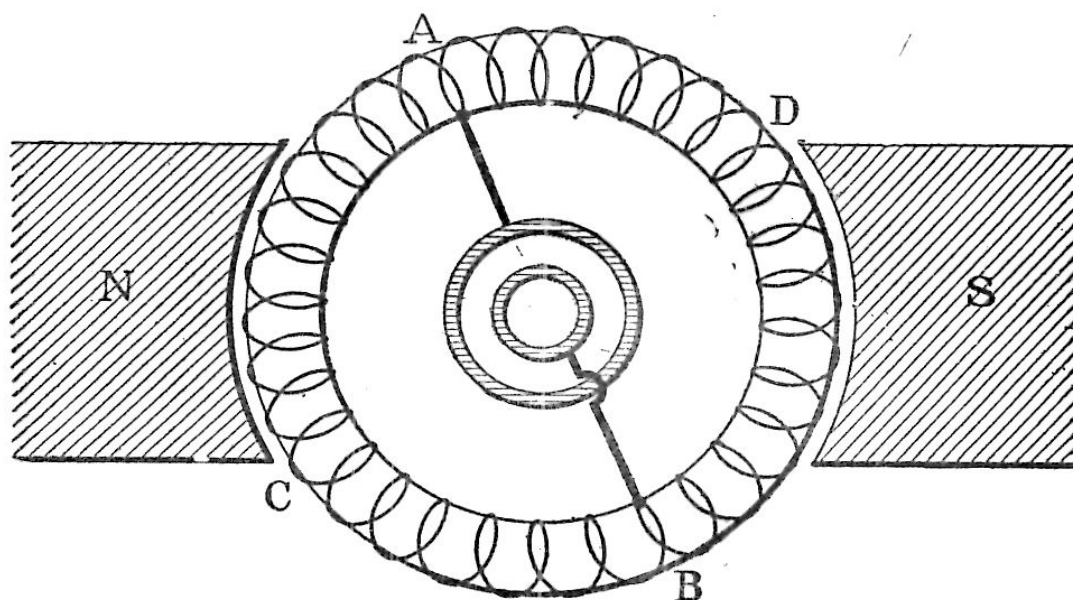


Fig. 89. — Alternateur simple à induit mobile.

simplicité un anneau Gramme (fig. 89) tournant entre les deux pôles d'un aimant ou d'un électro-aimant excité N S. Faisons pour le moment abstraction du

collecteur; supposons même qu'il n'existe pas. Dénudons le fil de l'anneau en deux endroits A et B diamétralement opposés et soudons en ces deux points deux fils qui aboutiront chacun à une bague métallique isolée, fixée sur l'arbre.

Faisons appuyer deux balais, un sur chaque bague, nous recueillerons entre nos deux balais du courant alternatif simple. Pourquoi cela?

Il est facile de voir que l'anneau ainsi partagé en deux parties égales peut être considéré comme formé de deux bobines ACB et BDA qui tournent entre les pôles d'un aimant. Ces bobines sont couplées en quantité aux points A et B et les courants alternatifs qu'elles produisent arrivent aux deux bagues où les deux balais les recueillent.

Alternateur triphasé. — Au lieu de faire sur le fil de l'enroulement deux saignées aux extrémités d'un même diamètre, dénudons le fil en trois points A, B, C également espacés formant les trois sommets d'un triangle équilatéral (fig. 90).

Relions chacun de ces points à une bague isolée passée sur l'arbre, et sur chaque bague faisons appuyer un balai. Lorsque l'anneau tournera entre les pôles inducteurs NS nous recueillerons sur les bagues des courants triphasés, comme on va s'en rendre compte.

Nous retrouvons en effet ici les trois bobines d'un système triphasé, ce sont AdB, BeC, C/A. Ces bobines sont montées en triangle, elles viennent passer successivement devant chacun des pôles de l'aimant, il naîtra donc des courants alternatifs dans chacune d'elles et ces courants se produiront à des intervalles réglés par l'espacement des bobines. Si donc les points A, B, C ont été convenablement choisis et

s'ils divisent bien la circonférence en trois parties égales, les courants auront des courbes analogues à ceux de la figure 77, ce seront des courants triphasés.

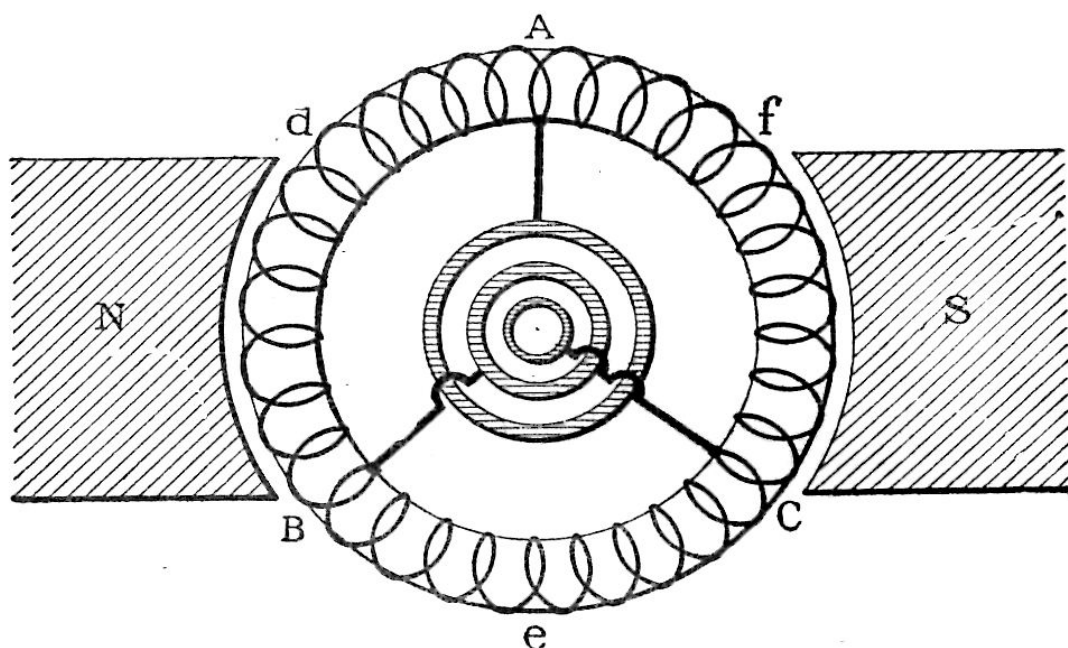


Fig. 90. — Alternateur triphasé à induit mobile.

Alternateurs diphasés. — L'anneau Gramme se prête à une multitude d'autres combinaisons, c'est ainsi qu'en reprenant l'alternateur simple de la figure 89 et en faisant deux nouvelles soudures en deux points C et D diamétralement opposés, mais sur une ligne perpendiculaire aux deux premiers A et B (fig. 91), nous recueillerons sur quatre bagues montées sur l'arbre et reliées à ces quatre points des *courants diphasés*.

Ces courants dont nous n'avons pas encore parlé ne sont autres que deux courants alternatifs se produisant à un quart de période d'intervalle. Ils jouissent de la même propriété que les courants triphasés, celle de donner lieu à des champs tournants; mais s'ils ne sont pas aussi répandus, c'est qu'ils

nécessitent *quatre* fils de transmission au lieu de trois qui suffisent pour les courants triphasés.

On a construit cependant quelques machines de ce type en utilisant des dynamos à courant continu, c'est pourquoi nous avons voulu en dire un mot.

L'anneau Gramme ainsi divisé en quatre fournit des courants alternatifs simples entre les deux points A et B, car il se trouve dans le cas de la figure 89,

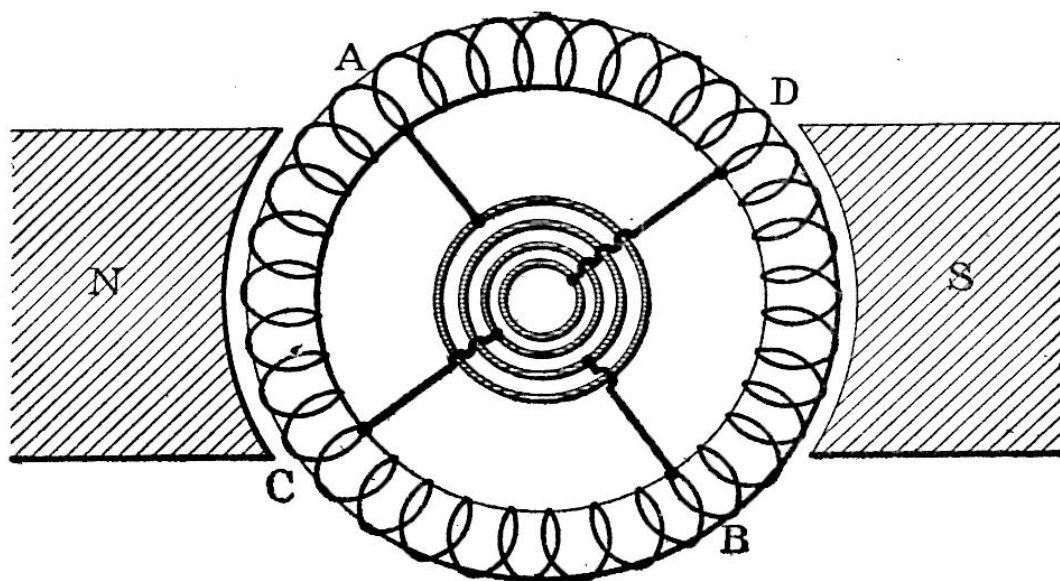


Fig. 91. — Alternateur diphasé à induit mobile.

mais il en fournit aussi entre ses points C et D qui divisent eux aussi l'anneau en deux bobines égales CAD et CBD couplées en quantité. Les courants qui naîtront dans ces deux systèmes de bobines seront alternatifs, mais ils se produiront à un quart de période d'intervalle, absolument comme s'ils émanaient de deux alternateurs qui seraient partis l'un après l'autre à un quart de tour d'intervalle.

On a essayé de réduire à trois le nombre des fils de la transmission d'un système diphasé en réunissant deux d'entre eux, mais sans succès d'ailleurs car

on produit une dissymétrie et il faut renforcer un des fils conducteurs.

Dans tout ce que nous venons de dire, nous avons supposé que l'on partait d'un anneau Gramme pour plus de simplicité; mais le même raisonnement s'applique à un enroulement en tambour, il suffit seulement de choisir convenablement les points d'attache.

Machine à six fonctions. — Si nous décrivons cette machine, c'est parce qu'elle se rattache, par une de ses fonctions, aux alternateurs à induit tournant dont nous venons de voir le principe.

Prenons une dynamo à courant continu, choisissons, sur le fil de l'enroulement induit trois points à égale distance et enlevons l'isolant en ces endroits, soudons enfin, sur chacun des points, un conducteur qui aboutira à une bague isolée fixée sur l'arbre, comme dans la machine de la figure 90, nous aurons réalisé une machine à six fonctions, savoir : 1° alter-nateur, 2° dynamo, 3° moteur synchrone, 4° moteur à courant continu, 5° transformateur de courants alternatifs en courant continu, 6° transformateur de courant continu en courants alternatifs.

Nous savons que si nous faisons tourner l'induit entre ses inducteurs, convenablement excités, nous recueillerons des courants triphasés, à l'aide de balais appuyant sur les trois bagues.

Jusqu'ici, rien de bien nouveau, mais si nous voulons bien regarder la machine du côté de son collecteur, nous verrons qu'il n'y a rien de changé sur cette face, par conséquent en entraînant l'induit à l'aide d'une courroie passant sur la poulie P, et en l'amenant à sa vitesse normale, la machine s'excitera et pourra fournir du courant continu entre ses deux balais C_1C_2 (fig. 92).

Cette machine sera donc : d'un côté, une machine à courant continu et de l'autre un alternateur à courants triphasés (auto-excitateur puisqu'il s'excite lui-même grâce au collecteur à courant continu). Ce sont des dynamos de ce genre que l'on utilise souvent dans

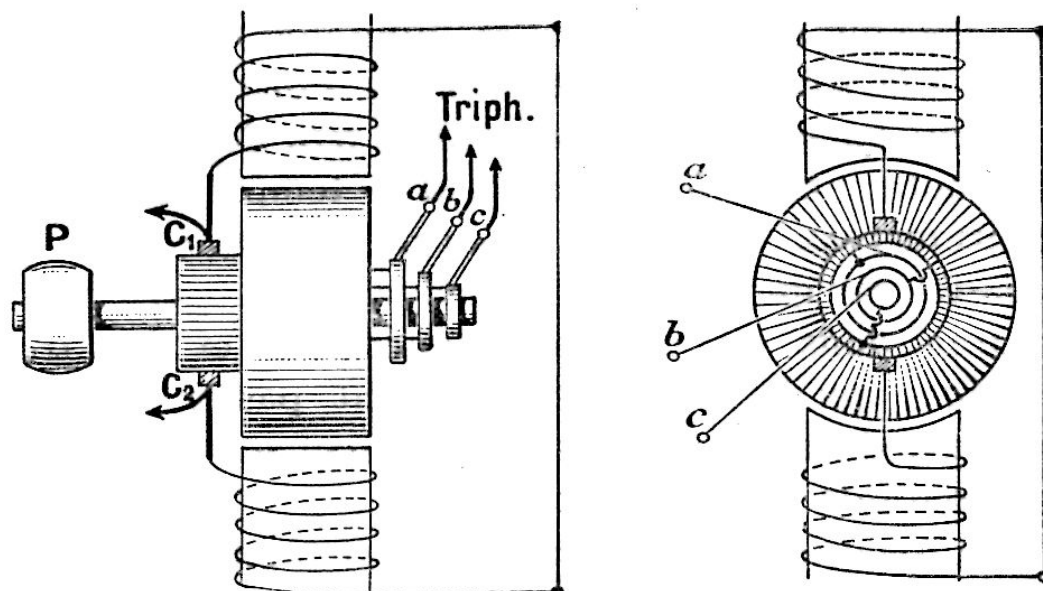


Fig. 92. — Vue en long et de face d'une commutatrice triphasée

les ateliers et dans les laboratoires, lorsque l'on veut disposer à la fois de courant continu ou de courants triphasés; il n'y a qu'un inconvénient à leur emploi, c'est que les tensions ne sont pas les mêmes des deux côtés, ainsi, pour citer un exemple, tandis que la dynamo donne 200 volts entre les balais appuyant sur son collecteur, on n'obtient que 120 volts, entre

deux quelconques des balais a, b, c , fournissant des courants triphasés (1).

Mais ce n'est pas tout; une des plus remarquables fonctions de cette machine, est de fournir du courant continu si on l'alimente en courants triphasés par les trois balais a, b, c .

Supposons d'abord qu'on envoie du courant continu à cette machine par ses deux balais C_1, C_2 appuyant sur le collecteur, nous savons, — et c'est là la vieille expérience de M. Fontaine qui servit de base à la transmission de l'énergie à distance, — que l'induit va se mettre à tourner et fera de la machine un moteur électrique. Pendant ce temps nos bagues continueront toujours à fournir des courants triphasés, car quel que soit le moyen employé, l'induit tourne dans un champ magnétique, et les trois bobines qui le constituent, venant passer successivement devant les pôles inducteurs, seront le siège de courants alternatifs triphasés.

La réciproque est vraie, car si nous relions la machine par ses trois balais a, b, c à un réseau de distribution de courants triphasés et si nous avons eu soin de lancer l'induit à une vitesse telle que les courants triphasés, qu'il tend à produire, soient *accordés* c'est-à-dire coïncident et aient la même période et la même tension que les courants triphasés du réseau, la machine continuera à tourner en moteur triphasé. A ce moment, elle pourra fournir soit de la force motrice sur la poulie P , soit, ce qui est préfé-

(1) Cette différence tient en partie à ce que la tension du courant continu englobe toutes les bobines situées suivant un diamètre soit une moitié de l'induit, tandis que la tension entre deux balais fournissant les courants triphasés ne provient que du tiers des bobines de l'induit ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte sur la figure 90.

nable dans bien des cas, du courant continu entre ses balais C_1 et C_2 , courant qui se produit nécessairement par suite de la rotation de l'induit, que cette rotation soit due à l'action d'un moteur sur la poulie P ou aux courants triphasés.

La machine fonctionnant dans ces conditions devient un *transformateur* de courants triphasés en courant continu. Les industriels lui ont donné le nom de *commutatrice* à cause du rôle de son induit qui est de commuter les courants triphasés, si on peut s'exprimer ainsi, et de les transformer en courant continu. Naturellement cette propriété n'existe que tant que l'induit se déplace dans ses inducteurs car c'est une condition nécessaire pour recueillir du courant continu (1).

Les six fonctions de la machine ci-dessus ainsi transformée se résument ainsi :

1° La machine donne du courant continu quand on la fait tourner en agissant sur la poulie;

2° La machine donne des courants triphasés quand on la fait tourner en agissant sur sa poulie;

3° La machine tourne en moteur et peut fournir de la force motrice par sa poulie quand on alimente les deux balais appuyant sur le collecteur avec du courant continu;

4° La machine tourne en moteur et on peut recueillir de la force motrice sur sa poulie quand on fournit à ses trois bagues des courants triphasés dans des conditions convenables;

5° La machine se met en marche et tourne si on alimente les balais frottant sur le collecteur par du

(1) On pourrait faire tourner les inducteurs et les balais en laissant l'induit immobile, mais cette disposition est peu employée.

courant continu, elle rend sur ses trois bagues des courants triphasés;

6° En lançant convenablement l'induit et en reliant les trois bagues à une source de courants triphasés, la machine continue à tourner et on peut recueillir sur son collecteur du courant continu au moyen des balais.

Cette dernière fonction est la plus importante, car c'est en somme surtout pour la transformation des courants triphasés en courant continu que ces machines se construisent aujourd'hui.

La figure 93 représente une sous-station comprenant 4 commutatrices de 1.000 kilowatts destinées à convertir en courant continu des courants triphasés à 25 périodes par seconde. Ce sont des machines de ce genre qui assurent la transformation des courants triphasés en courant continu dans les sous-stations du Métropolitain, du Nord-Sud et de presque tous les chemins de fer électriques.

3° Alternateurs à induit et inducteurs fixes.

Nous avons vu que ces machines sont peu employées aujourd'hui à cause de la forme souvent bizarre des courants qu'elles produisent.

Nous décrirons tout d'abord un alternateur de ce type qui a été utilisé dans plusieurs applications où la forme du courant importe peu (fours électriques) et dans lesquelles l'on cherche une grande robustesse et l'absence de bagues ou de balais et de fils en mouvement.

Une carcasse en fonte ronde coulée de façon à présenter une gorge en forme de C représente le circuit magnétique fixe de l'appareil. Dans le fond de la

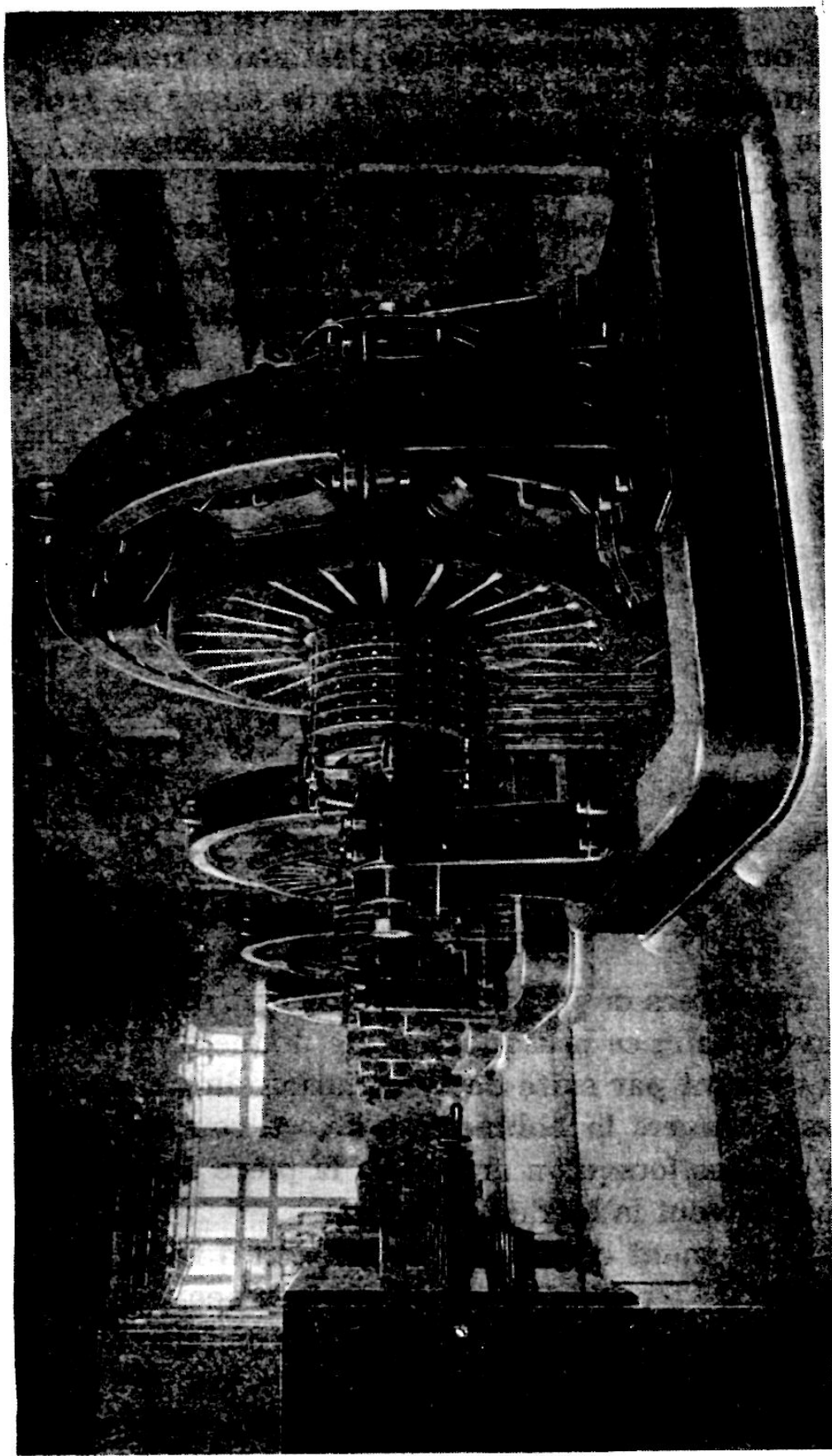


Fig. 93. — Commutatrices de 1.000 kw. dans une sous-station.

gorge on a disposé une bobine destinée à recevoir le courant continu qui transformera la masse de fonte en un électro-aimant analogue vu en coupe à un inducteur de dynamo type C (fig. 94).

L'une des branches du C porte une bobine induite.

Il est facile de voir qu'il suffira d'intercaler une pièce de fer doux entre les becs du C pour livrer pas-

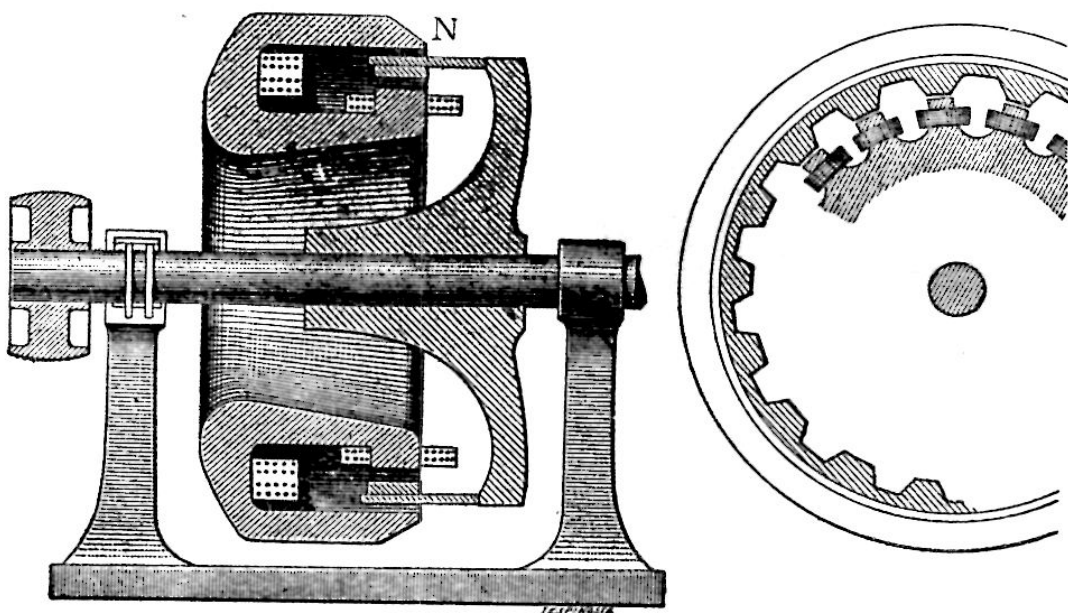


Fig. 94. — Alternateur à circuits électriques fixes et à fer tournant.

sage aux lignes de force qui cheminaient péniblement à travers l'air; ce brusque passage donnera naissance à un courant par suite de la variation du nombre de lignes à travers la bobine induite, ce courant changera de sens lorsqu'on arrachera la pièce de fer doux comme le veut la loi de l'induction.

Pratiquement ce résultat est atteint à l'aide d'une couronne de fer montée sur un axe que peut entraîner le moteur (turbine, machine à vapeur ou à gaz); cette couronne porte des renflements situés sur son pourtour à des distances égales, ils représentent les palettes de fer doux dont nous avons parlé.

En faisant tourner la couronne, ces renflements viennent périodiquement s'interposer entre les bords du C et si on a convenablement réduit le jeu ou entrefer on peut avoir ainsi des alternateurs présentant un assez bon rendement.

En réalité, les bobines induites sont multipliées

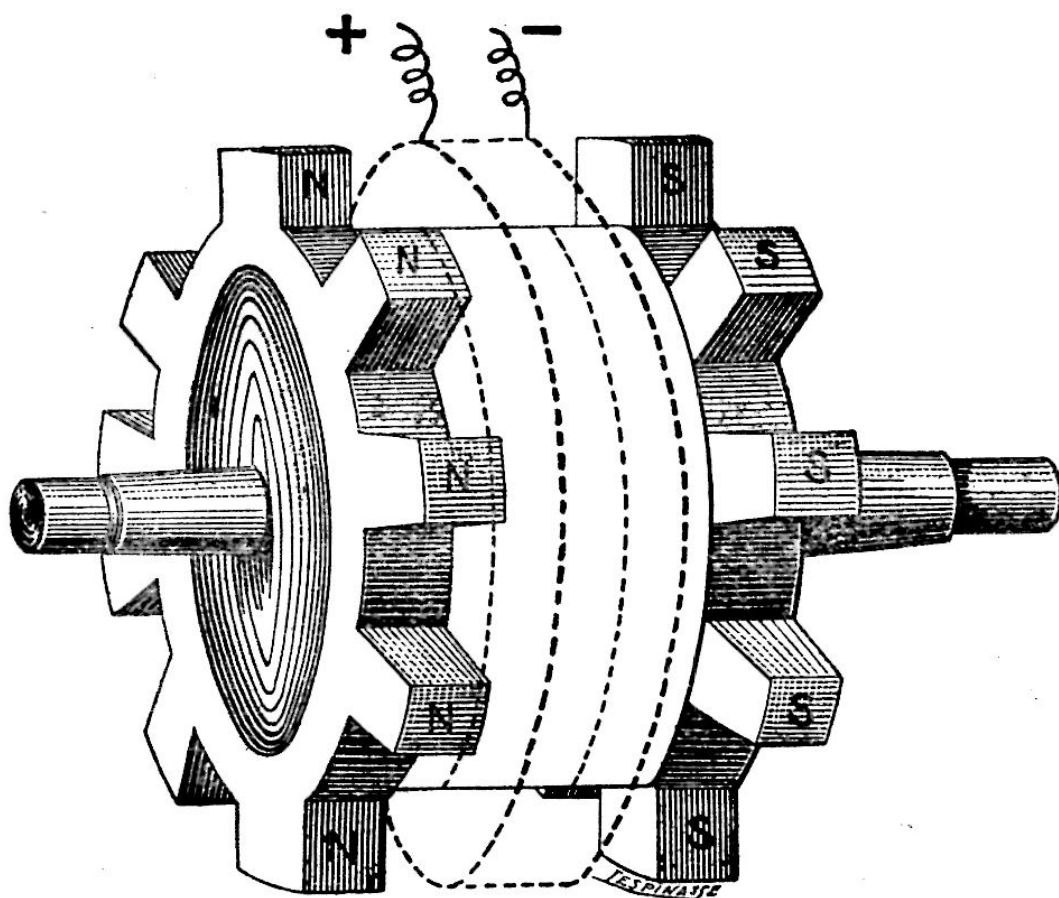


Fig. 95. — Schéma d'un inducteur avec bobine d'excitation fixe.

tout autour de l'arbre; on en trouve autant que de palettes, c'est la même bobine inductrice qui fournit le champ magnétique à tous les C qui ont la partie ronde commune, ainsi qu'on peut le deviner au seul aspect de la figure.

Beaucoup de constructeurs ont réalisé des alternateurs dans lesquels les circuits induits et inducteurs sont fixes, mais ils ne se servent pas de palettes de

fer doux pour provoquer le passage des lignes de force dans les bobines induites, ils font tourner devant elles les pôles inducteurs.

On peut se demander comment ces pôles peuvent

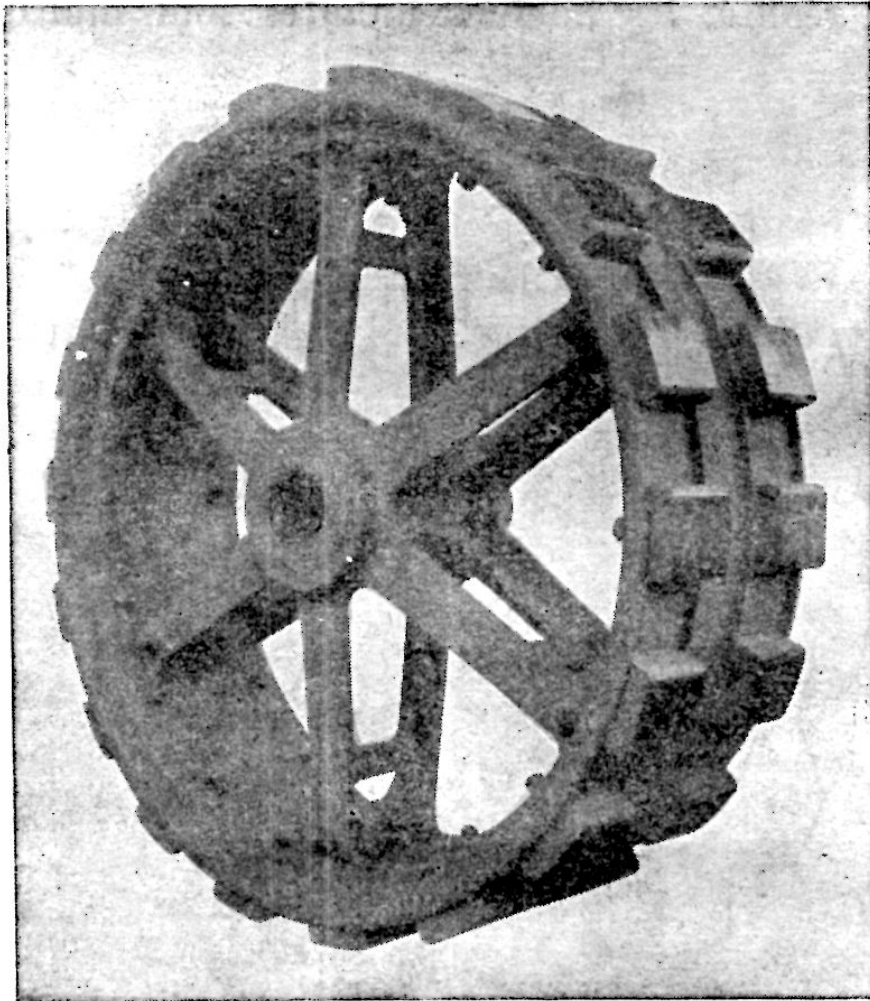


Fig. 96. — Couronne inductrice mobile d'un alternateur à bobine fixe.

tourner tandis que la bobine qui les excite reste fixe. C'est très simple si on veut bien examiner un instant la figure 95 qui représente les pôles inducteurs tournants d'un alternateur de ce genre.

Ce sont deux roues dentées en fer réunies par un cylindre de même nature ; ce dernier est entouré par

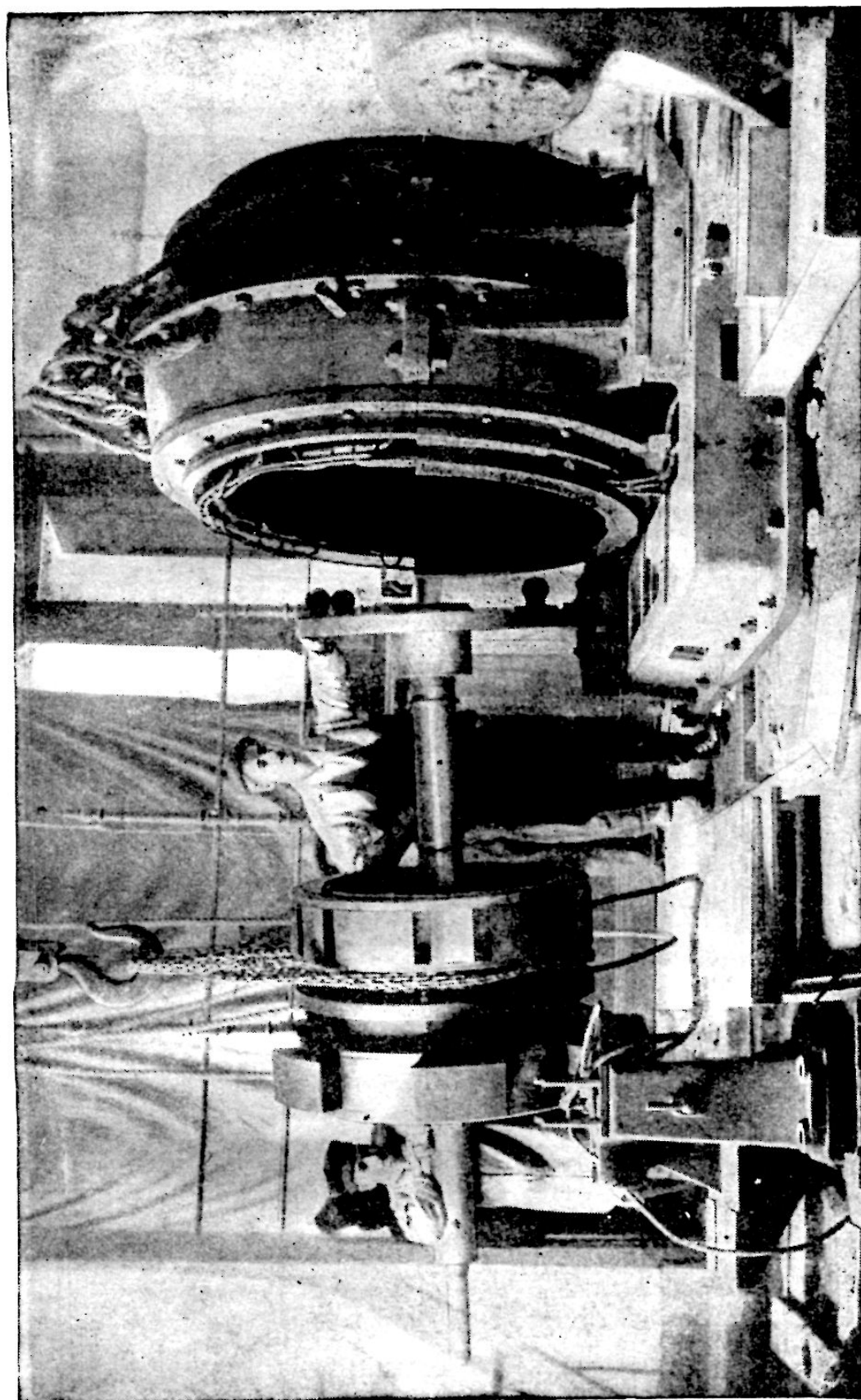


Fig. 97. — Montage d'un alternateur à fer tournant (Introduction de la couronne inductrice mobile).

une bobine inductrice unique d'un diamètre intérieur légèrement supérieur à celui du cylindre. Si le centrage a été bien assuré on voit que l'on pourra faire tourner la masse métallique en fer formée des roues dentées et du cylindre en laissant la bobine fixe.

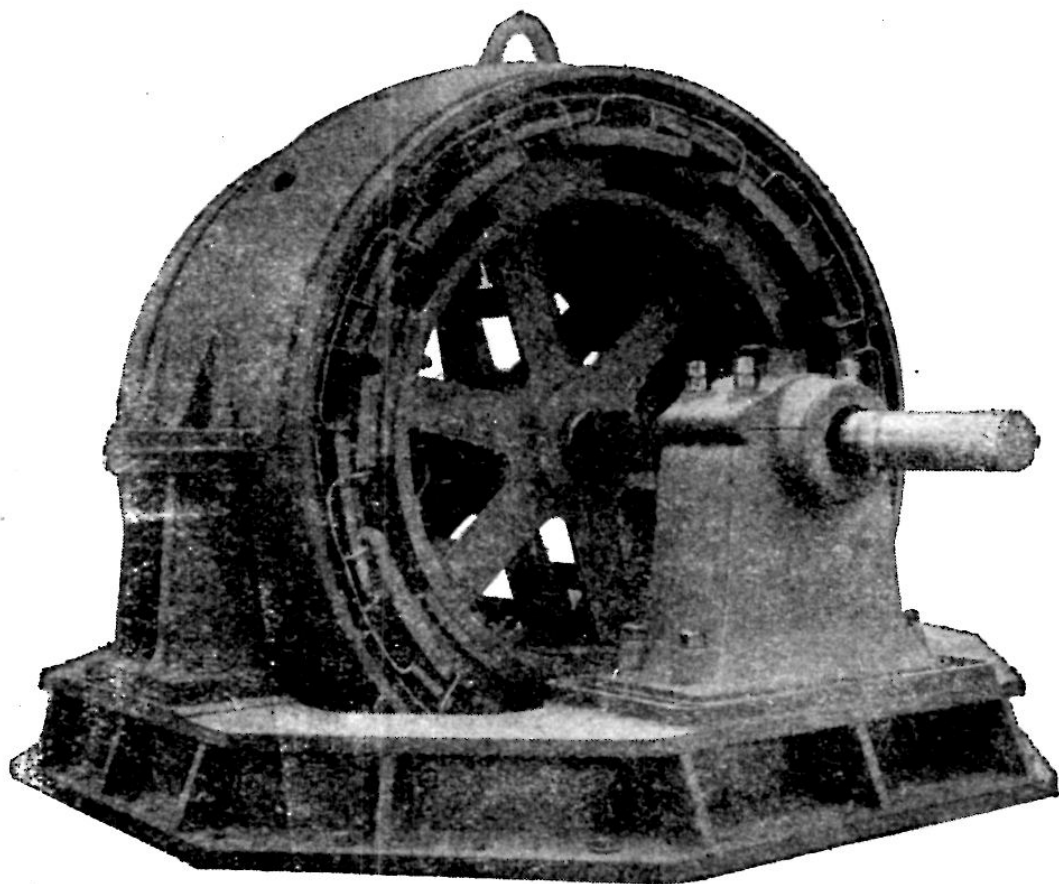


Fig. 98. — Alternateur à circuits électriques fixes.
(Vue d'ensemble de l'alternateur monté.)

Lorsque la bobine sera excitée, en la reliant par exemple à une dynamo à courant continu, il se formera un pôle nord sur une des roues et par conséquent sur toutes les dents qui la constituent et un pôle sud sur l'autre (fig. 95 et 96).

La rotation ne changera rien aux pôles, mais on conçoit qu'en se déplaçant devant les bobines induites convenablement disposées ils puissent donner nais-

sance à des courants alternatifs. Dans cette machine tous les circuits électriques seront encore immobiles (fig. 98). On peut voir (fig. 97) le montage d'un alternateur de ce genre.

4° Turbo-alternateurs.

Depuis quelques années, on emploie de plus en plus dans les grandes usines électriques des groupes électrogènes appelés turbo-alternateurs qui ne sont autres que la combinaison d'une turbine à vapeur avec un alternateur.

Les turbines à vapeur ont sur les machines à vapeur à pistons le grand avantage d'occuper très peu de place tout en présentant un meilleur rendement. Au lieu d'utiliser des bielles et des manivelles pour transformer le mouvement alternatif des pistons en un mouvement circulaire continu, la vapeur agit dans la turbine directement sur des aubes, ce qui simplifie considérablement le mécanisme. Malheureusement, on obtient ainsi des vitesses très élevées qui rendent la construction de telles machines assez délicate. L'alternateur qui est monté sur l'arbre même de la turbine ne comporte plus que deux ou quatre pôles qui doivent être assujettis d'une façon extrêmement solide pour résister aux effets de la force centrifuge particulièrement en cas d'emballement de la turbine.

La figure 99 représente la coupe d'un alternateur de 10.000 chevaux qui est destiné à être accouplé directement à une turbine à vapeur. On distingue nettement l'inducteur monté sur l'arbre et tout autour le *stator* formé d'une série de paquets de tôle portant des rainures dans lesquelles on a introduit l'enroulement induit soigneusement isolé.

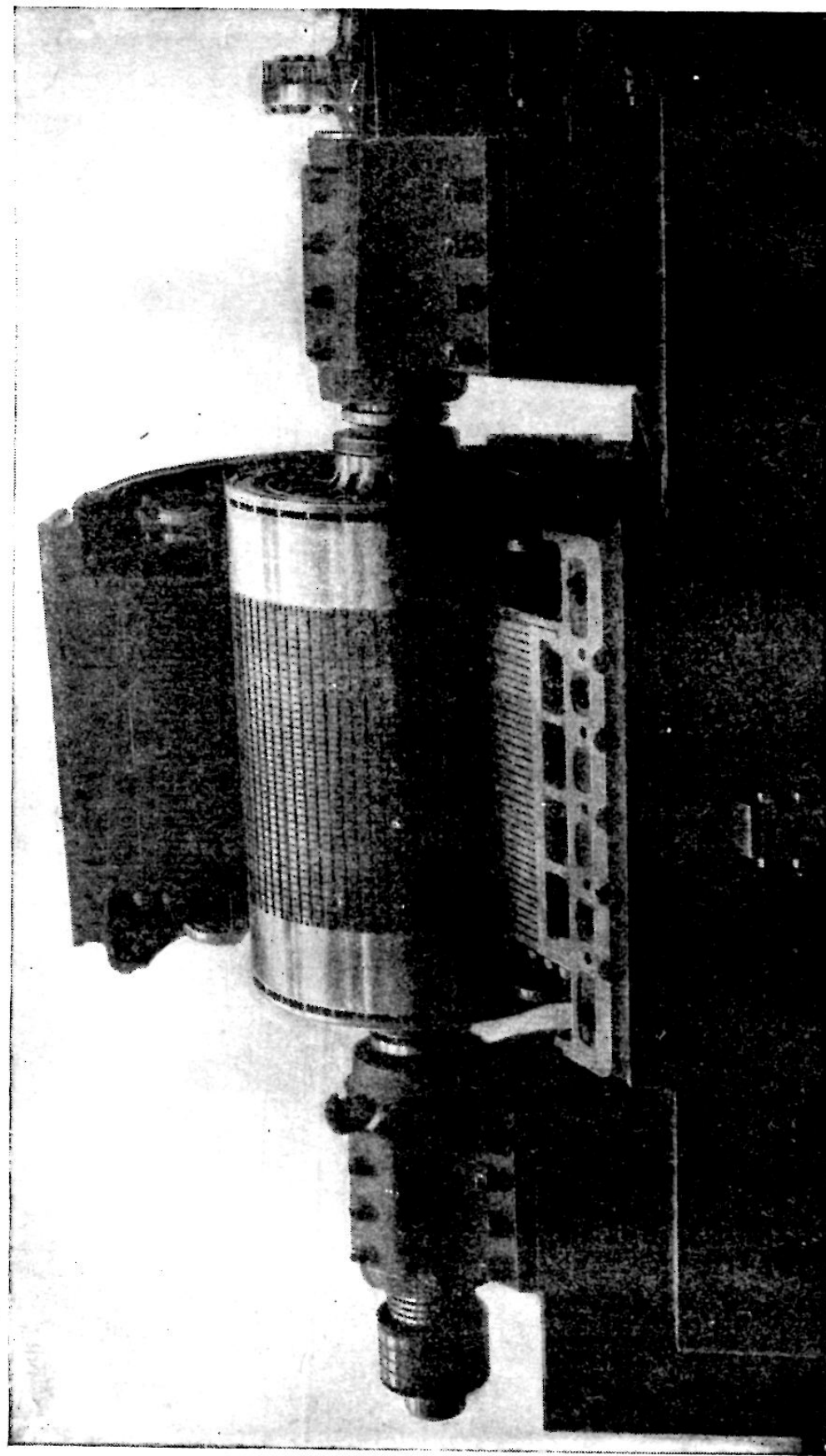


Fig. 99. — Coupe d'un turbo-alternateur. L'inducteur tournant n'a pas de pôles saillants.

Les paliers de ces machines sont à circulation d'huile et la machine elle-même est énergiquement ventilée de façon à pouvoir supporter une marche continue à pleine charge.

Ce sont des machines de ce genre qui fournissent l'énergie électrique au chemin de fer Métropolitain

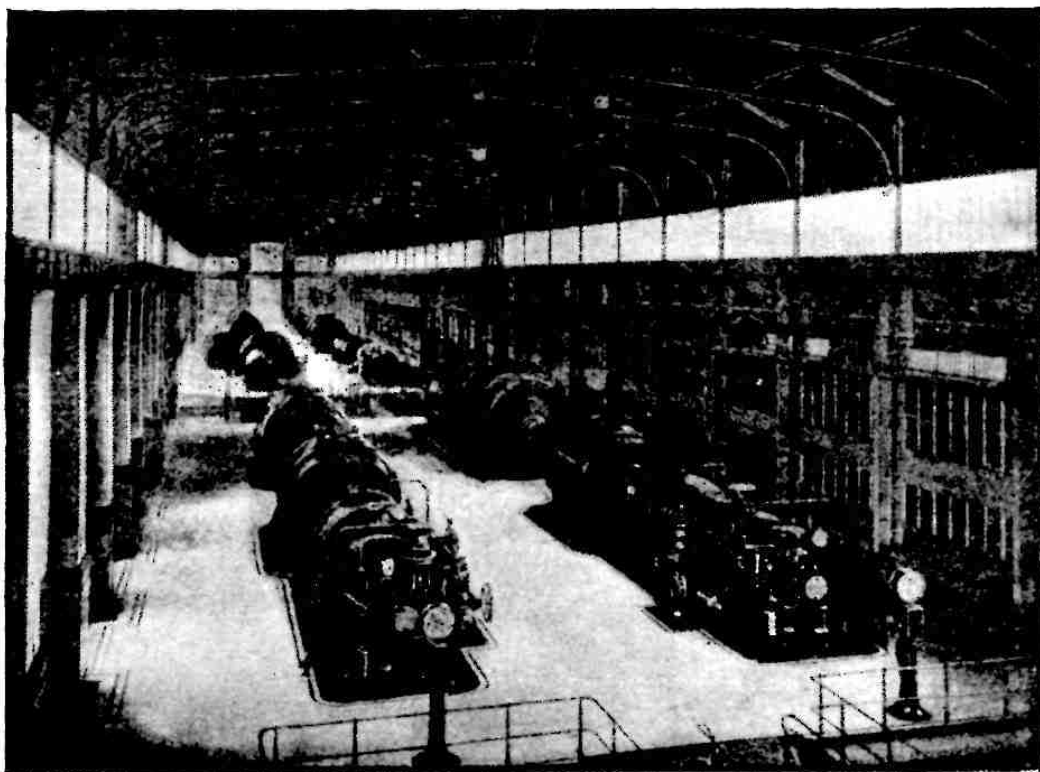


Fig. 100. — Vue intérieure de l'usine de Saint-Denis.

de Paris et ainsi que l'éclairage électrique de la ville de Paris.

La figure 100 donne une vue intérieure de l'usine de Saint-Denis dont la puissance dépasse 120.000 chevaux uniquement consacrés à l'alimentation de Paris; comme il est facile de le voir, toutes les unités sont constituées par des turbo-alternateurs, l'une de ces machines visible au milieu a une puissance de 20.000 chevaux à elle seule.

On conçoit aisément qu'une telle puissance aurait exigé un emplacement considérable s'il avait fallu l'obtenir avec des machines à pistons, de plus la surveillance aurait été plus difficile, et aurait nécessité plus de soins. L'usine de Saint-Denis, malgré sa puissance considérable de plus de 120.000 chevaux, exige à peine 10 hommes pour être surveillée, les manœuvres se font très aisément et du reste le réglage y est entièrement automatique.

La seule partie vraiment difficile à obtenir avec les turbines est le bon fonctionnement des dynamos excitatrices des alternateurs. Ces machines qui exigent un collecteur à lames supportent mal les vitesses excessives que leur impriment les turbines, aussi a-t-on été obligé de supprimer les excitatrices que l'on mettait généralement en bout d'arbre, on les commande, dans ce cas, par des moteurs spéciaux à allure plus lente.

L'expérience ayant montré que la production est d'autant plus économique qu'elle porte sur une plus grande quantité de matière fabriquée, de grandes usines se forment un peu partout et l'industrie électrique ne fait pas exception à la règle. C'est pour cela que nous voyons surgir de vastes stations de production de l'énergie électrique dans lesquelles les questions de rendement sont étudiées d'une façon toute spéciale. De là l'utilisation de ces groupes turbo-alternateurs que nous venons de signaler et dont l'emploi ne fera qu'augmenter dans l'avenir.

Peu à peu, en effet, les grandes compagnies de chemin de fer, les grandes manufactures et les industriels soucieux de leur intérêt suppriment leurs machines motrices et se relient aux grands réseaux de

distribution d'énergie électrique que l'on rencontre partout aujourd'hui. Grâce à cette concentration de la force motrice en un endroit favorable (près d'un cours d'eau ou près des mines) et grâce aux prix consentis pour l'achat de grandes quantités de charbon, l'énergie peut être obtenue dans de bonnes conditions et être vendue à des prix assez bas pour que l'industriel consente à supprimer ses anciens moteurs à vapeur ou à gaz et les remplace par des moteurs électriques qui ne réclament pas ou presque pas d'entretien et qui sont mis en marche et arrêtés avec la plus grande facilité. C'est pour cela que les alternateurs à volant que nous avons décrits en premier lieu disparaissent peu à peu et font place aux turbo-alternateurs d'un rendement meilleur et d'un encombrement beaucoup moindre.

5^e Alternateurs asynchrones.

Il existe une classe d'alternateurs très simples que l'on trouve installés dans d'anciens moulins pour utiliser de petites chutes d'eau correspondant à des puissances ne dépassant pas 50 à 60 chevaux, ce sont les alternateurs asynchrones dont le principe est le suivant :

Si l'on prend un moteur asynchrone triphasé d'un type courant, c'est-à-dire à cage d'écureuil ou à bagues (voir les *Moteurs électriques* par A. Soulier, p. 119 à 145), et qu'on le relie à un réseau à courants triphasés de tension et de fréquence appropriées, par exemple à 200 volts entre fils de phase et à 50 périodes par seconde, il se mettra à tourner, chose absolument normale, mais si au lieu de s'en

servir comme moteur, on manchonne son arbre avec celui d'un moteur thermique ou mieux à une turbine hydraulique que l'on règle pour entraîner le rotor à une vitesse *dépassant* celle du synchronisme, c'est-à-dire au delà de 1.500 tours par minute pour un moteur à 4 pôles recevant sur son stator du courant d'un réseau à la fréquence de 50 périodes par seconde, on constate que ce moteur devient *générateur* et envoie du courant vers le réseau, cela sans qu'il soit nécessaire de le coupler par l'intermédiaire d'indicateurs de phase comme dans les alternateurs précédents.

Cette propriété curieuse a permis de faire des installations extrêmement simples dans lesquelles il n'est nécessaire de prévoir qu'un régulateur à force centrifuge qui intervient pour empêcher l'emballement de l'ensemble si la liaison avec le réseau triphasé vient à être interrompue (1).

Il ne faut pas perdre de vue, en effet, qu'un tel alternateur ne possédant pas d'excitatrice comme les alternateurs décrits précédemment doit prendre sur le réseau les courants magnétisants qui lui sont nécessaires, il ne s'excite donc pas à vide à moins qu'il ne soit relié à une batterie de condensateurs de capacité convenable.

Ainsi donc, lorsqu'une telle machine est amenée au delà du synchronisme, elle fournit au réseau du *courant actif* correspondant à la puissance mise en

(1) Voir la *Revue générale de l'Electricité* un article de M. Besnard sur les usines génératrices automatiques de faible puissance, 18 mars 1939, p. 323, 331 et 25 mars 1939, p. 365, 373.

jeu par le moteur qui l'entraîne et absorbe sur le réseau du *courant réactif* (que l'on appelle assez improprement déwatté) pour son excitation.

On a pu équiper ainsi bien des moulins abandonnés et profiter de l'énergie de petits cours d'eau qui serait perdue sans cela.

CHAPITRE IV

INSTALLATION, ENTRETIEN ET COUPLAGE DES ALTERNATEURS

Installation. — Nous n'aurions rien à dire de l'installation des alternateurs qui rentrent en somme dans la catégorie des machines dynamo-électriques, si certaines précautions importantes n'étaient à observer dans leur cas particulier.

Les petits alternateurs dont la puissance n'excède pas 20 chevaux s'installent comme les machines à courant continu de même puissance, dont ils dérivent le plus souvent ainsi que nous l'avons vu.

Les fondations, les rails tendeurs, etc., sont identiques, mais on cherche de plus en plus à supprimer l'isolement de la masse métallique de la machine par rapport au sol en n'employant pas de madriers en bois.

Avec les alternateurs à haute tension on doit même s'efforcer de relier au sol le bâti de la machine, c'est là une des précautions importantes sur laquelle nous avons voulu appeler l'attention.

Ces machines fournissant des courants dont la force

électromotrice est considérée comme mortelle, peuvent accidentellement par suite du contact d'un des fils de l'induit avec la carcasse métallique devenir très dangereuses pour le personnel qui les entoure si cette carcasse est quelque peu isolée.

Il suffit, en effet, qu'un ouvrier ayant les pieds en contact avec une pièce métallique en bonne communication avec le sol (tuyau, balustrade, escalier métallique, etc.) vienne à poser la main sur le bâti d'une telle machine pour qu'il coure le risque d'être foudroyé. C'est facile à comprendre, le courant de fuite vers le sol ne pouvant passer par le bâti relativement assez bien isolé traversera le corps de l'homme qui formera le trait d'union entre le bâti et la terre. Ce danger se trouvera conjuré, si le chemin de fuite entre le bâti et le sol est bien établi à l'avance et l'on sait qu'il est plus facile d'obtenir ce résultat que d'avoir un bon isolement. En particulier dans une usine hydraulique il suffit que le bâti des alternateurs touche aux turbines pour être à l'abri de tels ennuis. Nous indiquons du reste à la fin de cet ouvrage les mesures à prendre en cas d'accident de personne provenant du contact fortuit avec des conducteurs à haute tension.

Une deuxième précaution importante est de chercher à rendre le démontage et la visite des alternateurs faciles. Ces machines qui fonctionnent cependant sous de hautes tensions ne sont pas toujours isolées suffisamment pour faire face à des surélévations de tension provenant soit de coups de foudre, soit d'autres phénomènes, l'isolant des bobines sera souvent percé et on sera conduit à les réparer sur place.

Nous avons indiqué, à propos des enroulements, comment on pouvait organiser un bobinage rendant

facile la séparation de la couronne induite en deux ou plusieurs morceaux, que l'on soulève et que l'on déplace à l'aide de ponts roulants ou de tout autre appareil de levage. D'autres constructeurs préfèrent disposer la couronne extérieure supportant l'induit

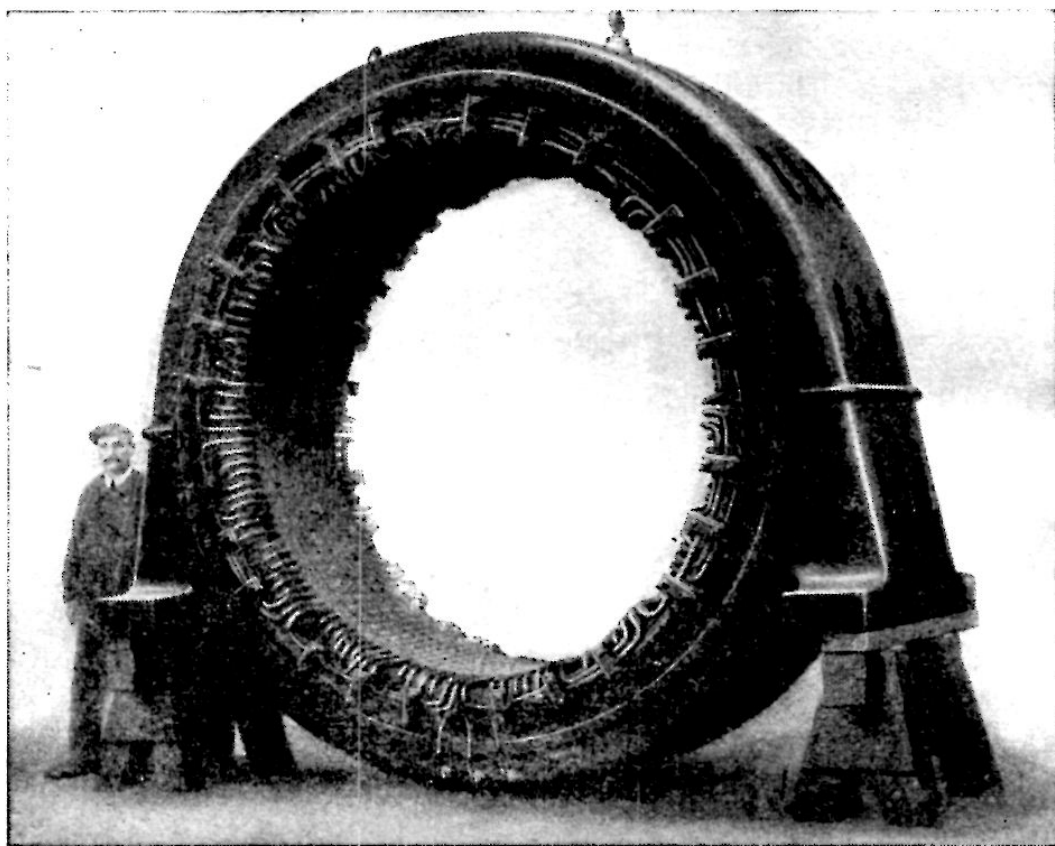


Fig. 101. — Stator d'un alternateur triphasé démonté.

sur des glissières consitutées par le bâti même de la machine, en sorte que si l'on veut visiter l'intérieur de la dynamo, il suffit de déplacer la couronne ou stator dans le sens de l'arbre; on peut alors réparer soit l'induit, soit l'inducteur, dont toutes les bobines sont accessibles. La figure 101 représente le stator d'un alternateur démonté pour réparation.

On doit aussi veiller, pendant le montage d'un alternateur, à ce que les centres de l'induit et de l'induc-

teur coïncident bien; s'il en était autrement, les pôles inducteurs passeraient trop près de l'induit en certains endroits; il en résulterait une attraction plus grande en ce point, pouvant amener une usure anormale des coussinets, ce qui aurait pour effet d'accroître encore le défaut. L'entrefer doit être le même partout; on s'en assure à l'aide de gabarits ou d'un instrument de mesure approprié, et s'il n'est pas régulier on corrige l'excentrage à l'aide de cales ou par des coins de rattrapage disposés entre l'induit et les plaques de fondation.

La dynamo excitatrice est fréquemment placée au bout de l'arbre de l'alternateur, c'est généralement une machine multipolaire, car les alternateurs sont dans la plupart des cas montés sur l'arbre même du moteur à vapeur ou de la turbine hydraulique qui les commande, machines dont la vitesse angulaire est faible et voisine le plus souvent de 100 tours par minute. Le déplacement des bobines inductrices de l'alternateur atteint, malgré cela, une vitesse élevée de 18 à 20 mètres par seconde à cause du diamètre du volant sur lequel elles sont fixées; mais il n'en est pas de même des fils placés sur l'induit de l'excitatrice, et ce n'est qu'en les faisant passer sous plusieurs pôles que l'on arrive à obtenir une force électromotrice convenable.

Entretien. — Les alternateurs demandent bien moins d'entretien que les machines dynamo à courant continu; ce sont des appareils plus mécaniques et moins délicats à cause de la suppression du collecteur à lames. Il reste, il est vrai, les deux bagues amenant le courant continu aux inducteurs mobiles; mais le contact est facile à obtenir, car les bagues sont lisses, les balais ne vibrent pas et ne produisent

plus le bruit de crécelle qui résulte du passage des lames sous les frotteurs avec les machines à courant continu.

L'entretien se borne à veiller au graissage pendant la marche, à visiter et à nettoyer la machine (alternateur et son excitatrice); mais seulement lorsqu'elle est au repos et qu'elle n'est reliée à la canalisation générale par aucun fil.

Couplage des alternateurs. — Les couplages que l'on réalise avec les alternateurs se réduisent à un seul : le couplage *en parallèle*. En effet, le couplage en série n'est employé avec les dynamos ou avec les piles, que lorsqu'on veut avoir des tensions élevées, difficiles à obtenir avec une seule machine ou une seule pile dont la force électromotrice est limitée soit par le collecteur dans les dynamos à courant continu comme nous l'avons vu, soit par la pile elle-même qui ne peut en aucun cas donner plus de 3 volts.

Avec les alternateurs, il en est tout autrement, et les tensions qu'ils peuvent produire n'ont d'autre limite, théoriquement, que la rigidité des isolants qui entourent les bobines; on a encore le moyen d'élever cette tension au moyen de transformateurs, si on ne désire pas la produire directement sur la machine même. On conçoit donc qu'il ne saurait être question de couplage en série des alternateurs, d'autant plus que ce serait pratiquement difficile à réaliser.

La marche en parallèle de ces machines offre, au contraire, un réel intérêt, car si les circuits alimentés ont une consommation trop grande, on pourra aider l'alternateur le plus chargé avec un autre; c'est ce que l'on fait journellement dans les grandes usines électriques.

Tandis que pour les dynamos à courant continu nous avons dû passer en revue le couplage en parallèle des machines à excitation série, shunt et compound, nous n'aurons pour les alternateurs qu'un seul système à envisager, car presque tous les alternateurs ont leur induit indépendant de leur inducteur, ce dernier utilisant du courant continu.

Nous devons faire remarquer, toutefois, que de très intéressants essais ont été faits en vue d'obtenir des alternateurs compound excités par du courant continu, obtenu au moyen des courants triphasés que produit l'alternateur. Nous citerons les alternateurs compound de M. Boucherot et ceux de M. Leblanc, qui résolvent élégamment le problème; cependant, comme la plupart des alternateurs que l'on rencontrera dans l'industrie sont à excitation indépendante, nous les examinerons plus spécialement. Ainsi que nous l'avons fait dans nos schémas précédents de dynamos, nous représenterons l'induit par un cercle sur lequel appuient deux balais; pour différencier un alternateur d'un dynamo à courant continu, nous figurerons une sinusoïde dans le cercle représentant l'induit de la machine à courant alternatif; nous laisserons en blanc le cercle de l'induit à courant continu, l'excitatrice, par exemple.

Le couplage en parallèle de générateurs à courant continu exige qu'ils donnent exactement la même force électromotrice et qu'ils soient à ce moment réunis par leurs pôles de même nom : positifs ensemble et négatifs ensemble. Avec les alternateurs il doit en être de même, mais s'il est facile de leur faire produire la même force électromotrice en agissant sur l'excitation, il est difficile de les réunir par leurs pôles de même nom, puisque ces derniers changent constamment.

On comprend très bien que si on couplait ces machines sans précaution, il pourrait se faire qu'on les réunisse à ce moment par leurs pôles de nom contraire, ce qui équivaldrait à faire un *court-circuit*, le courant circulant d'un alternateur à l'autre.

Le couplage en parallèle des alternateurs ne se fera donc dans de bonnes conditions :

1° Que si la communication entre deux pôles n'est établie qu'au moment où il y a concordance exacte des signes de ces deux pôles, au moment où ils sont tous deux négatifs ou tous deux positifs par exemple;

2° Il faut que cette concordance se maintienne constamment une fois le couplage fait.

Comme on le voit ce n'est pas simple et la dernière condition surtout, paraît difficile à réaliser, car la moindre variation de vitesse d'une des machines, risque à première vue de rompre l'accord. En réalité certains phénomènes contribuent à maintenir cette concordance, si une des machines tend à ralentir elle devient pendant un court instant un moteur à courant alternatif, elle emprunte du courant à sa voisine et elle reste *accrochée*, comme on le dit couramment, il ne faut pas cependant que le ralentissement soit trop grand, sans quoi il y aurait *décrochage*, ce qui équivaldrait pratiquement à un court-circuit. Mais comment peut-on s'assurer que les alternateurs donnent à chaque instant des pôles de même nom, entre les bornes que l'on veut réunir?

On y arrive en employant un *indicateur de phase*.

Supposons pour un instant que les alternateurs A_1 , A_2 soient bobinés pour donner la tension de 100 volts avec laquelle nous pouvons alimenter des lampes à incandescence de modèle courant (fig. 102). Mettons en marche nos deux alternateurs, excitons-les en

envoyant le courant des excitatrices C_1 et C_2 dans les inducteurs I_1 et I_2 , amenons les deux alternateurs

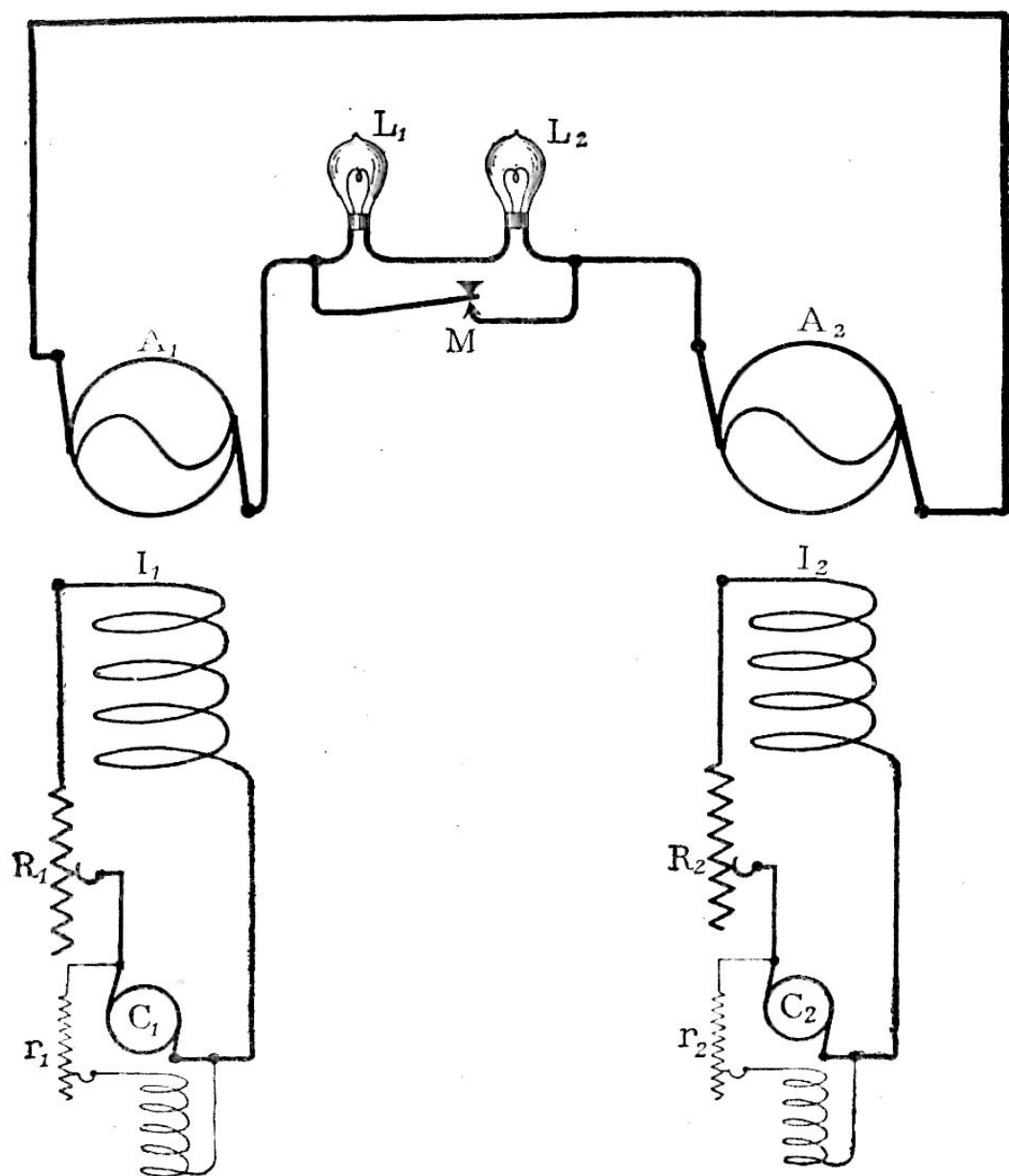


Fig. 102. — Couplage en quantité ou en parallèle des alternateurs.

à donner la même tension de 100 volts en agissant sur les résistances d'excitation R_1 et R_2 et réunissons-les à l'indicateur de phase L_1 et L_2 .

Cet indicateur est simplement constitué par deux

lampes montées en tension réunissant deux des pôles à coupler, tandis que les deux autres sont reliés directement comme on le voit sur la figure.

Si à ce moment on a couplé les alternateurs par leurs pôles de nom contraire, ils seront en série et les tensions qu'ils produisent s'ajouteront, les lampes nous le montreront en brillant d'un vif éclat.

Si au contraire on a réuni des pôles de même nom, positif avec positif ou négatif avec négatif, ils seront en parallèle comme ils donnent chacun 100 volts, rien ne passera dans les fils qui les relient et les lampes ne s'allumeront pas.

Mais à cause de la légère différence de vitesse entre les machines, cette concordance ne se maintient pas longtemps et peu à peu on voit les lampes s'allumer, puis elles s'éteignent de nouveau, ainsi de suite et cela à des intervalles d'autant plus éloignés que la différence des vitesses est plus petite. Il sera donc facile au mécanicien de ralentir ou d'accélérer l'allure d'une des machines en agissant sur les régulateurs de façon à laisser les lampes éteintes le plus longtemps possible (1). A ce moment on pourra mettre les lampes en court-circuit par l'interrupteur M et les machines seront couplées en parallèle, elles se maintiendront accrochées pourvu toutefois qu'il ne survienne pas de perturbation trop grande dans l'allure des machines qui les commandent (2).

(1) En pratique 10 secondes suffisent.

(2) Il est quelquefois très difficile de maintenir couplés des alternateurs en parallèle, particulièrement lorsqu'ils sont actionnés par des moteurs à piston (à vapeur ou à gaz); on conçoit très bien, en effet, que les coups de piston s'ils ne se produisent pas au même instant, puissent provoquer le décrochage par suite de l'accroissement brusque de vitesse qu'ils occasionnent. Pour remédier à cet inconvénient, on a proposé d'employer de lourds volants et des régulateurs sensibles, mais la question n'est pas encore complète-

En pratique dans l'industrie, les alternateurs fournissent des tensions supérieures à 100 volts, en sorte que l'indicateur de phase, tel que nous l'avons décrit, ne pourrait fonctionner, car les lampes seraient brûlées. On le conserve cependant, mais on l'alimente au moyen de petits transformateurs qui réduisent la tension à la valeur convenable et la ramènent à 100 volts; le dispositif reste en somme le même. Quelquefois au lieu de lampes on emploie des voltmètres et on constate que les phases sont en concordance en observant les aiguilles, on couple les alternateurs au moment où ces dernières approchent le plus du zéro.

Le nom d'indicateur de phase se comprend facilement, si l'on veut bien se reporter à la courbe du courant alternatif (page 214), on voit qu'il faut pour réaliser un bon couplage que les phases soient les mêmes aux mêmes instants de sorte que si on pouvait placer les courbes de courant de chaque alternateur l'une au-dessus de l'autre, elles se superposeraient; à ce moment un voltmètre ou une lampe joignant les deux alternateurs ne devraient indiquer le passage d'aucun courant. Si au contraire les phases sont en opposition, on aura une des phases au-dessus du zéro et l'autre au-dessous au même moment; le voltmètre ou la lampe recevront la différence de potentiel maxima et ces appareils fonctionneront.

Le schéma précédent indique clairement le montage des alternateurs tel qu'il se pratique aujourd'hui dans presque toutes les usines qui les utilisent.

ment élucidée et souvent le remède est pire que le mal. En tout cas, avec des alternateurs bien construits, actionnés par des turbines, l'accouplement se fait très facilement et se maintient très bien.

C_1 , C_2 sont les excitatrices à courant continu, excitées elles-mêmes en shunt et munies comme organe de réglage, d'un rhéostat d'excitation r_1 , r_2 . Le courant qu'elles produisent va directement du collecteur aux bobines excitatrices I_1 I_2 des alternateurs et pour faciliter la mise au point de la tension de ces derniers on a prévu sur le parcours des rhéostats d'excitation R_1 , R_2 .

On voit donc que le réglage de la tension des alternateurs pourra se faire d'une façon excessivement précise, en agissant sur R_1 , R_2 et aussi sur le champ magnétique des excitatrices au moyen des rhéostats r_1 , r_2 .

Pour terminer ce qui a trait aux alternateurs, qui produisent généralement des tensions élevées, presque toujours dangereuses et mortelles, nous donnerons quelques indications que tout le monde a intérêt à connaître aujourd'hui. Ces prescriptions sont relatives aux soins à donner aux personnes qui auraient subi accidentellement le contact avec des fils à haute tension, que cette tension soit fournie par des courants continus ou par des courants alternatifs.

Remarque. — Les alternateurs asynchrones décrits page 263 n'ont pas besoin d'indicateurs de phase pour être couplés, il suffit de mettre en position de « marche » l'interrupteur les reliant au réseau et de les entraîner au delà du synchronisme (voir le *Recueil de plans de pose* et *Schémas d'Électricité industrielle*, par A. Soulier, p. 156 et 157, 6^e édition et suivantes, Garnier frères, éditeurs).

CHAPITRE V

SOINS A DONNER AUX PERSONNES FOUDROYÉES PAR SUITE D'UN CONTACT AVEC DES CONDUCTEURS ÉLECTRIQUES A HAUTE TENSION

Toute personne foudroyée par suite d'un contact accidentel avec des conducteurs électriques devra toujours, *même dans le cas où elle présenterait les apparences de la mort*, recevoir avec la plus grande rapidité les soins indiqués ci-après par l'Académie de médecine consultée à cet effet.

Premier cas. — *Tout contact a cessé entre le corps de la victime et les conducteurs électriques.*

On transportera d'abord la victime dans un local aéré où on ne conservera qu'un petit nombre d'aides, trois ou quatre, toutes les autres personnes étant écartées.

On desserrera les vêtements, et on s'efforcera, *le plus rapidement possible*, de rétablir la respiration et la circulation. Pour rétablir la respiration, on peut

avoir recours principalement aux deux moyens suivants : la traction rythmée de la langue et la respiration artificielle.

1^o MÉTHODE DE LA TRACTION RYTHMÉE DE LA LANGUE

Ouvrir la bouche de la victime et, si les dents sont serrées, les écarter en forçant avec les doigts ou avec un corps résistant quelconque, morceau de bois, manche de couteau, dos de cuiller ou de fourchette, extrémité d'une canne, etc.

Saisir solidement la partie antérieure de la langue entre le pouce et l'index de la main droite, nus ou revêtus d'un linge quelconque, d'un mouchoir de poche par exemple (pour empêcher le glissement), et exercer sur elles de fortes tractions répétées, successives, cadencées ou rythmées, suivies de relâchements, en imitant les mouvements rythmés de la respiration ordinaire au nombre d'au moins vingt par minute.

Les tractions linguales doivent être pratiquées sans retard et avec persistance durant une demi-heure, une heure et plus s'il le faut.

2^o MÉTHODE DE LA RESPIRATION ARTIFICIELLE

Coucher la victime sur le dos, les épaules légèrement soulevées, la bouche ouverte, la langue bien dégagée.

Saisir les bras à hauteur des coudes, puis les écarter et les porter au-dessus de la tête, en décrivant un arc de cercle, les ramener ensuite à leur position primitive en pressant sur les parois de la poitrine.

Répéter ces mouvements environ vingt fois par

minute, en continuant jusqu'au rétablissement de la respiration naturelle.

Il conviendra de commencer toujours par la traction rythmée de la langue, en appliquant en même temps, s'il est possible, la méthode de la respiration artificielle.

D'autre part, il conviendra concurremment de chercher à ramener la circulation en frictionnant la surface du corps, en flagellant le tronc avec les mains ou avec des serviettes mouillées, en jetant de temps en temps de l'eau froide sur la figure, en faisant respirer de l'ammoniaque ou du vinaigre.

Deuxième cas. — *La victime est encore en contact avec les conducteurs électriques.*

Mesures d'ordre technique. — Avant d'appliquer le traitement indiqué par l'Académie de médecine, le sauveteur doit chercher à séparer le plus rapidement possible la victime des fils électriques, en évitant d'une manière absolue de toucher soit les fils, soit la victime *avec les mains nues*.

L'accident peut se produire avec l'une des circonstances suivantes :

- a) *Un fil est tombé sur le sol et touche la victime ;*
- b) *La victime est suspendue.*

Selon l'une ou l'autre de ces circonstances, on opérera comme il est dit ci-après :

a) **UN FIL EST TOMBÉ SUR LE SOL ET TOUCHE LA VICTIME.** — *Ecartement des fils.* — Si le sauveteur peut, sans avoir à toucher la victime, écarter le fil à l'aide d'un bâton, d'une canne ou d'un outil quel-

conque muni d'un *manche de bois* (1), il le fera en ayant soin :

1° De ne toucher le fil qu'avec le bâton, la canne ou l'outil *muni d'un manche en bois*;

2° De faire en sorte que le fil, dans cette manœuvre, ne vienne pas toucher le visage ou d'autres parties nues du corps de la victime.

Si le sauveteur ne dispose pas immédiatement d'un bâton, d'une canne ou d'un outil muni d'un manche en bois, il devra, avant tout, commencer par se recouvrir les deux mains (2), soit de gants épais (3), soit d'étoffes sèches (4) d'une épaisseur suffisante.

Cela fait, il écartera le fil.

Après avoir délivré la victime, on s'empressera de débarrasser des fils la voie publique afin d'éviter de nouveaux accidents.

(1) Le bois est conseillé parce qu'il est mauvais conducteur de l'électricité et intervient comme corps isolant. Si le manche en bois renferme une tige centrale métallique, il est nécessaire que cette tige soit complètement enveloppée de bois et *n'apparaisse en aucun point*.

(2) Il suffira souvent de retirer sa veste, son paletot, etc., et de les mettre sens devant derrière, les mains restant à l'intérieur des manches, qui devront être tamponnées pour former une forte épaisseur entre la peau et le contact à faire. Si on a une blouse, on se l'enroulera autour de la main droite et, autour de la main gauche, on enroulera un mouchoir, un gilet, etc.

(3) Gants de laine compacte, de préférence genre moufles, au besoin plusieurs paires de gants.

(4) *Renseignements sur la valeur isolante des étoffes et des vêtements.*

Etoffes. — Les étoffes à employer doivent être bien sèches; les plus convenables sont celles en laine; la flanelle et les couvertures en laine sont particulièrement convenables.

Les étoffes en fil et en coton sont moins préférables, surtout en raison de leur faible épaisseur; avec une épaisseur minima de dix millimètres, on a toute garantie, même avec les étoffes les moins convenables.

Vêtements. — Par analogie avec ce qui vient d'être dit, il faut prendre les draps en laine compacte de préférence et, dans le cas d'emploi de blouses en coton ou en toile, s'arranger pour avoir largement l'épaisseur minima indiquée.

Coupure du fil. — Si le sauveteur ne peut écarter le fil, il devra le couper à l'aide d'un outil tranchant à manche *non métallique*, une hache à manche de bois sec par exemple (1).

Il fera successivement deux coupures, en deux points situés de part et d'autre de la victime.

Il n'est pas nécessaire de couper le fil près de la victime; il est préférable de le couper près des poteaux de suspension, de façon que les parties restant adhérentes à ces poteaux ne touchent pas le sol, ou ne le touchent que sur la plus petite longueur possible.

Pendant que l'on coupe le fil, il faut veiller à ce qu'il ne rebondisse pas et n'aille toucher ni la victime ni le sauveteur. On pourra, dans ce but, maintenir le fil sous le pied par l'intermédiaire des matières isolantes, telles que du bois sec, planches, fagots, bottes de paille, vêtements secs, cordes sèches, etc.

Dégagement de la victime. — Si on ne peut effectuer les coupures des fils électriques dans les conditions qui viennent d'être indiquées, si le sauveteur est obligé de toucher la victime et s'il y a crispation des membres de la victime, des doigts par exemple, l'opérateur, avant de rien faire, devra commencer par se recouvrir les deux mains soit de gants (note 1), soit d'étoffes sèches d'une épaisseur suffisante (notes 2 et 4).

Puis il ouvrira de force la ou les mains de la victime en écartant les doigts les uns après les autres.

(1) La coupure n'est pas à conseiller dans le cas où le fil est parcouru par un courant continu à haute tension, à cause de l'étincelle d'extra-courant qui en résulte; on peut le faire plus facilement sur les conducteurs traversés par un courant alternatif. Les installations à haute tension à courants alternatifs étant jusqu'à présent les plus répandues on voit que les indications que nous donnons peuvent s'appliquer dans la plupart des cas.

Pendant cette opération :

1° Avoir soin que le fil ne revienne pas toucher le visage ou d'autres parties nues du corps de la victime ou du sauveteur;

2° Toucher autant que possible la victime par des parties qui ne soient pas en état de moiteur, telles que les aisselles, les pieds, etc.

b) LA VICTIME EST SUSPENDUE. — *Prévoir sa chute et prendre à cet effet les précautions convenables.* — A l'aide d'une échelle ou de tout autre moyen, on tâchera de s'élever jusqu'à la victime et de la délivrer en coupant le fil.

Le seul instrument convenable dans ce cas pour couper un fil est une cisaille; mais, comme le manche est généralement métallique, il faudra, avant d'employer cet outil, ou bien se couvrir les deux mains, comme il est indiqué précédemment, ou bien entourer le manche de l'instrument d'une épaisseur suffisante d'étoffes sèches (note 4).

Quand on aura atteint la victime, on la suspendra par des cordes ou on l'accrochera par ses vêtements, et on la descendra en évitant qu'elle soit mise en contact avec les fils.

Si on ne dispose d'aucun moyen pour arriver jusqu'à la victime, ou si, disposant d'une échelle, on ne possède pas un instrument convenable pour couper les fils et opérer comme il vient d'être expliqué, on devra *prévenir l'usine le plus vite possible.*

Remarque importante. — Dans aucun cas, le sauveteur ne doit toucher un fil sans s'être recouvert les deux mains, soit de gants épais (note 3), soit d'étoffes sèches d'une épaisseur suffisante (notes 2 et 4).

Si des rails sont placés sur la voie publique, il doit éviter de les toucher même avec ses chaussures.

Même les mains étant recouvertes conformément aux prescriptions, *le sauveteur ne doit, dans aucun cas, toucher simultanément deux fils différents, et il doit s'abstenir de toute manœuvre qui mettrait la victime en contact avec deux fils différents.*

Les personnes étrangères au service, à moins d'être exercées au maniement des fils et appareils électriques et d'en connaître parfaitement toutes les causes de danger, ne doivent, en aucun cas, chercher à établir *un court-circuit*.

Cette opération ne peut être faite utilement et sans danger que par des personnes compétentes.

En se conformant exactement aux précautions indiquées ci-dessus, le sauveteur ne court aucun risque, quand bien même il ressentirait accidentellement quelques secousses.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

LA PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE PREMIER			
LES PILES ET LEURS COUPLAGES.		Pôles.....	12
Considérations générales.....	1	Fantômes magnétiques.	12
Piles.....	1	Champ magnétique....	15
Couplages des piles....	4	Procédés d'aimantation	19
Générateurs mécaniques.....	9	Hystérésis.....	25
CHAPITRE II		CHAPITRE III	
MAGNÉTISME.		PRODUCTION DES COURANTS	
Notions générales.....	12	ÉLECTRIQUES AU MOYEN	
		DES AIMANTS.	
		Expérience.....	29
		Sens du courant produit	30
		Principe des machines.	32

DEUXIÈME PARTIE

LES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES A COURANT CONTINU

CHAPITRE PREMIER		Définitions.....	42
ENROULEMENTS EN ANNEAU.		Description de l'anneau	
— ENROULEMENTS EN TAMBOUR.		Gramme.....	42
Principe des enroulements.....	37	Enroulement en tambour.....	44
		Collecteur.....	50

Bobinage en tambour bipolaire.....	50
Enroulements multipolaires.....	53
Enroulement multipolaire à anneau en quantité.....	56
Enroulement multipolaire à tambour en quantité.....	58
Enroulement multipolaire à anneau en série.....	59
Enroulement multipolaire à tambour en série.....	62
Enroulement série-parallèle.....	72
Enroulements à encoches.....	73
Exemple de bobinage..	75

CHAPITRE II

CONSTRUCTION PRATIQUE DES INDUITS.

1° Arbre.....	79
2° Noyau de fer de l'induit.....	81
3° Collecteur.....	95
Soudures.....	100
4° Balais et porte-balais	103

CHAPITRE III

LES INDUCTEURS

Machines magnéto-électriques.....	114
Machines dynamo-électriques.....	114

Circuit magnétique....	115
Métal des inducteurs...	118
Formes des inducteurs..	120
Inducteurs bipolaires..	120
Inducteurs multipolaires.....	128

CHAPITRE IV

DIFFÉRENTS MODES D'EXCITATION.

Excitation séparée.....	137
Excitation en série.....	139
Excitation shunt ou en dérivation.....	141
Rhéostat d'excitation..	145
Excitation compound..	147
Dynamo à trois balais..	151

CHAPITRE V

CONSTRUCTION PRATIQUE DES BOBINES INDUCTRICES.....	152
--	-----

CHAPITRE VI

ACCESSOIRES DES MACHINES

Paliers.....	157
Rails tendeurs.....	161
Bornes.....	162

CHAPITRE VII

INSTALLATION, CONDUITE ET ENTRETIEN D'UNE MACHINE DYNAMO.

Installation.....	168
Entretien de la dynamo	176
Groupes électrogènes..	177

CHAPITRE VIII

DÉRANGEMENTS DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES.

La dynamo ne s'amorce pas.....	179
Échauffement exagéré de certaines parties de la dynamo.....	186
Fortes étincelles aux balais.....	189

Bruit et trépidations...	194
--------------------------	-----

CHAPITRE IX

COUPLAGES DES MACHINES.

Couplages en tension ou en série.....	199
Couplages en quantité ou en parallèle.....	201

TROISIÈME PARTIE

LES MACHINES A COURANTS ALTERNATIFS

CHAPITRE I

PRINCIPES DES MACHINES.

Principes des machines à courants alternatifs	210
Définitions.....	214
Alternateurs industriels	214
Classification des alternateurs.....	218

CHAPITRE II

ALTERNATEURS A COURANTS TRIPHASÉS.

Principe des alternateurs à courants triphasés.....	221
Propriété des courants triphasés.....	225

CHAPITRE III

CONSTRUCTION PRATIQUE DES ALTERNATEURS.

1° Alternateurs à induit fixe.....	228
Détails de construction.	236
Montage des inducteurs	238
2° Alternateurs à induit mobile.....	244
3° Alternateurs à induits et inducteurs fixes.....	252
4° Turbo-alternateurs..	259
5° Alternateurs asynchrones.....	263

CHAPITRE IV

INSTALLATION, ENTRETIEN ET COUPLAGE DES ALTERNATEURS.

Installation.....	266
Entretien.....	269

Couplage des alternateurs.....	270	TRIQUES A HAUTE TENSION.	
CHAPITRE V		Premier cas. — Tout contact a cessé.....	277
SOINS A DONNER AUX PERSONNES FOUDROYÉES PAR SUITE D'UN CONTACT AVEC DES CONDUCTEURS ÉLEC-		Deuxième cas. — La victime est encore en contact avec les conducteurs électriques.	279
		Remarque importante.	282

ACHEVÉ D'IMPRIMER SUR LES
PRESSES DES IMPRIMERIES
PAUL DUPONT, A PARIS
LE 19 JUIN 1947
NUMÉRO D'ÉDITION : 144
NUMÉRO D'IMPRESSION : 1183
DÉPOT LÉGAL EFFECTUÉ :
2^e trimestre 1947