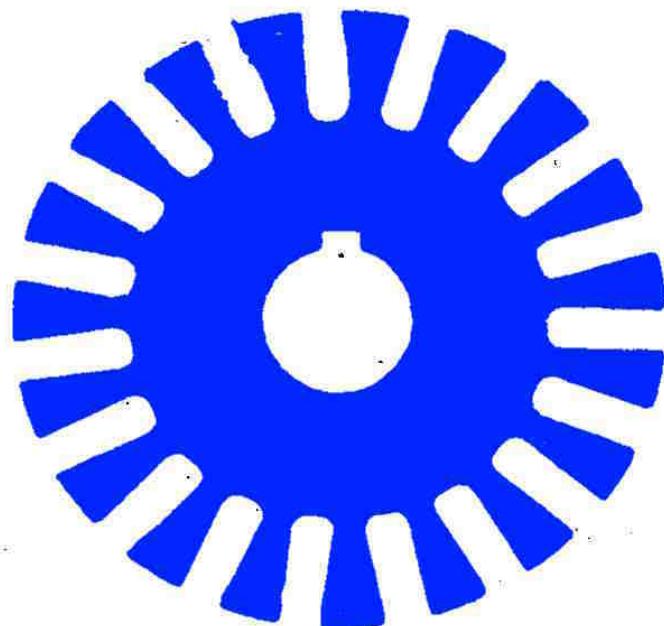


ALFRED SOULIER

Ingénieur-Electricien, Expert près la Cour d'Appel
Inspecteur de l'Enseignement Technique
Rédacteur en chef de la " Revue générale de l'Électricité "

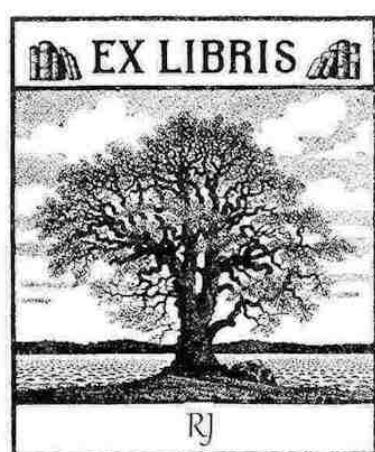
LES MOTEURS ÉLECTRIQUES

MOTEURS A COURANT CONTINU. — MONTAGE. —
ENTRETIEN. — MISE EN MARCHE. — MOTEURS A COU-
RANTS ALTERNATIFS. — BOBINAGE. — RÉPARATION. —
ADAPTATION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES AUX
MACHINES-OUTILS. — TRACTION ÉLECTRIQUE.



PARIS
LIBRAIRIE GARNIER FRÈRES
6, RUE DES SAINTS-PÈRES, 6

1942



Numérisé par Serge Laffont en Aout 2025 , 300dpi

LES MOTEURS ÉLECTRIQUES

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR :

Traité pratique d'électricité. — 124^e mille. — Sonneries, téléphones, éclairage, rayons X, télégraphie sans fil, dictionnaire des mots techniques. 1 v. in-16, illustré, broché.

Installations électriques. — 110^e mille. — Outilage, appareillage, canalisations, mesures électriques, transformateurs, etc. 1 volume in-16, illustré, broché.

Manuel de l'électricien. — 83^e mille. — Machines dynamos-électriques, construction, installation, entretien, dérangements. 1 volume in-16, illustré, broché.

Les moteurs électriques. — 90^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. — 45^e mille. — Eclairage, transmission de la force à distance, tramways et chemin de fer électriques, électrochimie, etc. 1 volume in-16, illustré, broché.

Le courant continu. — 30^e mille. — Le courant électrique, les piles hydro-électriques, les aimants, circuit magnétique, etc. 1 volume in-16, illustré, broché.

Les courants alternatifs. — 26^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. — 22^e mille. — Chromage, cuivrage, nickelage, 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. — 35^e mille. — Sonneries, téléphones, lumière, minuterie, dynamos et moteurs à courant continu alternateurs, transformateurs, commande à distance des moteurs, etc. 1 volume in-8° oblong, cartonné.

Lignes électriques et postes à haute tension et règlements s'y rapportant. — 6^e mille. — 1 vol. in-16, illustré, broché.

Le cinéma parlant. — 5^e mille. — Procédés d'enregistrement électrique des sons, prises de vues et des sons, appareils de projection et de reproduction sonore. 1 vol. in-16, illustré, broché.

L'électricité sans algèbre. — 12^e mille. — Cours complet et pratique accessible à tout le monde. 1 vol. in-16, illustré, broché.

ALFRED SOULIER

Ingénieur-Électricien E. P. C. I.

Inspecteur de l'Enseignement Technique

Ex-Chef du service électrique de la Section technique de l'Artillerie

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

LES

MOTEURS ÉLECTRIQUES

**MOTEURS A COURANT CONTINU. — MONTAGE. —
ENTRETIEN. — MISE EN MARCHE. — MOTEURS A COU-
RANTS ALTERNATIFS. — BOBINAGE. — RÉPARATION. —
ADAPTATION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES AUX
MACHINES-OUTILS. — TRACTION ÉLECTRIQUE**

TREIZIÈME ÉDITION
entièrement refondue et mise à jour.



PARIS

LIBRAIRIE GARNIER FRÈRES

6, RUE DES SAINTS-PÈRES, 6

PRÉFACE

Le moteur électrique a eu dans l'industrie des débuts plutôt difficiles. Avant la découverte du principe de la réversibilité des machines dynamo-électriques, Froment avait imaginé un premier moteur formé d'une série de palettes de fer doux que des électro-aimants faisaient tourner en les attirant, mais cette machine n'avait qu'une puissance insignifiante et un mauvais rendement, ce qui fit dire à des savants de l'époque que le moteur électrique ne serait jamais pratique.

Que de pas ont été faits depuis cette époque ! C'est d'abord l'utilisation de la dynamo à courant continu comme moteur, ainsi qu'on le vit dans les premières expositions, puis l'apparition des courants polyphasés, et enfin le retour au moteur série, désigné sous le nom de « moteur universel », employé aujourd'hui pour actionner un grand nombre d'appareils électro-domestiques ainsi qu'en traction électrique

A côté de ces importantes utilisations, il est

d'autres cas où le moteur électrique a été appelé à jouer un rôle important, en particulier dans la transformation de l'atelier moderne. Aujourd'hui, nous voyons disparaître peu à peu les transmissions mécaniques par courroies, lourdes et encombrantes; par deux ou trois câbles à peine visibles, l'énergie électrique se faufile partout, jusque dans la chambre de l'ouvrier, apportant, en même temps qu'une force motrice souple et régulière, une lumière belle et hygiénique. Peu à peu, le moteur électrique s'est introduit dans nos villes et nos campagnes; c'est lui qui est l'âme de notre industrie.

Devant un tel essor, il n'était pas sans intérêt de rassembler en quelques pages ce qui concerne ce précieux auxiliaire qu'est le moteur électrique; c'est ce que nous avons cherché à faire en suivant toujours notre programme habituel qui est de donner des renseignements essentiellement pratiques et de faire toucher du doigt les points importants de ces nouvelles questions. Examinant d'abord le fonctionnement des moteurs à courant continu, nous avons passé en revue les divers modes de montage, donnant en même temps que les schémas corrects ceux qui occasionnent des accidents, afin de prévenir le débutant.

Passant aux moteurs à courants alternatifs dont

l'usage se répand de plus en plus, nous avons cherché à en expliquer la marche sans calculs, tout en indiquant leurs avantages et leurs inconvénients.

Enfin, les principales applications de ces divers moteurs ont également été envisagées; puissent-elles montrer à nos lecteurs que ce court aperçu aura intéressé tous les avantages qu'ils pourront retirer du moteur électrique.

LES MOTEURS ÉLECTRIQUES

PREMIÈRE PARTIE

MOTEURS A COURANT CONTINU

CHAPITRE PREMIER

RÉVERSIBILITÉ DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

Principe. — Depuis longtemps, on a constaté que si l'on relie par des fils conducteurs les balais de deux machines magnéto-électriques à courant continu, à anneau de Gramme, par exemple, il suffit de faire tourner un des induits, soit à la main, soit par une courroie, pour voir l'induit de l'autre machine se mettre en mouvement.

Cette expérience a été le point de départ de l'emploi des machines électriques comme moteurs, soit qu'on veuille utiliser l'énergie électrique transmise de très loin par de simples fils conducteurs, soit pour remplacer dans une usine les transmissions par courroie reconnues universellement aujourd'hui comme défectueuses à beaucoup de points de vue.

Le phénomène qui se passe quand on envoie du courant continu dans l'induit d'une machine magné-

to-électrique peut s'expliquer de plusieurs façons, comme on va le voir :

1^o On sait qu'une aiguille aimantée, librement suspendue, se met en croix avec un courant passant dans le voisinage, et, inversement, une bobine mobile parcourue par un courant s'oriente en présence d'un aimant d'une façon analogue ¹.

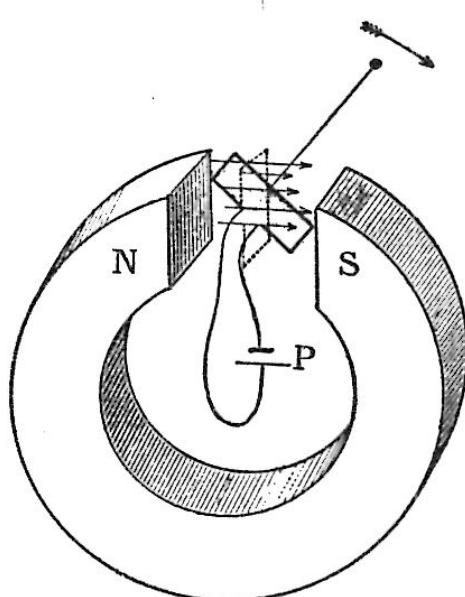


FIG. 1.
Principe des moteurs.

Cette propriété a été utilisée dans les ampèremètres et voltmètres à cadre mobile, très répandus aujourd'hui, de la façon suivante :

Entre les pôles d'un aimant NS (fig. 1) dont les lignes de force vont du pôle N au pôle S en suivant les flèches de la figure, on dispose un cadre mobile formé d'une ou plusieurs spires de fil isolé que l'on relie à une pile ou à une

source quelconque de courant continu.

Si la bobine est suffisamment mobile, montée sur pivots par exemple, elle se déplace aussitôt de façon à embrasser le plus possible de lignes de force.

Cette déviation est mise à profit dans les appareils de mesure pour indiquer sur un cadran la valeur du courant qui traverse la bobine; mais, dans ce cas, le cadre entraîne des ressorts antagonistes, en sorte qu'il s'établit vite un équilibre entre l'effort dû au courant et celui dû aux ressorts.

1. Voir *l'Électricité sans algèbre*, p. 191,

On conçoit très bien que sans ces ressorts la bobine continuerait son chemin et tendrait à se mettre dans la position indiquée en pointillé. Si, à ce moment, on dispose une autre bobine traversée par le courant et placée dans la position qu'occupait la première bobine au début de l'expérience, elle va tendre à tourner, elle aussi, d'un quart de tour, et si on admet que ces deux bobines sont solidaires et munies d'un

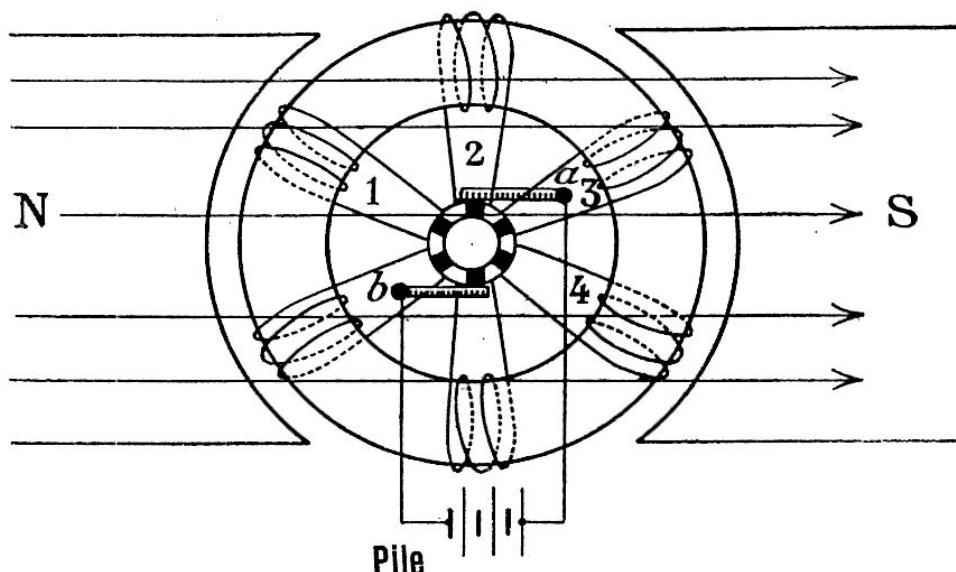


FIG. 2. — Moteur à courant continu à anneau Gramme.

dispositif qui leur communique successivement le courant, on aura une rotation continue, d'autant plus régulière qu'il y en aura un plus grand nombre.

2^o Considérons un anneau Gramme disposé entre les pièces polaires d'un aimant NS (fig. 2).

L'anneau étant au repos, relions ses balais *a*, *b* à une source de courant continu : pile, machine ou réseau, et examinons ce qui va se passer.

La bobine 1, par exemple, qui est en partie traversée par le flux magnétique de l'aimant dont les lignes de force vont de N vers S, recevant le courant

fourni par la pile, par l'intermédiaire du collecteur, aura une tendance à se redresser, en particulier si le flux que produit le courant au centre de cette bobine concorde avec le flux de l'aimant NS.

Une des lois fondamentales de l'induction dit, en effet, que lorsque deux champs magnétiques sont en présence, les organes qui les produisent tendent à s'orienter de façon à ce que le champ magnétique résultant soit aussi grand que possible¹.

Toutes les bobines de l'anneau Gramme seront donc le siège d'efforts tendant à rendre maximum le flux à l'intérieur de ces bobines, la bobine 1 sera, par exemple, sollicitée à prendre la place de la bobine 2; mais, à ce moment, le courant changera de sens par suite du passage du balai sur les lames correspondantes du collecteur. Le flux changera également de sens dans cette bobine, ce qui l'entraînera à tourner jusqu'à présenter sa face arrière au pôle S, position pour laquelle il y aura concordance du nouveau flux avec celui de l'aimant, et ainsi de suite. En tournant, toutes les bobines occuperont successivement les positions de la bobine 1, les effets s'ajouteront et l'anneau Gramme tournera d'une façon continue.

3^o On peut, enfin, expliquer encore ce phénomène d'une façon plus claire encore (fig. 3) :

Soit un conducteur formé d'une barre A en cuivre rouge, disposée à la surface d'un cylindre de fer doux tournant (dans le sens de la flèche courbe) dans un champ magnétique, problème que nous avons envi-

1. A. SOULIER : *L'Electricité sans algèbre*, p. 191. Garnier frères, éditeurs.

sagé dans l'étude des machines dynamo-électriques¹. Si ce conducteur est entraîné dans le sens de la flèche courbe, il coupe les lignes de force allant de N vers S, et nous savons en appliquant la règle des trois doigts qu'il sera le siège d'une force électromotrice déterminant un courant allant d'avant en arrière : il suffit, en effet, de mettre le pouce de la main droite dans le sens du déplacement, (en étendant le bras droit), l'index dans le sens des lignes de force, pour voir tout

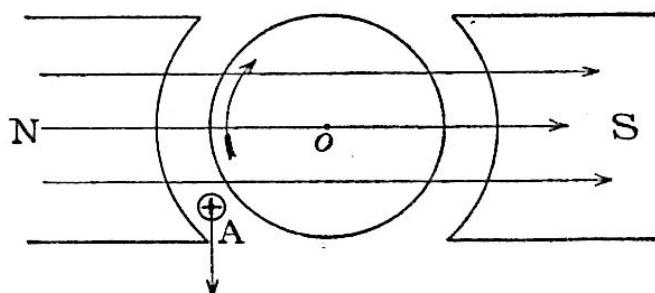


FIG. 5. — Conducteur parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique.

de suite le troisième doigt, ou médius, indiquer un courant allant de l'observateur vers le papier. Ce courant n'est obtenu qu'au prix d'un certain *effort* employé à couper les lignes de force. Par conséquent, on peut dire que l'effort mécanique qu'il faut faire pour maintenir le conducteur en mouvement dans le sens indiqué par la flèche courbe est destiné à vaincre la résistance offerte par les lignes de force que ce conducteur doit couper. Cet effort résistant s'exerce en sens inverse de la rotation, représentons-le par une flèche fixée en A.

Supposons que l'on maintienne le courant dans le

1. Voir le *Manuel de l'Électricien*, par A. SOULIER, librairie Garnier frères, p. 36.

conducteur A, en l'empruntant à une pile ou à toute autre source à courant continu, et diminuons peu à peu l'effort mécanique que nous exerceons pour faire tourner le cylindre dans le sens de la flèche courbe, la force appliquée en A l'emportera puisque nous maintenons le courant dans le conducteur, ce qui lui permet de continuer à subir l'action des lignes de force du champ magnétique, et le conducteur sera entraîné en sens inverse. C'est là toute la théorie du moteur électrique à courant continu.

Au lieu d'un seul conducteur, nous en disposerons plusieurs et l'effet produit sera augmenté; pour cela, nous pourrons nous arranger de façon à ce que les conducteurs passant sous un même pôle soient parcourus par des courants de même sens, d'arrière en avant sous le pôle N, et d'avant en arrière sous le pôle S.

Pour arriver à ce résultat, il suffit de prendre un enroulement en anneau ou en tambour avec un collecteur et une paire de balais, ainsi qu'il est facile de le voir (fig. 4).

Force contre-électromotrice. — Laissons tourner notre anneau Gramme sous l'action de la pile ou de l'accumulateur qui lui fournit le courant et examinons ce qui se passe lorsque nous intercalerons un ampèremètre dans le circuit. Disposons également un voltmètre entre les balais de notre machine fonctionnant comme moteur (fig. 4).

Au moment précis où nous établissons le courant en agissant sur l'interrupteur I, nous verrons l'aiguille de l'ampèremètre dévier brusquement et marquer un chiffre d'ampères élevé.

Si nous observons en même temps l'aiguille du voltmètre, nous ne la verrons pas bouger tant que l'induit ne se sera pas mis en mouvement.

A mesure que l'induit tournera, on verra la déviation de l'ampèremètre diminuer peu à peu, tandis que celle du voltmètre ira en augmentant.

Enfin, quand notre machine tournera à pleine

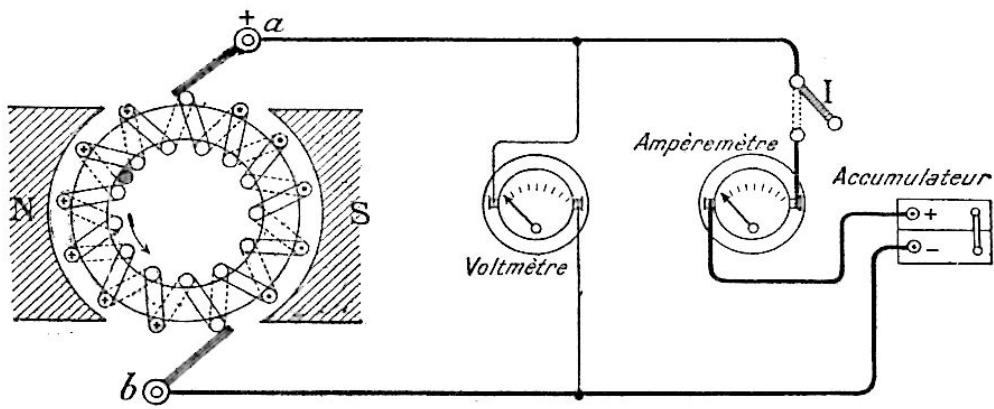


FIG. 4. — Expérience montrant la présence de la force contre-électromotrice.

vitesse, c'est à peine si l'ampèremètre marquera. tandis que le voltmètre dévierait au maximum.

Que se passe-t-il et que signifient les indications des deux appareils de mesure ?

Tant que l'induit est au repos, le courant de l'accumulateur passe librement, car il n'a à vaincre que la résistance très faible de l'ampèremètre et des fils de l'induit ; il circule alors une intensité élevée.

Sous l'effet du courant circulant dans l'anneau, courant qui réagit, comme nous l'avons vu, sur le champ NS de l'inducteur, l'induit se met en mouvement et tourne dans le champ magnétique. Mais dès l'instant qu'il tourne, quelle que soit la cause qui le met en mouvement, il va se développer dans l'enroulement

une force électromotrice; c'est le principe même de la production du courant dans les dynamos. En appliquant la règle des trois doigts, il est facile de voir que ce courant est de sens inverse de celui qui produit la rotation, d'où le nom de *force contre-électromotrice* à la cause qui lui a donné naissance. Voilà pourquoi, à mesure que la vitesse de la machine s'accroît, on voit

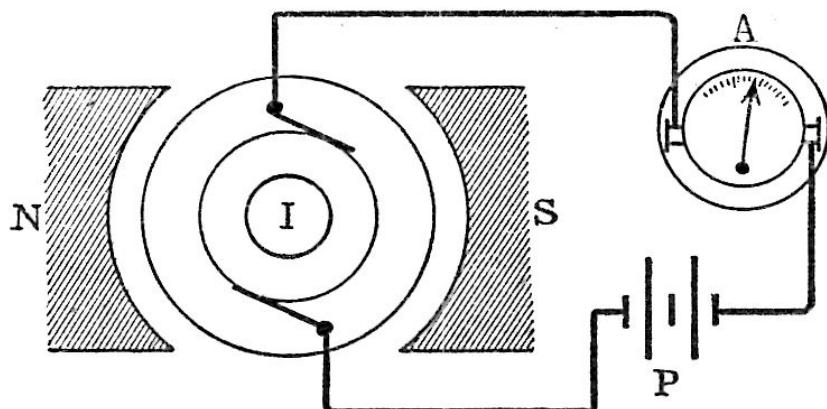


FIG. 5. — Machine à courant continu fonctionnant en moteur.

les indications du voltmètre augmenter peu à peu; cet appareil nous indique la présence de la force contre-électromotrice que le raisonnement nous avait fait trouver.

Les indications de l'ampèremètre diminuent pour la même raison; on peut dire qu'au courant de démarrage se superpose un autre courant de sens inverse provoqué par la rotation et qui a une tendance à annuler le premier.

On constate ainsi qu'à vide, c'est-à-dire sans charge, c'est à peine si le moteur laisse passer quelques ampères, tandis que si on fait frein sur la poulie, on voit aussitôt cette consommation augmenter. Cela tient à ce que, par le freinage, on diminue la vitesse de l'induit, la force contre-électromotrice

faiblit aussi, et le courant de la source, n'étant plus contre-balancé, circule avec une intensité plus grande¹.

Il en résulte que si on arrivait à caler le moteur et si on l'empêchait de tourner, il recevrait tout le courant de la source et s'échaufferait dangereusement. C'est ce qui pourrait se produire à la mise en marche, lorsque l'induit est au repos; aussi, pour éviter un accident de ce genre, prévoit-on pour les moteurs un peu puissants (à partir de 500 à 1 000 watts) un rhéostat de démarrage.

Rhéostat de démarrage. — Prenons un moteur de 30 chevaux, fonctionnant à 110 volts. Si nous mesurons au repos la résistance de l'induit entre balais, nous trouvons dans les environs de *deux centièmes* d'ohm (0,02), par conséquent, si sur cet induit au repos nous appliquons les 110 volts de la canalisation sans précaution, il passera, en vertu de la loi d'Ohm, un courant $I = \frac{E}{R} = \frac{110}{0,02} = 5\,500$ ampères.

Ce courant énorme ne pouvant être supporté par les fils, le moteur pourra arriver à brûler, si toutefois la canalisation peut elle-même fournir un courant de cette intensité.

1. La présence de la force contre-électromotrice se décèle facilement dans l'expérience précédente en interrompant en I (fig. 4) le courant d'alimentation, une fois l'induit en pleine vitesse. On voit à ce moment le voltmètre marquer quoique le circuit de la source soit interrompu en I, il est alors évident que ses indications sont fournies par le déplacement de l'induit, du reste l'aiguille du voltmètre revient au zéro sitôt que l'induit est arrêté.

Pour diminuer cet afflux de courant, tant que le moteur est au repos, on intercale dans le circuit une *résistance* ou *rhéostat* que l'on appelle rhéostat de démarrage destiné, comme son nom l'indique, à être retiré du circuit lorsque le moteur a pris sa vitesse. La figure 6 montre comment on dispose ce rhéostat dans le circuit dans le cas le plus simple : celui d'un

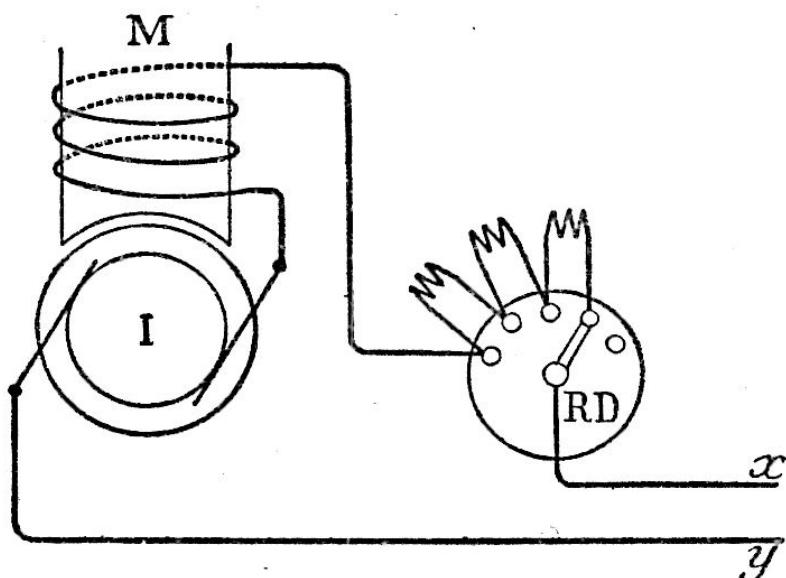


FIG. 6. — Démarrage d'un moteur-série.

moteur à excitation série; nous verrons plus loin comment on procède avec des moteurs excités en dérivation.

Ainsi donc, en admettant le courant sur un moteur électrique à travers une résistance de démarrage, on voit peu à peu l'induit se mettre en mouvement, puis à mesure que la vitesse augmente on arrive, par la manœuvre de la manette du rhéostat, à diminuer progressivement cette résistance.

Lorsque le moteur a atteint sa vitesse, on peut supprimer complètement le rhéostat. En effet, à ce moment, la vitesse est telle que la force contre-élec-

CHAPITRE II

LES DIFFÉRENTS SYSTÈMES D'EXCITATION DES MOTEURS A COURANT CONTINU

Comme dans les dynamos, génératrices, les inducteurs des moteurs à courant continu peuvent recevoir trois sortes d'enroulement :

- 1^o Un enroulement en série ;
- 2^o Un enroulement en dérivation ;
- 3^o Un enroulement compound ou composé.

1^o Moteurs-série. — Dans le moteur-série, comme son nom l'indique, l'enroulement inducteur est *en série* ou en tension avec l'induit ; de cette façon, il est traversé par *tout* le courant de l'induit.

Très employé dans les tramways électriques, chemins de fer électriques, les appareils ménagers, etc., le moteur-série possède des avantages et des inconvénients que nous allons examiner.

Avantages. — Ainsi qu'on le voit au seul aspect de la figure 6, l'enroulement inducteur étant traversé par le courant total de l'induit, l'excitation ou l'aimantation sera d'autant plus énergique que ce courant sera plus intense.

Il en résulte que l'effort exercé par l'induit au

moment du démarrage pourra être considérable, et cela se conçoit, puisque en somme l'électro-aimant inducteur et l'enroulement induit peuvent être assimilés à deux électro-aimants en présence, traversés par le même courant. Augmentons ce courant, et l'effort augmentera bien plus rapidement que le courant lui-même, puisque cet effort sera le résultat de l'attraction produite par l'inducteur sur l'induit augmenté de l'attraction de l'induit sur l'inducteur, chacun de ces enroulements étant considéré comme s'il était seul¹.

C'est cette remarquable propriété qui a fait le succès de la traction électrique; en installant un moteur-série sur une voiture, on constate que si on double le courant qui l'alimente l'effort devient *quadruple*; si on triple le courant, l'effort devient 9 fois plus grand, et ainsi de suite. Dans ces conditions, le moteur peut donner des coups de collier excessivement énergiques qui permettent au véhicule d'aborder des rampes très fortes à des vitesses relativement grandes, mieux que ne le ferait aucun autre système de traction.

Un autre avantage du moteur-série est d'être moins coûteux que les autres, l'enroulement à gros fil étant moins cher à poids égal qu'un enroulement à fil fin; pour cette raison aussi, il est plus robuste; enfin, il peut vaincre des surcharges considérables sans danger, si l'effort exceptionnel qu'on lui demande est de courte durée.

1. On résume la chose en disant que dans le moteur-série le couple est proportionnel au *carré* du courant, mais cette propriété n'est applicable qu'autant que le fer n'est pas saturé de lignes de force magnétiques.

Inconvénients. — A vide, le moteur-série *s'emballe*, et la raison en est simple si l'on veut bien se reporter à ce que nous avons dit au sujet de la force contre-électromotrice. Admettons que nous alimentions par une canalisation à tension constante de 110 volts un moteur-série dont la poulie ne portera pas de courroie ou n'actionnera aucun organe, que va-t-il se passer ?

Tout d'abord, le moteur démarra très rapidement, et si nous intercalons un ampèremètre dans le circuit, on verra l'intensité, grande au début, diminuer bien vite par suite de ce que l'induit tournant dans le champ magnétique fourni par les inducteurs développe une force contre-électromotrice qui croît avec la vitesse.

Mais si le courant diminue, l'excitation de l'inducteur diminue aussi, puisque cet enroulement est traversé par le courant de l'induit; le champ magnétique étant affaibli, l'induit doit tourner plus vite pour produire la même force contre-électromotrice.

Comme le moteur n'entraîne aucune charge, le courant qu'il absorbe est très faible et le champ magnétique de ses inducteurs aussi, il en résulte qu'il doit tourner à vide à une vitesse considérable pour que sa force contre-électromotrice arrive à contre-balancer la force électromotrice du réseau, il pourra arriver que cette vitesse soit telle que l'induit *éclate* sous l'effet de la force centrifuge; on évitera donc de laisser marcher à vide des moteurs-série, en ne les employant que sur des tramways électriques ou pour conduire des ventilateurs qui réclament un effort croissant avec la vitesse et qui éviteront tout emballlement.

Au contraire, lorsque l'on charge un moteur-série, sa vitesse diminue rapidement, sa force contre-élec-

tromotrice aussi, au point qu'elle ne contre-balance plus la force électromotrice du réseau; il en résulte qu'un courant plus intense circule dans les enroulements, venant augmenter automatiquement l'effort que le moteur doit fournir.

Si donc l'on se sert d'un moteur-série pour actionner une grue électrique, on constatera que les objets légers seront enlevés rapidement, tandis que l'allure

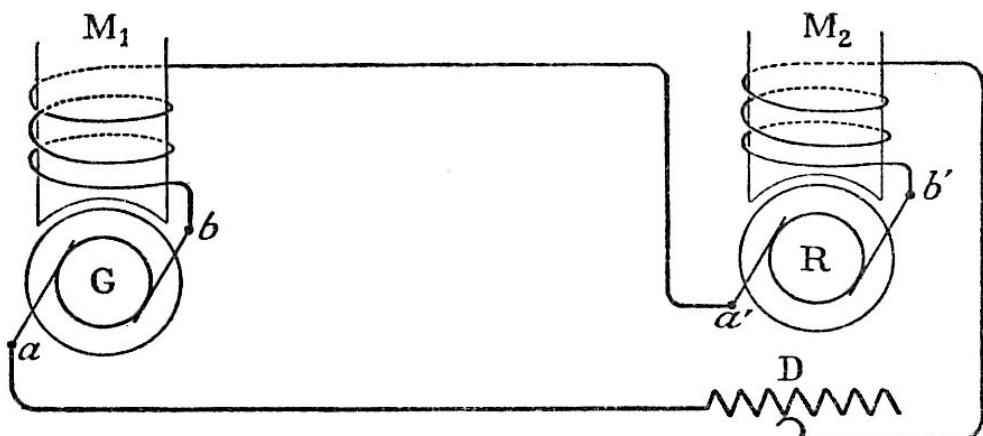


FIG. 7. — Transmission d'énergie par machines-série à courant continu.

sera plus lente pour les lourds fardeaux; le moteur-série remplace la vitesse par un effort plus grand, réalisant ainsi un merveilleux changement automatique de vitesse.

Si l'on désire obtenir une vitesse constante du moteur-série pour différentes charges, on est conduit à employer un rhéostat (fig. 6) analogue, en somme, à un rhéostat de démarrage, et dont on fait varier la position du curseur suivant la vitesse à obtenir. Mais ce système, qui conduit à dépenser de l'énergie en pure perte dans les résistances, peut être remplacé par le suivant qui constitue, en somme, un système de transmission de force motrice.

Alimentons le moteur-série R par une dynamo G également à excitation également série (fig. 7); supposons, par exemple, que cette dynamo-là soit mise en mouvement par une turbine. Cette dernière machine étant en marche, démarrons le moteur R en intercalant une résistance D, pour éviter un à-coup; nous la supprimerons ensuite progressivement.

Si les machines sont identiques, elles tourneront à la même vitesse; en effet, à faible charge, le moteur R n'absorbe que peu de courant, mais comme ce courant traverse les inducteurs de la dynamo génératrice, il ne donnera lieu qu'à une faible force électromotrice.

Au contraire, si nous chargeons le moteur R, il demandera un courant plus intense, ce qui aura pour effet de renforcer la force électromotrice produite par la génératrice et de maintenir la vitesse du moteur R qui tendrait à diminuer sous l'effet de la charge.

La transmission de l'énergie par moteurs-série est, on le voit, le système le plus simple que l'on puisse imaginer; entièrement auto-régulateur, il ne demande pas d'appareils compliqués et peut être confié à un personnel peu expérimenté.

On a utilisé la distribution par moteurs-série en Suisse et dans les Alpes, où ce système a porté le nom de son inventeur, M. Thury. Des chutes d'eau de plusieurs milliers de chevaux ont pu être ainsi utilisées, le seul inconvénient de ce procédé est de nécessiter des collecteurs, aussi bien pour les moteurs que sur les génératrices; or, ces organes ne peuvent pratiquement supporter des tensions de plus de 1 000 à 1 500 volts; pour produire ou utiliser des tensions élevées, on a été conduit à employer plusieurs machines en

série, ce qui complique un peu l'installation et augmente l'entretien; néanmoins, ce système a fonctionné jusqu'ici d'une façon très satisfaisante.

2^o Moteurs en dérivation. — Ces moteurs ne sont autres que des dynamos à excitation en dérivation ou shunt, c'est-à-dire des machines dont les inducteurs sont alimentés par une dérivation prise sur les balais. Le courant que reçoit un tel moteur se divise en deux parties : l'une d'elles, très petite, alimente les électro-aimants inducteurs, l'autre circule dans l'induit.

Le champ magnétique que fournissent les inducteurs est toujours le même, puisqu'il est obtenu par un courant constant puisé directement sur le réseau ; il n'est donc plus sous la dépendance du courant de l'induit. Il en résulte que la vitesse du moteur excité en dérivation et alimenté sous tension constante est également sensiblement constante. Il prend, en effet, une vitesse telle que la force contre-électromotrice contre-balance la tension du réseau, et comme le champ ne varie pas, la vitesse ne varie pas non plus. Ce moteur ne peut pas s'emballer tant que le champ inducteur existe, car ce dernier maintient la force contre-électromotrice à une valeur toujours la même, comme si l'on avait affaire à un aimant permanent. A vide, par exemple, la vitesse est telle que l'induit développe, grâce au champ magnétique constant qui l'entoure, une force contre-électromotrice presque égale à celle du réseau.

Si on fait varier le champ inducteur, si on le diminue, par exemple, en intercalant un rhéostat, on voit qu'il faudra que le moteur tourne plus vite pour obtenir

la même force contre-électromotrice; il y aura donc là un moyen de faire varier la vitesse, mais il ne faudrait pas aller trop loin dans cette voie, car le champ inducteur diminuant, la réaction produite sur les inducteurs par le courant qui circule dans l'induit pourrait devenir très importante et la ligne neutre se déplacerait, ce qui provoquerait des étincelles aux balais.

Avantages. — Ce qui fait rechercher surtout le moteur en dérivation pour beaucoup d'applications, c'est sa vitesse pratiquement constante lorsqu'il est alimenté sous tension constante. Ainsi, par exemple, pour actionner des machines-outils, telles que des fraiseuses, perceuses, etc., dont la vitesse ne doit pas diminuer, si l'effort demandé augmente, on emploiera le moteur en dérivation, de même pour actionner une scie à ruban, et aussi pour toutes les machines de précision.

Le démarrage seul demande certaines précautions; on ne peut plus, en effet, intercaler purement et simplement un rhéostat comme dans le cas du moteur-série; si on procérait ainsi, on aurait un mauvais démarrage. En effet, pour provoquer un effort énergique, il faut que l'attraction de l'induit par les inducteurs soit aussi grande que possible; on devra donc exciter en plein les inducteurs, et pour cela les brancher *avant* le rhéostat (en K, fig. 8), ce dernier sera intercalé dans l'induit seulement pour le protéger contre un afflux de courant trop considérable.

Inconvénients. — L'enroulement à fil fin du moteur shunt réclame un isolement plus grand que celui du moteur-série; il est plus facilement vulnérable et coûte plus cher à poids égal. Le couple au démarrage

dans un moteur shunt est moins élevé à courant égal que dans un moteur-série, car dans le moteur shunt le champ inducteur est constant; seul, le courant de l'induit peut être augmenté. Il en résulte que l'on pourra avoir dans l'induit un courant plus grand que dans un moteur-série exerçant le même effort, car dans ce dernier moteur l'accroissement de courant se

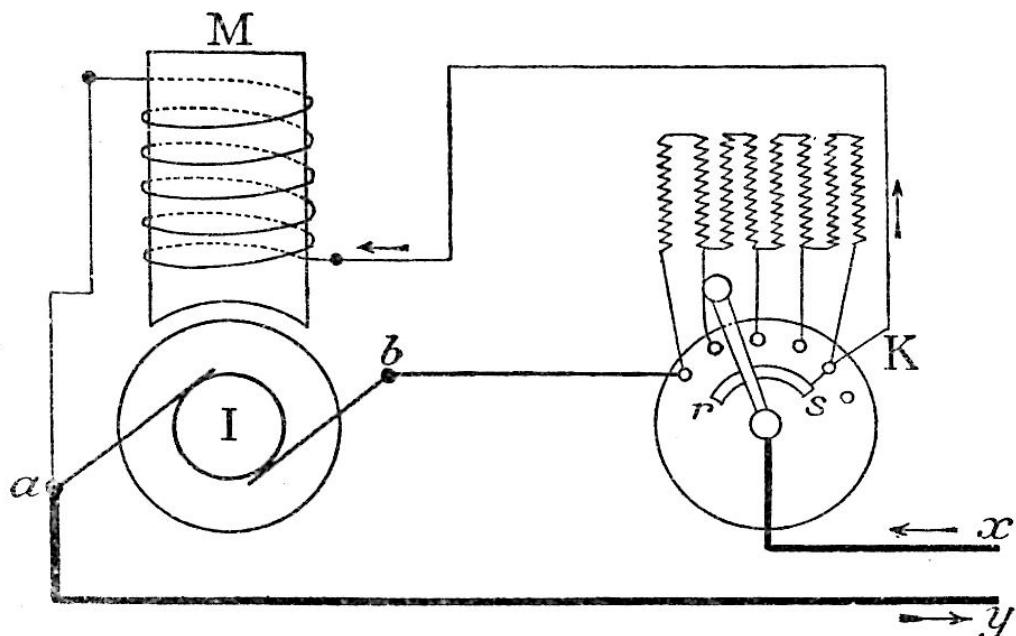


FIG. 8. — Montage d'un rhéostat de démarrage.

fait sentir aussi sur le champ inducteur, ce qui augmente le couple pour la même intensité de courant.

Ainsi, par exemple, un moteur-série dont le champ magnétique inducteur sera le même que celui d'un moteur shunt pour un courant de 30 ampères dans l'induit, exercera un effort plus grand que ce même moteur shunt si le courant devient de 60 ampères, car dans ce cas les 60 ampères circulent aussi dans le bobinage inducteur et contribuent à renforcer le champ, tandis que ce dernier reste constant dans le cas du moteur shunt.

Nous verrons plus loin, à propos des rhéostats de démarrage, que le moteur-série démarre avec un simple rhéostat intercalé dans le trajet de l'un quelconque des deux fils qui l'alimentent, tandis que le moteur shunt exige que l'on ramène un fil spécial pour l'excitation qui doit être prise *avant* le rhéostat.

Malgré ces ennuis, le moteur shunt est très en faveur pour la commande électrique des machines-outils; on l'a même employé pour la traction à la place du moteur-série, quoique démarrant moins facilement que ce dernier. Le moteur shunt permet de faire automatiquement de la *récupération*; ainsi, lorsqu'un tramway équipé avec un moteur shunt descend une pente, sa vitesse s'accélère et le moteur tournant toujours plus vite dans le champ magnétique constant de ses inducteurs est le siège d'une force contre-électromotrice *plus grande* que la force électromotrice du réseau; il devient alors générateur et fournit du courant à la ligne, en faisant frein sur la voiture; ce phénomène se produit automatiquement, sans que le conducteur n'ait à toucher à rien; il suffit simplement que la vitesse dépasse celle du régime habituel.

3^o Moteur compound. — L'excitation appelée compound (d'un mot anglais, qui veut dire composé) est en somme la combinaison d'une excitation série et d'une excitation en dérivation.

Si les liaisons des bobines inductrices d'un moteur ainsi constitué sont telles que le champ magnétique qu'elles produisent, chacune prise séparément, s'ajoutant, on obtient un moteur qui a les avantages du moteur-série sans en avoir les inconvénients.

des pôles plus petits, dits « *auxiliaires* », dont le rôle est de contre-balancer la réaction d'induit en annulant les étincelles lorsqu'on diminue beaucoup le champ principal.

Le rôle de ces pôles est excellent, mais à une condition, c'est qu'ils soient bien montés¹. Dans ce but, on ne devra jamais perdre de vue que, dans un *moteur*, à tout pôle principal succède dans le sens de la rotation un pôle auxiliaire de *même nom*. C'est le contraire qui doit exister dans une dynamo génératrice.

1. Voir A. SOULIER, *Plans de pose et schémas d'électricité industrielle*, p. 72. Garnier frères, éditeurs.

CHAPITRE III

DÉMARRAGE DES MOTEURS

A part les petites machines de $1/10^{\text{e}}$ de cheval et au-dessous, il n'est guère possible de relier sans précaution les moteurs électriques à un réseau de distribution à courant continu à tension constante à 110 ou 220 volts, comme on en trouve partout aujourd'hui.

Nous avons montré que la mise en circuit sous 110 volts d'un moteur au repos peut occasionner de graves accidents, par suite de l'afflux subit de courant qu'il reçoit et vis-à-vis duquel la force contre-électromotrice, nulle à ce moment, ne peut s'opposer.

Il peut arriver que l'induit soit brûlé et mis hors de service, et en tout cas, il se produira un sérieux à-coup sur la canalisation. De même que les grosses conduites d'eau ou de vapeur demandent à être ouvertes progressivement, de même un moteur électrique tant soit peu puissant ne devra recevoir le courant que d'une façon graduelle.

Pour arriver à ce résultat, on intercale dans le circuit une résistance variable par le jeu d'un volant ou d'une manette; on la retire peu à peu, à mesure que la vitesse du moteur s'accélère. On peut éviter

l'emploi d'une résistance sur les tout petits moteurs, parce que le fil qui constitue leurs enroulements est généralement fin et présente, par suite, une résistance suffisante; de plus, ces moteurs se mettent tout de suite en mouvement et développent, aussitôt qu'ils reçoivent le courant, une force contre-électromotrice suffisante pour les protéger.

Moteur-série. — Le montage le plus simple du rhéostat de démarrage est celui que l'on réalise avec un moteur-série; cet appareil est intercalé sur l'un quelconque des deux fils, à portée de la personne chargée de la manœuvre, le moteur pouvant être dans un endroit quelconque.

La figure 6 indique le schéma du montage d'une installation de ce genre; il n'y a, en général, aucune difficulté, le plus important est de choisir un rhéostat possédant des fils suffisamment gros pour ne pas rougir ou même fondre sous l'effet du courant de démarrage qui est parfois très intense.

Nous indiquerons pour cela une règle très simple qui évite toute espèce de calcul compliqué et qui est en usage dans plusieurs grandes maisons de construction.

On prendra un diamètre de fil (en dixièmes de millimètre) pour les résistances en maillechort dont sont constitués les rhéostats, en ajoutant 7 au nombre d'ampères à faire passer.

Ainsi, un fil de maillechort devant supporter 3 ampères devra avoir un diamètre de $3 + 7 = 10$ dixièmes de millimètre.

Un fil de maillechort devant supporter 5 ampères devra avoir $5 + 7 = 12$ dixièmes de millimètre de diamètre.

Un fil de mallechort devant supporter 15 ampères devra avoir $15 + 7 = 22$ dixièmes de millimètre de diamètre.

Au delà de 18 ampères, ce qui conduit à un fil de 25 dixièmes, il est bon de mettre plusieurs fils en parallèle; ainsi, par exemple, pour 20 ampères on prendra deux fils chacun de 17 dixièmes de millimètre de diamètre et de même longueur supportant 10 ampères chacun, et ainsi de suite.

Moteurs en dérivation. — L'installation d'un rhéostat de démarrage sur un moteur excité en shunt ou en dérivation offre quelques difficultés provenant de ce que l'on est obligé d'assurer à ce moteur sa pleine excitation au moment du démarrage. Il ne devra donc pas y avoir de résistance intercalée dans l'enroulement en dérivation au moment de la mise en marche.

De plus, comme il est dangereux de couper le courant d'excitation, à cause de l'étincelle de rupture ou de self-induction qui se produit, on est conduit à laisser l'excitation sur l'induit à l'arrêt, et si on doit la couper on ne doit le faire que progressivement, en intercalant une résistance, par exemple, entre les points où se fait la rupture.

Avec de gros moteurs, la rupture subite du circuit d'excitation peut avoir de graves conséquences; en effet, en supprimant le courant d'alimentation dans les électro-aimants on annule le champ magnétique inducteur, mais ce dernier ne disparaît pas tout d'un coup, il tend à prolonger son existence. En vertu de la loi de l'induction, il s'établira dans l'enroulement un courant induit qui tendra à s'opposer

à la variation du champ; or, comme ce dernier tend à disparaître, il va naître un courant induit de même sens que le courant primitif, de façon à conserver le champ magnétique; c'est ce courant, dont la tension est souvent de plusieurs milliers de volts, qui fera sauter les isolants, en jaillissant d'un fil à l'autre comme dans une bobine de Ruhmkorff mal isolée.

Cet effet de la self-induction qui tend à conserver

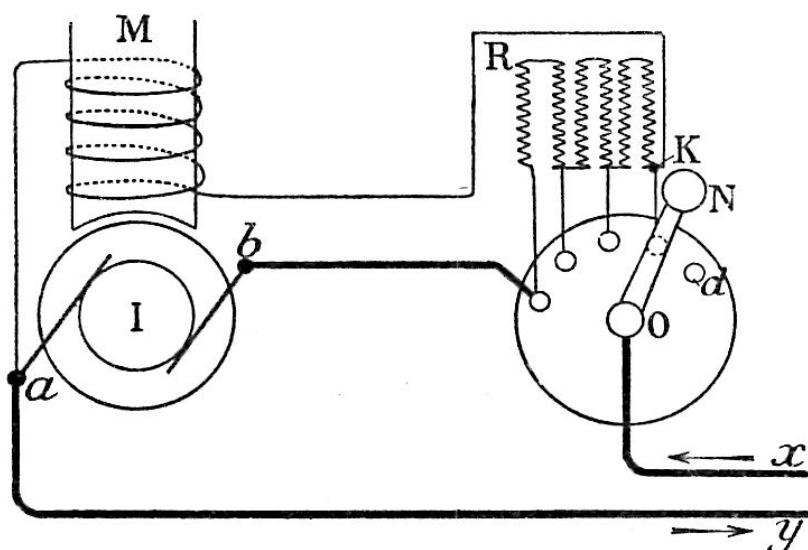


FIG. 9. — Montage correct du rhéostat de démarrage d'un moteur shunt.

le courant est analogue à celui de l'inertie qui maintient en mouvement un corps lancé. Si, au lieu de couper brusquement le courant, on intercale une résistance dans le circuit d'excitation, le champ magnétique disparaît lentement et l'extra-courant de rupture, comme on l'appelait autrefois, n'est plus à craindre.

La figure 9 représente le schéma exact du montage d'un rhéostat de démarrage sur un moteur shunt; les figures 10 et 11, au contraire, indiquent deux mauvais montages que l'on est tenté de réaliser malheureusement trop souvent.

Quelle différence existe-t-il entre ces installations ? Nous voyons que dans le bon montage (fig. 9), les fils l'alimentation x et y sont reliés, l'un y au balai a du moteur I, sur lequel prend également un des fils d'excitation de l'inducteur en dérivation M. L'autre fil x amenant le courant aboutit à la manette du rhéostat de démarrage, et de là pourra aller à travers les résistances R au deuxième balai b du moteur.

Mais on voit aussi que l'autre fil d'excitation, au

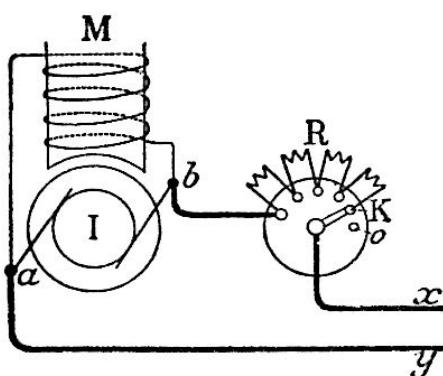


FIG. 10.
Mauvais montage.

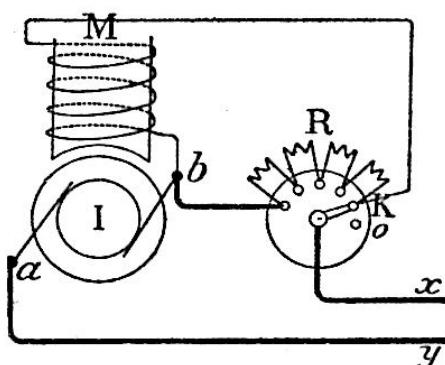


FIG. 11.
Autre mauvais montage.

lieu d'arriver directement au balai b comme dans le cas du mauvais montage (fig. 10), aboutit directement en K à la première touche ou premier *plot* du rhéostat de démarrage.

Qu'arrive-t-il dans ces conditions ?

La manette N du rhéostat étant sur le plot mort d , aucun courant ne passe, car ce plot, comme l'indique son nom, est isolé et sert de repos à la manette. Si on avance la manette sur le plot K, le courant du réseau va pouvoir circuler; une partie gagnera directement l'enroulement en dérivation de l'inducteur M et reviendra par le balai a à la canalisation; une

autre partie va passer par le rhéostat R dont il traversera les fils et arrivera au balai *b* du moteur qui se mettra en marche sous l'action réciproque de l'excitation que possède son inducteur et de celle que donne à l'induit le courant de démarrage.

La vitesse de l'induit ira en augmentant, et on pourra retirer progressivement le rhéostat du circuit en poussant la manette N jusqu'au bout. A ce moment l'inducteur sera toujours excité, et quoique le courant d'excitation ait à traverser maintenant les fils du rhéostat de démarrage il n'y aura qu'une diminution à peine sensible de l'aimantation, car la résistance du rhéostat de démarrage est en général très faible vis-à-vis de celle de l'enroulement inducteur.

Si le moteur est monté comme l'indique la figure 10, il ne démarrera pas. En effet, on voit sur ce schéma que l'excitation est prise directement sur les balais. Or, pour que le moteur démarre il faut qu'il y ait réaction du champ des inducteurs sur celui de l'induit, mais tant que ce dernier ne tourne pas il ne fournit rien à ses inducteurs, qui n'étant pas excités ne pourront aider au démarrage; le moteur restant immobile, l'induit absorbera un courant intense et pourra brûler même si, ne se rendant pas compte de la faute, on pousse la manette de façon à supprimer le rhéostat.

Le remède dans ce cas est facile; il faut enlever le fil de l'inducteur aboutissant au balai *b* et le reporter avant le rhéostat, en K par exemple (fig. 10).

Avec le montage de la figure 11, ce qui se passera sera plus curieux. Le démarrage s'effectuera très bien sur la première touche, puis à mesure qu'on

avancera la manette on verra la vitesse de l'induit augmenter rapidement; il s'emballera dès qu'on arrivera sur la dernière touche et pourra brûler si on n'a pas mis sur le trajet des fils des plombs fusibles ou un bon disjoncteur.

A quoi est due cette anomalie?

On remarquera que le rhéostat est bien monté sur le trajet des fils reliant à l'induit le réseau qui fournit le courant, mais l'enroulement shunt d'excitation a une de ses extrémités reliée au balai *b*, l'autre à la première touche *K* du rhéostat. Ce montage ressemble en tous points à celui de la figure 9, et cependant les résultats obtenus sont absolument différents.

Voici à quoi cela tient : au début, quand on démarre, le courant arrivant par *x* se divise sur la touche *K* en deux parties : l'une va dans l'inducteur *M*, revient par le balai *b*, va au balai *a* à travers l'induit et retourne à la canalisation par le fil *y*.

Une autre partie du courant traverse le rhéostat et l'induit, comme d'habitude ; le moteur étant excité, démarre facilement. Mais si on pousse à fond la manette du rhéostat, il n'en sera plus ainsi ; l'inducteur ne reçoit plus de courant, puisque ce dernier qui lui arrivait par *K* va directement du fil *x* au balai *b* par le chemin très court que lui offre la manette du rhéostat. N'ayant plus ou peu d'excitation, le moteur ne produit presque pas de force contre-électromotrice ; il absorbe alors un courant intense qui peut compromettre son enroulement induit en même temps que la vitesse peut devenir dangereuse, si le courant n'est pas supprimé à temps.

On évitera cet inconvénient en changeant de place

le fil d'excitation qui aboutissait par erreur au balai *b*; il suffira de le mettre en *a* pour que tout rentre dans l'ordre.

Il pourrait se faire que, dans ce cas, le sens de rotation du moteur soit changé, pour le rétablir il suffira d'observer ce que nous indiquons au chapitre

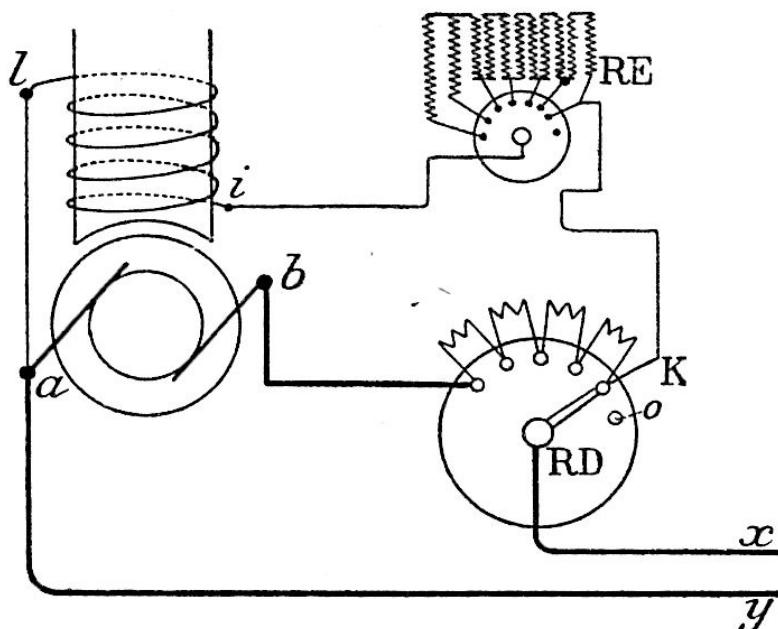


FIG. 12. — Montage d'un moteur shunt avec rhéostat supplémentaire pour le réglage de la vitesse.

suivant, ou, mieux, on réalisera le montage de la figure 9.

Enfin, si on veut éviter toute introduction de résistance dans le circuit d'excitation, on prendra le montage de la figure 8; il faudra, dans ce cas, disposer sur le commutateur un secteur *rs*, en relation avec la première touche *K* et avec le fil d'excitation; on maintiendra ainsi une excitation constante, quelle que soit la position de la manette, puisque le courant des électro-aimants sera distribué par la manette tout le long du secteur *rs*.

Enfin, il peut être intéressant, dans le cas d'un moteur shunt, de pouvoir augmenter sa vitesse pour certaines applications; on y arrivera en intercalant dans le circuit d'excitation un rhéostat.

La figure 12 est le schéma d'une installation de ce genre; on voit en RD le rhéostat de démarrage monté d'une façon correcte; on a simplement intercalé le rhéostat d'excitation spécial RE entre la touche K et

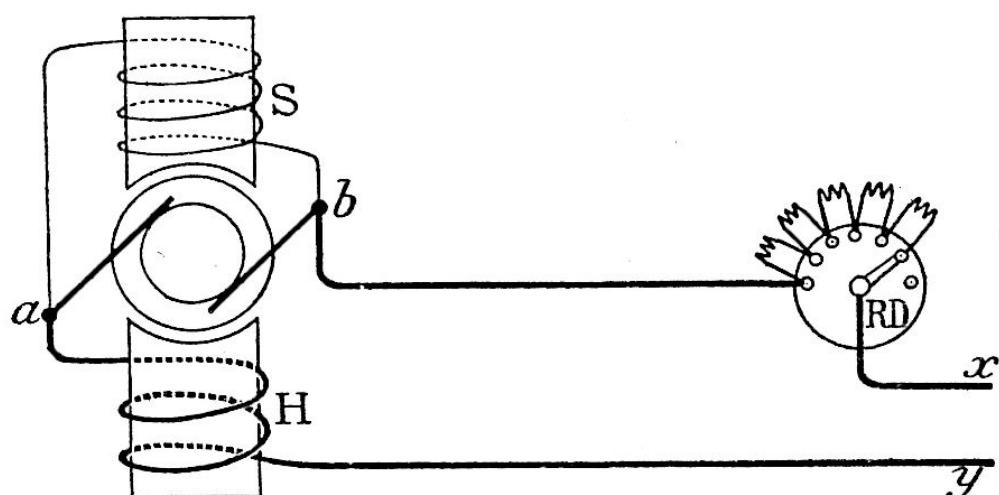


FIG. 13. — Démarrage d'un moteur compound (1^{er} montage).

l'extrémité *i* de l'enroulement à fil fin des inducteurs.

Le rhéostat d'excitation ne devra pas comporter, en général, de plot mort, condition essentielle pour n'avoir pas de rupture dans le circuit des électro-aimants, coupure qu'il faut toujours éviter, comme nous l'avons vu, à cause de la surtension provoquée par l'étincelle de rupture.

Moteur compound. — Deux systèmes de démarrage peuvent être employés avec le moteur compound; on peut, soit (fig. 13) intercaler le rhéostat

simplement sur un des fils d'alimentation et laisser l'excitation shunt reliée directement aux balais; dans ces conditions, le moteur démarre comme un moteur-série.

Ou bien on peut (fig. 14) ramener un des fils du circuit d'excitation avant le rhéostat en K. et le moteur démarre comme un moteur shunt.

Ce dernier montage est en général préférable; il

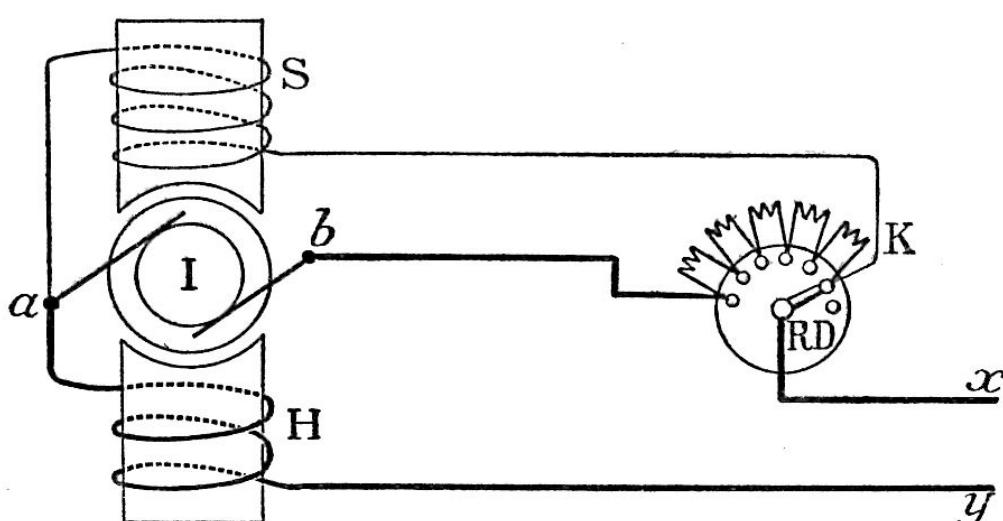


FIG. 14. — Démarrage d'un moteur compound (2^e montage).

permet des démarrages sous très fortes charges, et cela se comprend puisque le moteur démarre avec le maximum d'excitation. L'enroulement à fil fin reçoit ainsi directement le courant du réseau, tandis que l'enroulement à gros fil traversé par le courant total de l'induit contribue puissamment à aider au démarrage.

La disposition plus simple de la figure 13, permettant d'intercaler le rhéostat n'importe où, convient à un démarrage sous faible charge, car ce n'est que lorsque le moteur a pris une certaine vitesse que l'enroulement shunt peut puiser sur les balais le

courant qui lui est nécessaire; le couple moteur augmente à ce moment et l'on peut appliquer la charge.

Démarrage avec contacteurs. — Dans bien des cas il peut être intéressant d'obtenir un démarrage automatique entièrement progressif, sans avoir d'autre manœuvre à faire qu'à appuyer sur un bouton ou à fermer un interrupteur; c'est le cas des ascenseurs ou de certains moteurs exigeant pour leur mise en vitesse un certain temps. Il faudra pour cela réaliser un appareil spécial de démarrage.

Or quel est le rôle du rhéostat de démarrage? C'est de ne laisser passer dans le moteur que le courant qui lui convient, en limitant l'intensité à une certaine valeur. Le rhéostat de démarrage permet ainsi d'atteindre progressivement la vitesse normale de marche, sans entraîner l'absorption au départ d'un courant exagéré.

Mais il faut, pour cela, que l'on s'astreigne à ne pas déplacer *trop vite* la manette du rhéostat; si on la tourne très rapidement, on supprime les résistances intercalées avant que le moteur ait pris sa vitesse, et l'inconvénient existe toujours.

On devra donc manœuvrer *lentement* la manette du rhéostat, en ne passant d'une touche à la suivante qu'après s'être assuré à l'ampèremètre que l'intensité n'est pas trop élevée. Le retour à zéro pour l'arrêt pourra être, au contraire, très rapide, car le moteur étant en marche on peut supprimer sans crainte le courant dont l'intensité ne peut que diminuer par l'introduction des résistances du rhéostat.

Sinon, nous prenons le cas des ascenseurs ou des monte-charges, etc., et chaque fois que l'on a affaire à

un personnel inexpérimenté ou lorsqu'on veut confier la manœuvre au premier venu, on est conduit à disposer près du moteur un appareil de démarrage automatique qui ne supprime les résistances qu'autant que l'intensité du courant est revenue dans les limites qu'elle doit avoir.

C'est un dispositif de ce genre que l'on emploie dans les voitures motrices des chemins de fer électriques, et du métropolitain en particulier, et, aujourd'hui, sur beaucoup de machines-outils¹.

Le conducteur manœuvre un simple commutateur qui donne l'ordre aux contacteurs d'agir; ces derniers appareils suppriment peu à peu les résistances intercalées dans le circuit des moteurs et, mieux que ne le ferait un employé même très adroit, ne passent à la résistance suivante qu'autant que l'intensité a diminué suffisamment.

Soit, par exemple, un moteur série I (fig. 15) que nous intercalerons entre les fils x , y , d'un réseau à tension constante avec interposition des résistances 1, 2, 3.

Chaque résistance 1, 2, 3 peut être mise en court-circuit par l'armature d'un électro-aimant.

Les bobines de ces électro-aimants possèdent des résistances différentes; toutes sont reliées en dérivation sur les balais du moteur; supposons, par exemple, que b_1 ait la plus faible résistance, c_2 une plus grande et d_3 la plus forte.

En fermant l'interrupteur principal, le courant passera dans le moteur en traversant les trois résis-

1. Voir notamment les *Schémas d'électricité industrielle*, par A SOULIER. Garnier frères, éditeurs.

tances 1, 2 et 3, et le moteur démarrera. A mesure que la vitesse augmentera, l'induit I développera une force contre-électromotrice croissante, si bien qu'il arrivera un moment où l'électro b_1 le moins résistant, deviendra capable d'attirer son armature m , mettant en court-circuit en q la résistance 1 ; la vitesse du moteur augmentera la force contre-électromotrice aussi

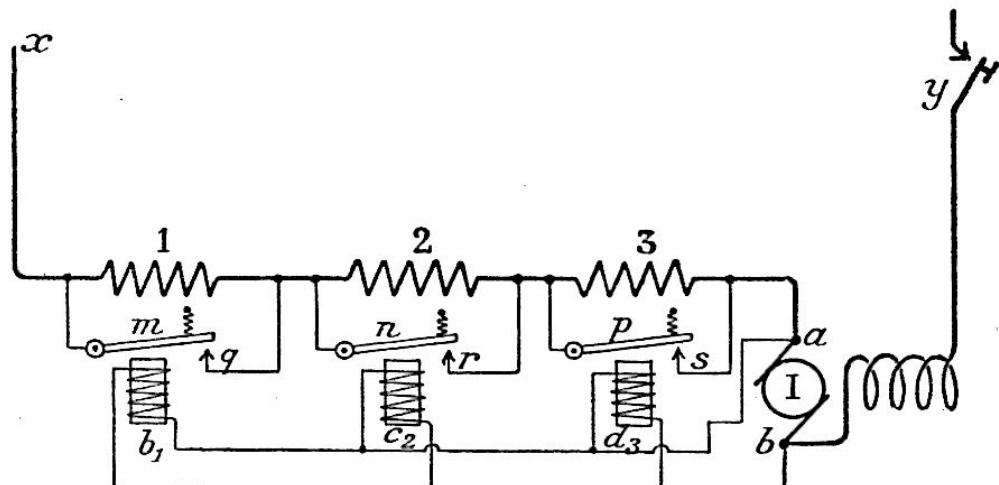


FIG. 15. — Montage de contacteurs pour réaliser un démarrage automatique.

jusqu'à ce que l'électro c_2 attire à son tour son armature n , qui mettra la résistance 2 en court-circuit en r , puis d_3 , etc.

On peut supposer qu'il y a plus de trois résistances, mais le principe reste le même.

De cette façon, on est sûr que les résistances ne seront supprimées qu'autant que le moteur aura pris une vitesse suffisante, c'est-à-dire qu'il développera une force contre-électromotrice convenable.

Ainsi, par exemple, si la canalisation xy fournit du courant à 110 volts, on peut faire en sorte que le premier électro b_1 supprime la résistance 1, sitôt que la force contre-électromotrice aux balais ab

atteint 30 volts; en réglant la résistance de l'électro c_2 , on pourra s'arranger de façon à ce qu'il attire son armature, lorsque le moteur I donnera 60 volts entre ses balais, et l'électro d_3 pour 90 volts.

Le démarrage sera ainsi absolument automatique et indépendant de la personne qui manœuvre l'interrupteur A. Si la charge est forte, l'induit démarrera lentement, sa vitesse ne s'accroîtra que peu à peu, de même les résistances ne seront supprimées que petit à petit, il n'en résultera aucun inconvénient, pour le réseau aussi bien que pour le moteur.

Bien d'autres dispositifs ont été imaginés; c'est ainsi que l'on a proposé de faire commander la manette du rhéostat de démarrage par un noyau de fer soumis à l'attraction d'une bobine à fil fin reliée aux balais du moteur à mettre en marche.

Au fur et à mesure que la vitesse augmente, la force contre-électromotrice croît, l'attraction augmente et la manette du commutateur avance en retirant les résistances du circuit.

Dans d'autres cas, les armatures des électro-aimants entraînent un moulinet ou un amortisseur qui retarde la mise en court-circuit de la résistance correspondante. On est sûr alors que le démarrage se fera dans un temps déterminé d'avance qui permettra au moteur de prendre sa vitesse.

Mais tous ces dispositifs ne valent pas le premier, beaucoup plus robuste et bien plus sûr; il a été employé, avec succès du reste, dans de nombreuses installations et peut être, en tout cas, réalisé assez facilement.

Rhéostats de démarrage industriels. — On rencontre dans beaucoup d'ateliers des rhéostats de

démarrage constitués par une manette se déplaçant devant des plots fixés sur une plaque de marbre ou d'ardoise (fig. 16) et qu'un ressort tend à ramener constamment au repos. Pour la maintenir dans la position de marche, il faut pousser la manette jusqu'au dernier plot; elle bute alors contre un électro-aimant qui la retient en place.

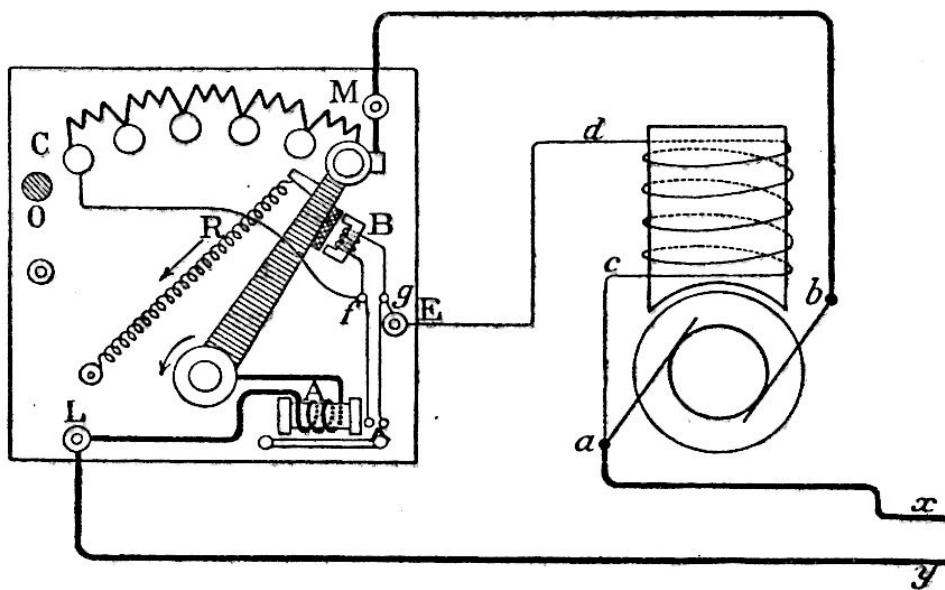


FIG. 16. — Schéma du montage d'un démarreur à rappel automatique à maxima et à minima.

Si, par suite d'un accident, le courant l'alimentation vient à être supprimé, on voit aussitôt la manette revenir toute seule au point de départ. De cette façon, le moteur est retiré automatiquement du circuit, de sorte que si on rétablit ensuite le courant il ne risque pas d'être détérioré. Le fonctionnement de cet appareil est facile à comprendre.

Le courant arrivant par le fil *y*, arrive à la manette en traversant un électro-aimant A, dont nous verrons plus loin le rôle. Au repos, la manette sollicitée par le ressort R est sur le plot de repos, ou plot mort O;

si nous l'amenons sur la première touche C, le courant se bifurque, une partie va à l'inducteur du moteur en traversant l'électro B et la borne E, l'autre traverse les résistances de démarrage et par la borne M gagne l'induit du moteur par le balai *b*.

On avance avec précaution la manette en marquant un temps d'arrêt sur chaque touche, puis, quand on arrive sur le dernier plot, le levier vient se coller contre l'électro B qui est aimanté par le courant d'excitation. (Le levier porte dans ce but une armature en fer placée vis-à-vis des pôles de l'électro B.)

Si l'excitation vient accidentellement à être supprimée (rupture d'un fil) l'électro B ne maintient plus la manette. laquelle, sollicitée par le ressort R, revient brusquement au repos.

De même, si le courant est supprimé le moteur s'arrête et, l'excitation disparaissant, la manette est encore rappelée.

Enfin, en cas de surcharge exagérée du moteur provoquant un afflux de courant trop considérable, l'électro A attire son armature, laquelle vient mettre en court-circuit l'électro B; ce dernier devenant subitement inactif, abandonne la manette qui revient au zéro.

Ce système possède, comme on le voit, de grands avantages; il réalise une excellente protection du moteur. Dans certains appareils, la manette entraîne avec elle un secteur denté, dans les dents duquel s'engage une tige manœuvrée par l'armature de l'électro A. Si on démarre trop brusquement, l'afflux de courant est considérable, et l'électro A soulevant son armature vient bloquer la manette. Automatiquement encore, toute fausse manœuvre est encore rendue impossible.

Rhéostats à liquide. — Il peut être nécessaire de confectionner un rhéostat sur place avec des matériaux très rudimentaires; on emploiera dans ce but

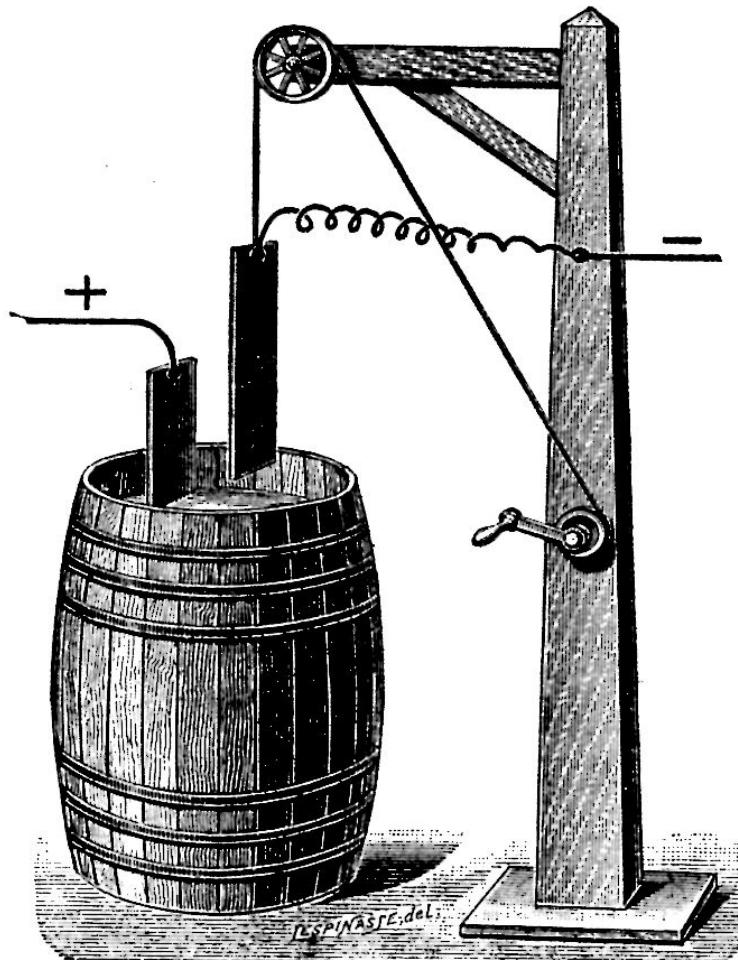


FIG. 17. — Rhéostat hydraulique facile à construire.

les rhéostats à liquide ou hydrauliques réalisables dans toutes les usines.

Dans une cuve, en bois de préférence (tonneau) [fig. 17] que l'on remplira d'eau, on fera plonger une plaque métallique, en fer par exemple, en relation avec une des bornes du moteur. L'eau ayant été rendue conductrice par addition d'acide sulfurique ou, mieux, de sel marin ou de carbonate de soude (corps moins

dangereux à manier), on reliera par un câble souple la canalisation amenant le courant à une autre plaque de fer que l'on suspendra au-dessus du tonneau à l'aide d'une corde passant sur une poulie ou un palan.

En faisant descendre lentement la plaque suspendue, le courant passera dès qu'elle touchera au liquide; son intensité ira en augmentant progressivement à mesure que la surface immergée deviendra plus grande, et finalement on pourra amener les plaques presque au contact. A ce moment, au lieu de les faire se toucher au sein du liquide, ce qui pourrait provoquer une étincelle et une sorte d'explosion, on mettra extérieurement le rhéostat en court-circuit.

Des rhéostats de ce genre ont été employés pour provoquer le démarrage de puissantes locomotives électriques; mais, ici, au lieu de descendre la plaque dans la cuve, on disposait à l'avance les plaques dans un récipient en fer hermétiquement clos dans lequel on faisait arriver progressivement le liquide (eau provenant d'un réservoir voisin rendue conductrice par du carbonate de soude). Une fois le bac plein et le démarrage obtenu, on retirait la résistance en chassant le liquide dans le réservoir, à l'aide de l'air comprimé dont on se sert sur toutes les locomotives pour la manœuvre des freins.

On a également construit des rhéostats à liquide pour le démarrage des moteurs d'atelier; la figure 18 représente un appareil de ce genre; ils sont calqués en somme sur le rhéostat indiqué au début, sauf que la palan ou la corde sont remplacés par une vis qui permet d'enfoncer lentement la plaque mobile.

La cuve, qui est métallique, constitue l'autre pôle; elle est isolée du bâti par des isolateurs en porce-

laine; on doit veiller à ce qu'elle soit reliée au pôle *négatif*. De cette façon, sous l'effet de l'électrolyse, la plaque mobile s'use seule puisqu'elle est reliée au

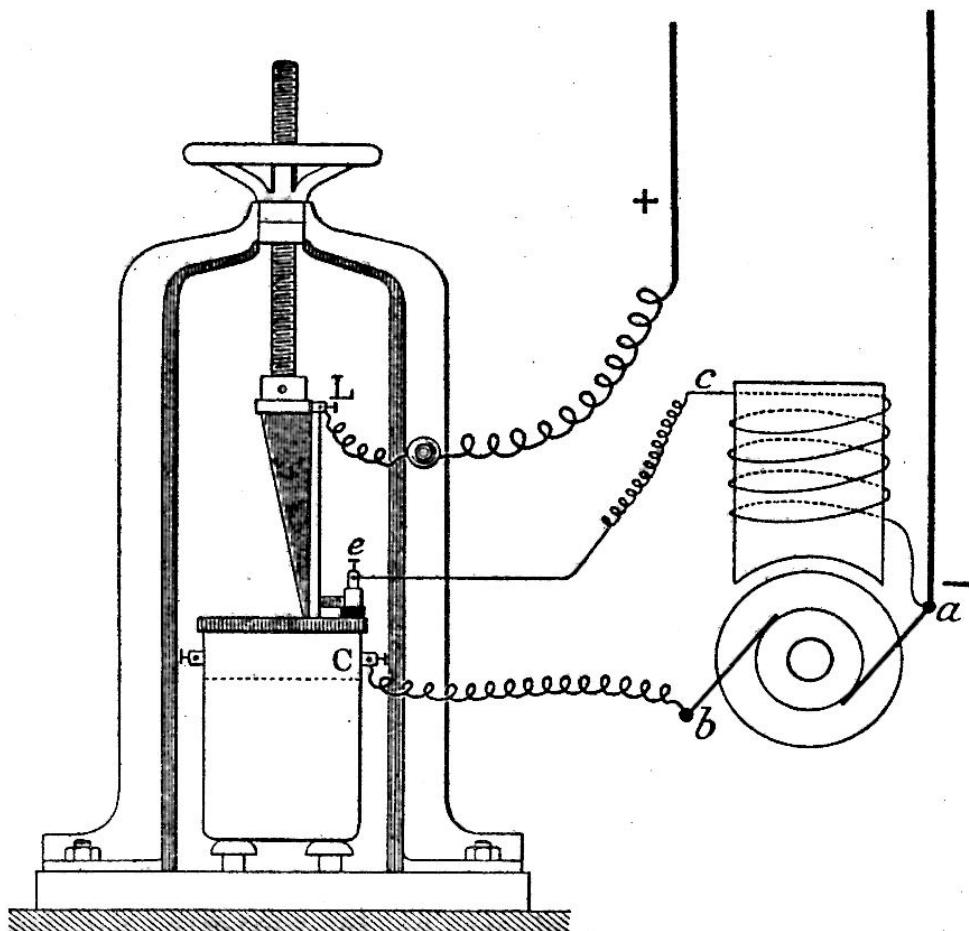


FIG. 18. — Rhéostat de démarrage à liquide.

pôle positif, mais elle est facile à remplacer et d'un prix moins élevé que la cuve.

L'inconvénient de ces appareils est de nécessiter plus de soins que les rhéostats ordinaires; ils ne sont pas mécaniques, mais peuvent cependant rendre de précieux services dans des installations provisoires; c'est à ce titre seul que nous les recommandons.

CHAPITRE IV

INVERSION DU SENS DE MARCHE DES MOTEURS A COURANT CONTINU

Dans bien des circonstances, on peut avoir besoin de changer le sens de rotation de l'induit d'un moteur. Tant que cette opération ne doit pas être répétée souvent, la chose est très facile; il suffit, en général, d'intervertir les câbles souples aboutissant aux balais du moteur, ou ceux des bobines inductrices.

Il ne faudrait pas croire qu'il suffise de changer de bornes les fils amenant le courant au moteur, car alors on modifie le sens du courant à la fois dans l'induit et dans l'inducteur, et le moteur continue encore à tourner dans le même sens.

Si on veut obtenir une inversion du sens de rotation, il faut soit intervertir les pôles de l'inducteur sans rien toucher à l'induit ou inverser le courant dans l'induit, sans déplacer les fils des bobines inductrices; de cette façon seule, le sens de l'attraction de l'induit par les inducteurs se trouve changé, et avec lui le sens de rotation.

La figure 19 (gauche) représente un moteur à excitation série, monté, par exemple, pour tourner dans le sens des aiguilles d'une montre; la figure 19 (droite)

représente le même moteur organisé pour tourner en sens inverse; on s'est contenté, comme on le voit, d'inverser le sens du courant dans les bobines inducrices. Le courant (fig. 19, à gauche) arrivant par x ,

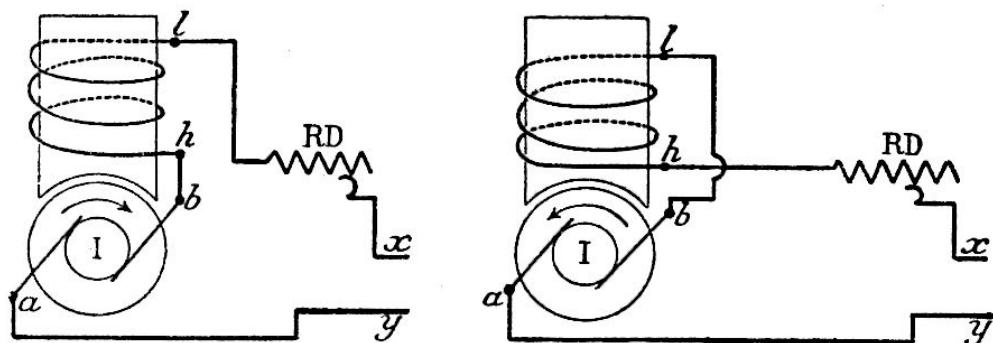


FIG. 19. — Inversion du sens de marche d'un moteur-série.

va du rhéostat de démarrage RD à l'entrée l de l'enroulement série, en sort par h , va au balai b , et par l'induit au balai a et retourne à la canalisation par le fil y .

Au contraire, dans l'autre figure, le courant venant

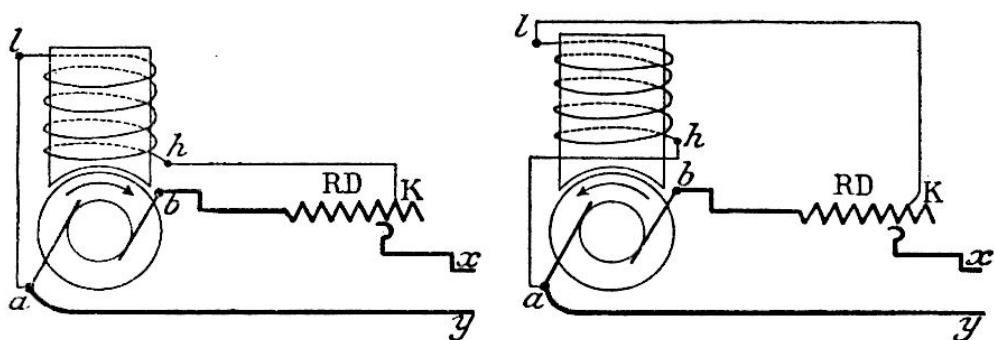


FIG. 20. — Inversion du sens de marche d'un moteur shunt.

de x à travers le rhéostat de démarrage, entre dans l'enroulement inducteur par l'autre bout h , en sort par l , et va de là à l'induit en revenant comme précédemment par le balai a .

Dans le cas d'un moteur shunt, le courant de l'inducteur à fil fin est toujours pris sur un balai d'une part, et au bout du rhéostat de démarrage en K, d'autre part; pour la marche dans le sens des aiguilles d'une montre, par exemple, c'est l'extrémité *h* du bobinage qui vient en *k*, l'autre extrémité *l* venant au balai *a*. Si l'on veut changer le sens de rotation, on

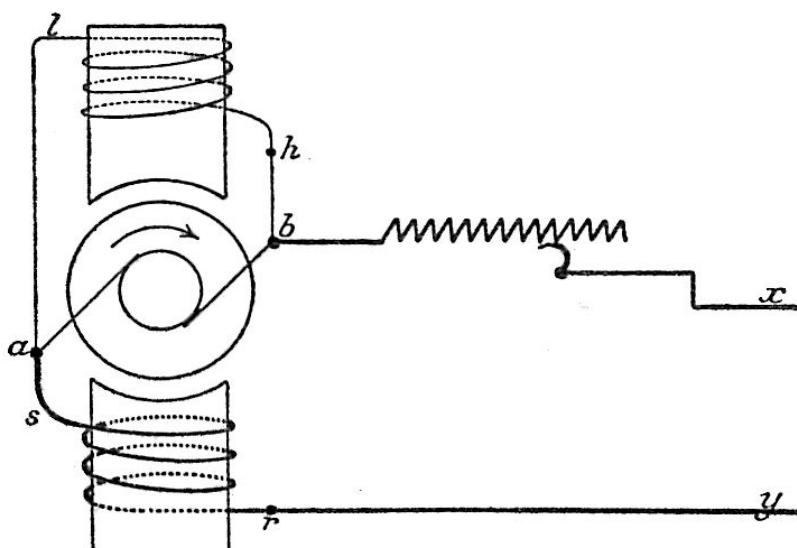


FIG. 21. — Moteur compound ~~marche avant~~.

reliera *h* au balai *a*, et *l* à l'extrémité *K* du rhéostat de démarrage; c'est très facile, comme on le voit.

Avec un moteur à excitation compound, tournant dans un certain sens, celui des aiguilles d'une montre, par exemple, avec le montage de la figure 21, si l'on veut obtenir une rotation de sens inverse, on renverra le courant dans les bobines inductrices shunt et série.

C'est ainsi que tandis que sur la figure 21 les extrémités *l*, *h* de l'enroulement shunt à fil fin aboutissent aux balais *a* et *b*, pour la rotation en sens inverse les mêmes extrémités *l* et *h* aboutissent aux balais *b* et *a*,

(fig. 22). Dans le même ordre d'idées, l'enroulement série qui recevait le courant du balai *a* par son extrémité *s*, reçoit le courant de ce même balai par son bout *r*, l'autre ramenant le courant au fil *y*.

Si les changements de sens de marche doivent être relativement fréquents, il sera plus avantageux de se servir d'un inverseur pour croiser les fils; ainsi, dans

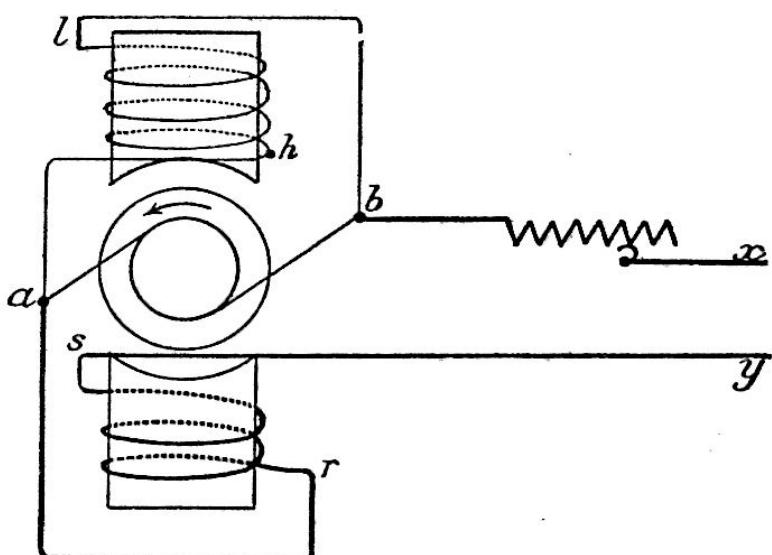


FIG. 22. — Moteur compound marche arrière.

le cas d'un moteur-série, on réalisera le montage de la figure 23.

Le courant arrivant par le fil *x* traverse le rhéostat de démarrage RD et, avant de se rendre à l'enroulement inducteur, aboutit à un inverseur I, dont le rôle est de faire entrer le courant tantôt par *l*, tantôt par *K*. Cet appareil se compose d'une plaque de marbre supportant deux couteaux articulés autour de deux points *f* et *g* et que l'on peut rabattre soit tous deux vers le haut (position I), soit tous deux vers le bas (position II).

Prenons le cas de la position I: le courant venant

du rhéostat de démarrage arrive en *g* et gagne directement le point *l*, puisque le couteau est dans la position marquée en trait plein. De *l*, il va en *K* à travers l'enroulement série, puis revient de *K* en *f* par l'autre couteau et aboutit de là au balai *b* de l'induit lequel le ramène par l'autre balai *a* à la canalisation *y*. Le moteur tourne alors dans un certain sens.

Rabattons l'inverseur en bas (position II), le courant arrivant en *g*, gagne par le couteau (position en

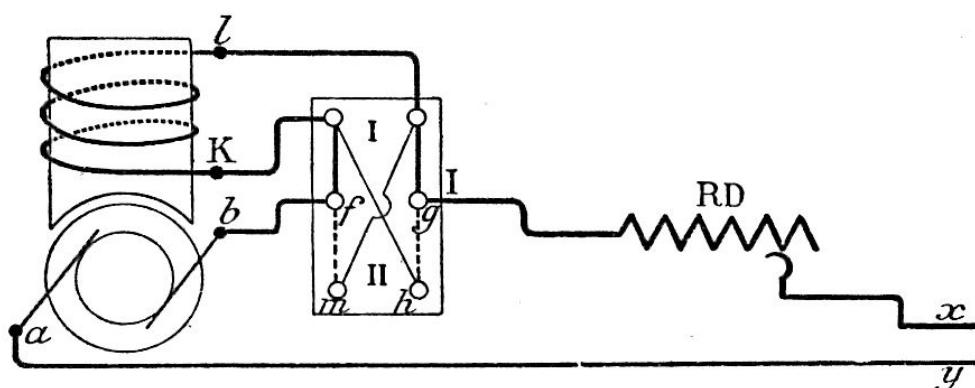


FIG. 23. — Montage d'un inverseur de sens de marche.

pointillé) le plot *h* et va de là en *K*, par une liaison en diagonale faite sous l'inverseur, il traverse l'enroulement série dans un sens inverse que précédemment, arrive en *l*, et va de *l* à *m*, par la deuxième connexion en diagonale, d'où il gagne *f* par le couteau et le balai *b*, et traverse l'induit dans le même sens que précédemment pour revenir par le balai *a* au point *y*.

Le sens du courant ayant changé dans l'inducteur, la rotation de l'induit s'effectuera en sens inverse que précédemment.

Remarque. — Il est très important de ne jamais manœuvrer l'inverseur, tant que le rhéostat de démarrage n'est pas complètement introduit dans le circuit.

En effet, supposons que nous renversions le sens de la marche

pendant que l'induit est en pleine vitesse, la force contre-électromotrice qu'il produit va alors s'ajouter à celle du réseau, au lieu de s'en retrancher, et l'induit se trouvera traversé par un courant considérable, pouvant provoquer un à-coup violent sur le réseau. De plus, cette inversion en pleine marche peut amener la destruction de l'induit. Il faudra donc, avant de manœuvrer l'inverseur, arrêter le moteur en poussant le curseur du rhéostat sur le plot de repos, et à ce moment seulement rabattre les couteaux de l'inverseur dans le sens voulu.

Tout ceci s'applique à un moteur-série, mais dans un moteur shunt les choses seraient plus graves encore si l'inverseur était placé sur le circuit d'excitation.

Dans ces conditions, la manœuvre de l'inverseur en marche provoquerait d'abord une rupture de l'excitation et, à part l'inconvénient qui résulterait de la coupure de ce circuit, on pourrait brûler l'induit, lequel tournant dans un champ magnétique nul ne produirait plus de force contre-électromotrice et recevrait, par suite, un courant d'une intensité considérable.

Il faudrait encore, ici, ramener la manette ou le curseur du rhéostat à la position de repos, puis manœuvrer l'inverseur, mais on n'éviterait pas encore, ici, la rupture de l'excitation, ce qui fait qu'un tel montage, quoique simple, n'est pas à conseiller ; il vaut mieux, comme on va le voir, inverser le courant dans l'induit seul en interposant des résistances et en laissant l'inducteur excité.

Démarreurs inverseurs. — Les ponts roulants, grues électriques, etc., qui nécessitent de fréquents changements de sens de marche de leurs organes, sont actionnés, en général, par des moteurs électriques pourvus de démarreurs inverseurs.

Le plus simple de ces appareils représenté (fig. 24) se compose d'un rhéostat à double manette portant deux secteurs *s* et *t* recevant directement le courant d'alimentation des fils *x* et *y*. Tout autour se trouve, sur une moitié de la circonference, une série de plots ; sur l'autre moitié, un secteur continu *r* relié au balai *a* du moteur.

L'excitation du moteur étant prise directement sur

les fils x et y , examinons comment va se faire le démarrage; supposons pour cela les manettes dans la position représentée en traits pleins sur la figure 24.

Le courant arrivant par x aboutit au secteur s , gagne le deuxième plot par la manette (trait plein), traverse la résistance po et va au balai b du moteur. Retournant par a , le courant arrive au secteur continu

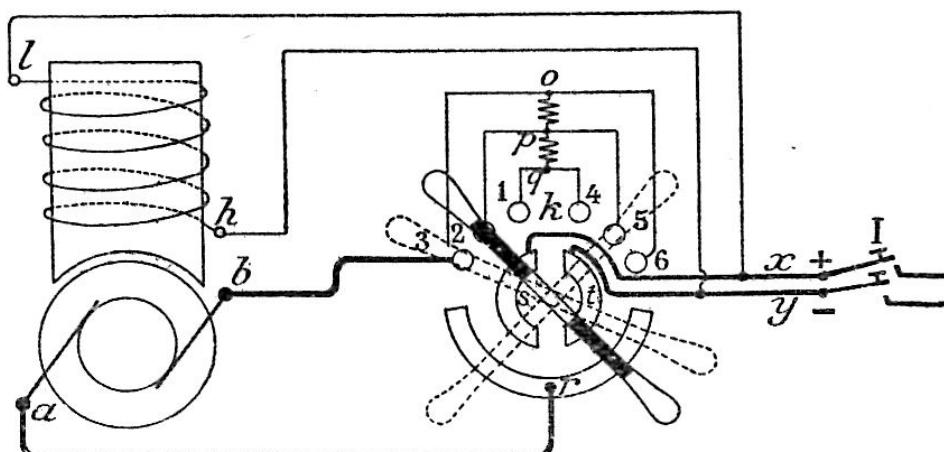


FIG. 24. — Montage d'un moteur shunt à marche avant et arrière.

r , et par la deuxième manette (trait plein) gagne le secteur t et le fil y , le moteur démarre.

Si on tourne les manettes de façon à leur faire occuper la position 3, la résistance po est supprimée, le moteur prend sa vitesse normale.

Pour arrêter le moteur, il suffit de placer les manettes verticalement; aucun courant ne passe plus par l'induit, car il n'y a pas de plot en k .

Si on tourne les manettes de façon à couvrir le plot 5, le courant arrivant par x au secteur s sera envoyé par la manette inférieure au secteur continu r et entrera dans l'induit par a qu'il traversera dans un sens inverse du cas précédent, sortant par le balai b ,

il gagnera le plot 3 isolé à ce moment, traversera les résistances op , et arrivera en 5.

En cet endroit, la manette le ramènera sur le secteur t et ensuite sur le fil y .

L'inversion de la marche s'obtiendra donc en tournant les manettes qui, dans ce but, sont rendues solidaires et n'en forment qu'une, étant dans le prolongement l'une de l'autre, tout en étant séparées au centre par une partie isolante figurée ici en blanc¹.

Ce procédé est très pratique, car il insère le rhéostat de démarrage en même temps que s'établissent les connexions pour un sens de marche déterminé. Le seul inconvénient que présente ce dispositif est qu'il laisse le moteur constamment excité, même s'il est arrêté. Pour ne pas faire chauffer les enroulements inducteurs et perdre de l'énergie inutilement, il sera bon d'intercaler sur l'arrivée du courant un interrupteur bipolaire I que l'on mettra à l'arrêt pendant les longues périodes de repos du moteur. Mais il peut arriver que si l'on interrompt les inducteurs sans précaution, quand le moteur est arrêté par exemple, il se développe, au moment de la coupure, une force électromotrice de self-induction très élevée pouvant amener la rupture de l'isolant de l'enroulement et amener la mise hors de service de la machine. Il faudra donc ne pas oublier de manœuvrer l'interrupteur I avant de ramener la manette du démarreur sur le plot k . Aussitôt après que le circuit est ouvert en I, le moteur ralentit et s'arrête, mais l'excitation restant

1. On n'a représenté ici que quelques plots et deux résistances pour ne pas compliquer le dessin, mais bien entendu il peut y en avoir autant qu'on le voudra.

en liaison avec les balais, aucune rupture n'est plus à craindre. Une fois le moteur *arrêté*, on ramène l'in-

verseur sur la position de repos *k*.

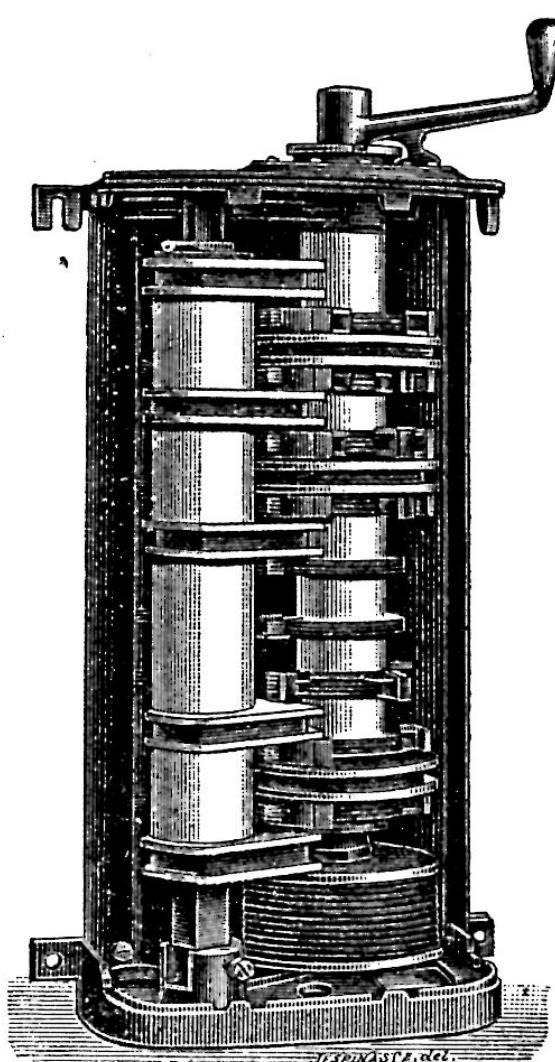


FIG. 25. — Vue d'ensemble d'un coupleur.

Un cylindre portant des disques en cuivre plus ou

Combinateurs de démarrage. — Tout le monde a remarqué sur la plate-forme des conducteurs de tramways électriques une manivelle que le machiniste manœuvre pour provoquer la mise en marche ou l'arrêt du véhicule.

L'appareil que commande cette manivelle n'est autre qu'une sorte de rhéostat de démarrage; on lui donne le nom de *combinateur*¹. Ouvrons un de ces appareils, que voyons-nous?

1. En Amérique, cet appareil s'appelle un *controller*, ce qui a souvent fait désigner en France cet organe par *contrôleur*, mauvaise traduction, et en tout cas, mot tout à fait impropre, le « contrôleur » sur un tramway ou un chemin de fer étant en réalité un personnage plus ou moins galonné qui vérifie les billets. Il a été, pour cela, décidé de désigner l'appareil de mise en marche sous le nom de *combinateur* ou de *coupleur*, mots qui expriment mieux sa fonction.

moins entaillés qui frottent sur une série de contacts.

Prenons un combinateur pour moteur-série et suivons la marche du courant :

La canalisation (pôle +) aboutit au plot 1 et par un balai le courant passe sur le disque placé en regard ; de 1, le courant passe en 2 grâce à une connexion qui relie ces deux disques, puis il va de 2 à 3, de 3 à 4, de 4 à 5 et de 5 à 6. (On peut se demander pourquoi ces passages successifs, c'est que l'appareil figuré s'applique à un gros moteur fonctionnant sous 400 ou 500 volts, et la rupture du courant au moment de l'arrêt pouvant provoquer des flammes ou arcs si elle ne se fait qu'en un seul point, le constructeur a prévu cinq ou six ruptures simultanées; de cette façon il n'y a plus aucun danger). Arrivé au balai 6, le courant va au moteur dont il traverse les inducteurs et l'induit et revient en 7. Si l'appareil est dans la position de la figure, le balai 7 tombe dans le vide et le courant est obligé de traverser toutes les résistances comprises entre 7 et 13. En 13, le balai touche une pièce de cuivre de forme bizarre m, n, p, q, r, s , dont on va voir le rôle, et revient en 14, et de là en y , après avoir traversé une bobine S.

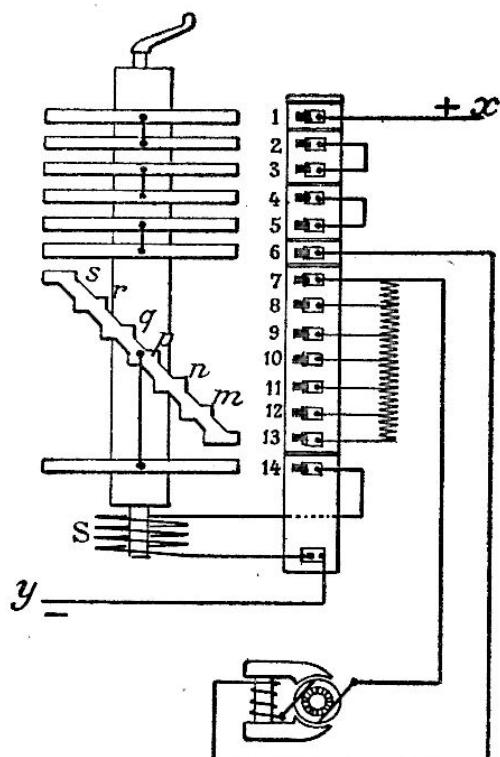


FIG. 26. — Schéma du montage d'un coupleur pour moteur-série.

vant par x , passe par le balai 1 sur la première moitié du premier disque; de ce demi-disque, il passe à celui en dessous, grâce à la connexion, puis va au balai 2, passe de 2 en 3, du demi-disque 3 au demi-disque 4 et du balai 4 va à un des balais du moteur, revient par l'autre balai en 5, passe de 5 en 6 et traverse les

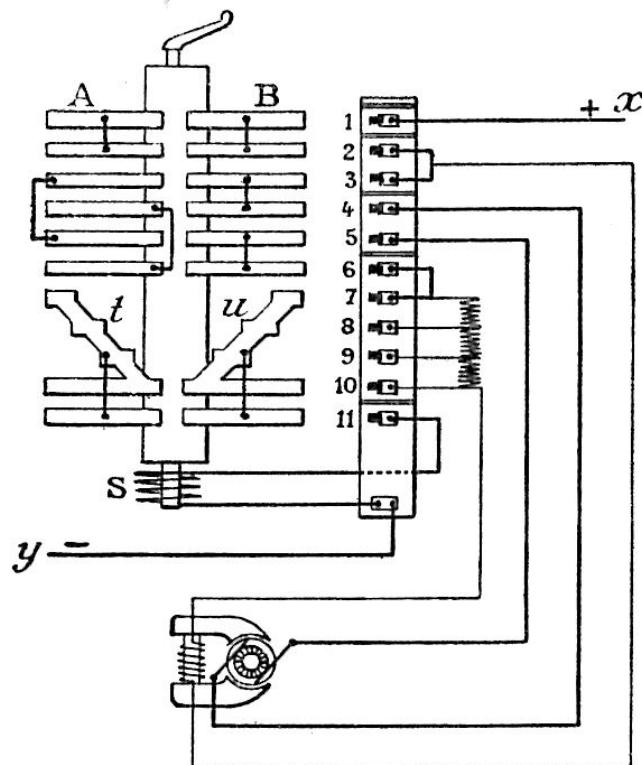


FIG. 29. — Schéma du montage d'un coupleur pour moteur shunt, marche avant et arrière.

résistances suivant la position du combinateur, pour aboutir en 11 à la bobine de soufflage S (dont nous expliquerons la présence, p. 57), traverse enfin l'enroulement série et retourne par y à la source.

Faisons faire un demi-tour à la manivelle, de façon à amener la série A des demi-disques sous les balais.

Le courant arrivant par x , va du balai 1 au premier

oblige le conducteur à se déplacer, jusqu'au moment où, étant trop long et trop étroit, il se *rompt*.

On a utilisé ce soufflage pour obtenir automatiquement la rupture des arcs qui tendent à se maintenir entre les deux pièces d'un interrupteur; on évite ainsi leur détérioration.

Dans un combinateur de tramways, par exemple, où les mises en marche et les arrêts sont des manœuvres courantes et fréquentes, on aurait, si l'on n'y prenait garde, de véritables flammes entre les pièces de contact qui amèneraient la mise hors de service rapide de l'appareil.

Pour remédier à ce grave inconvénient, on a d'abord eu l'idée de rompre le circuit en plusieurs points, c'est ce qui explique la présence de la série de disques et de contacts que nous avons décrits précédemment et qui pouvaient paraître inutiles à première vue. On améliore encore le fonctionnement en soufflant automatiquement les arcs dès qu'ils ont une tendance à se produire. Pour cela, les combinateurs portent au bas une bobine S dite de « *soufflage* » parcourue par le courant se rendant au moteur; cette bobine enfilée sur l'axe du combinateur (on la voit au bas de la figure 25), qui est en général en acier, l'aimante et les lignes de force s'échappent par les disques, pour revenir par la carcasse en fonte portant les contacts. Si donc une étincelle tend à jaillir entre les contacts, elle sera soufflée par ce champ magnétique, bien plus énergique que celui que l'on pourrait réaliser avec un aimant.

Du reste, on remarque que plus le courant à rompre **est** intense et plus forte est l'aimantation que donne la bobine S traversée par ce même courant. Le souf-

demi-disque A, puis au second, passe de 2 à 3, et ici, au lieu d'aller de 3 en 4, il saute de 3 en 5, grâce à la connexion spéciale *h* des demi-disques A qui diffère, on le voit, de celle de B. Il en résulte que le courant pénètre dans le moteur par l'autre balai et en ressort par celui où il entrait précédemment; il y a donc eu inversion et, par suite, aussi changement du sens de marche.

Le courant est ramené en 4, et par la connexion *k* passe au demi-disque en relation avec le balai 6, à partir de là il suit le même chemin que précédemment.

Pour le moteur shunt, le combinateur reste le même, l'excitation est ramenée à l'extrémité de la résistance comme dans les montages habituels.

Le changement de sens de marche s'opère encore par inversion du courant dans l'induit.

Avec un peu d'attention et en étudiant les schémas simples des combinatoires que nous venons de donner, on pourra trouver ensuite la marche du courant dans d'autres appareils de ce genre bien plus compliqués, organisés d'une façon toute semblable.

Soufflage magnétique. — Si l'on prend un fort aimant et si on l'approche d'un arc électrique jaillissant entre les deux carbons d'une lampe à arc, par exemple, on voit peu à peu la flamme constituante l'arc s'allonger comme si l'on soufflait dessus et, finalement, s'éteindre.

Ce phénomène s'explique facilement en remarquant que l'arc n'est autre qu'un conducteur électrique extrêmement mobile constitué par des gaz; or, l'aimant réagissant sur le courant comme il le fait dans un moteur électrique sur les fils de l'induit,

flage sera donc d'autant plus violent que le courant à couper sera plus énergique.

Grâce à cet ingénieux procédé, les pièces de contact ne s'abîment pas et l'appareil peut fonctionner indéfiniment. Le soufflage magnétique est également appliqué sur les contacteurs¹ que nous avons signalés page 37, en particulier sur ceux utilisés pour la propulsion des voitures des chemins de fer électriques.

1. Voir *Recueil de plans de pose et schémas d'électricité industrielle*, par A. SOULIER, p. 218-219. Garnier frères, éditeurs.

CHAPITRE V

FREINAGE ÉLECTRIQUE

Prenons un moteur shunt, et tandis que son induc-
teur à fil fin reste en relation avec la source de cour-
rant, et par suite reste excité, retirons les fils ame-
nant le courant aux balais et réunissons-les en
court-circuit. Que voyons-nous ?

Le moteur, qui tournait encore par la vitesse
acquise, s'arrête brusquement en produisant un gro-
gnement sourd. Nous venons de réaliser le freinage
électrique susceptible d'un grand nombre d'applica-
tions.

Et d'abord, pourquoi cet arrêt si brusque ? L'induit
tournant dans le champ magnétique de ses induc-
teurs, que nous avons à dessein laissés excités, se
comporte comme l'induit d'une magnéto ou d'une
dynamo ; il existe, nous l'avons vu page 7, entre
les balais une force électromotrice du fait même
de la rotation, et si nous réunissons les balais en
court-circuit un courant intense va circuler, mais
comme ce courant exige pour se maintenir une
certaine puissance, elle sera empruntée tout entière
à l'induit qui ne tardera pas à s'arrêter.

C'est un moyen, un peu brutal, il est vrai, d'enlever

à l'induit toute sa force vive, tout son élan, dirait-on en langage plus simple. On peut, il est vrai, modérer cet arrêt en insérant une résistance RF (fig. 30) entre les balais au lieu de les mettre en court-circuit, c'est le procédé utilisé dans le freinage électrique.

Dans les tramways électriques, il n'est pas sans

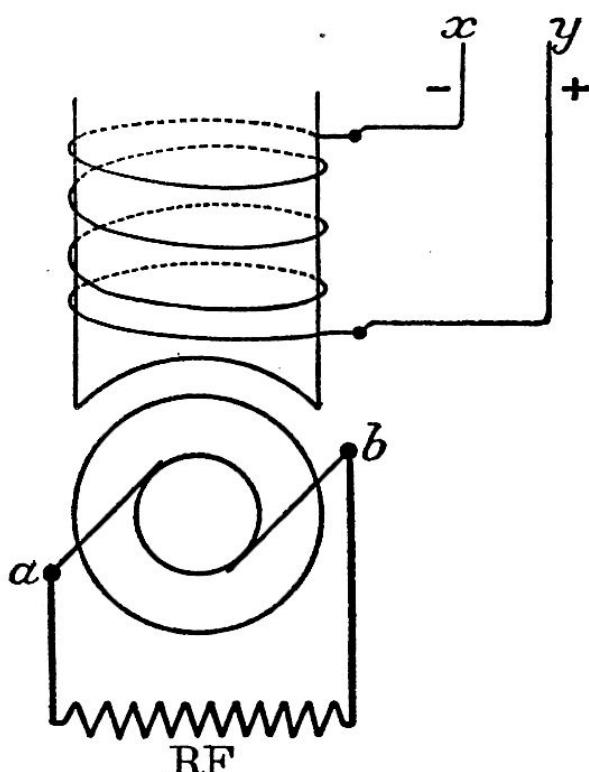


FIG. 30. — Freinage électrique.

intérêt, dans une grande ville, par exemple, de pouvoir arrêter les véhicules rapidement à quelques mètres d'un enfant ou d'un obstacle s'interposant accidentellement sur la voie, et qu'il est souvent difficile de prévoir. Le frein à main peut rendre des services, mais il n'est pas assez rapide; le freinage électrique provoquera un arrêt presque immédiat, en endommageant peut-être un peu le moteur et l'équipement de la voiture, mais en évitant un accident.

Les moteurs employés sur les tramways étant des moteurs-série, certaines précautions doivent être prises si l'on veut avec eux réaliser le freinage électrique.

Considérons (fig. 31 a), un moteur-série ordinaire alimenté par du courant continu arrivant par le fil x et sortant par le fil y .

Quand l'induit tourne dans le champ magnétique de ses inducteurs, il se développe entre les balais une force contre-électromotrice tendant à s'opposer

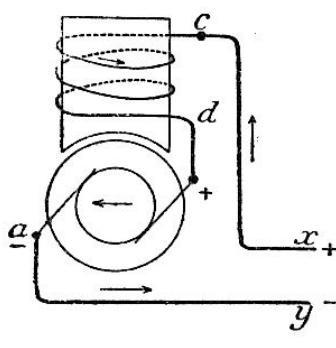


FIG. 31 a.

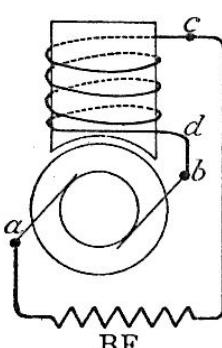


FIG. 31 b.

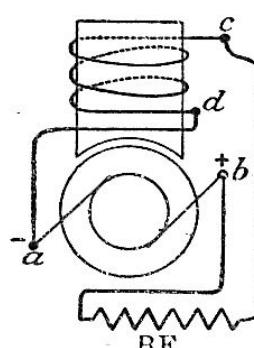


FIG. 31 c.

au passage du courant d'alimentation ; c'est la conséquence bien connue des lois de l'induction.

Il en résultera que le balai b sera, par exemple, positif et le balai a négatif.

Supprimons la source et réunissons les fils x , y , comme nous le faisions précédemment pour réaliser le freinage ou par une résistance RF (fig. 31 b), quel ne sera pas notre étonnement de ne voir aucun ralentissement sensible du moteur.

En examinant de près ce qui se passe, nous voyons qu'en réunissant les fils x et y , le courant déterminé par la force contre-électromotrice existant entre les balais a et b part du balai b (positif) traverse l'enroulement inducteur en sens inverse du courant

d'alimentation, il démagnétise donc les inducteurs, et le moteur n'étant plus excité ne peut plus fournir de courant pour son freinage.

Si nous prenons, au contraire, la précaution d'intervertir les attaches de l'induit avec l'inducteur, (fig. 31 c), nous aurons un excellent freinage. Dans le cas indiqué, le courant part de *b*, traverse la résistance de freinage RF et va aux inducteurs en entrant par le point *c* comme le faisait le courant d'alimentation, c'est le sens qui conserve au champ sa valeur et la machine sera génératrice.

Ce freinage est d'autant plus énergique que l'allure du moteur est plus rapide; c'est donc un procédé excellent d'arrêt en cas d'accident. Mais il ne peut être utilisé pour arrêter complètement la voiture sur une pente, il ralentira bien l'allure du véhicule, mais à mesure que la vitesse diminuera la force électromotrice du moteur devenu dynamo décroîtra aussi, le courant également, en sorte que pour une vitesse très faible le freinage ne sera plus sensible. Il convient donc, dans ce cas, de se servir d'un frein à main ou à air comprimé pour finir l'arrêt.

Dans certaines voitures de tramways, au lieu de perdre dans un rhéostat le courant de freinage produit par le moteur fonctionnant en dynamo, on l'envoie dans de puissants électros placés, par exemple, sur les voitures de remorque dont ils manœuvrent les sabots des freins ou sur le véhicule lui-même en lui donnant à attirer un plateau en fer calé sur l'axe des roues sur lequel il frotte en faisant frein.

Démarrateur inverseur avec position de freinage.

— Pour les monte-charges, ponts roulants, etc., il

peut être intéressant d'obtenir la marche en avant ou en arrière du moteur et son freinage; on emploie soit un combinateur dans le genre de ceux précédemment décrits ou un démarreur inverseur avec position de freinage tel que celui de la figure 32.

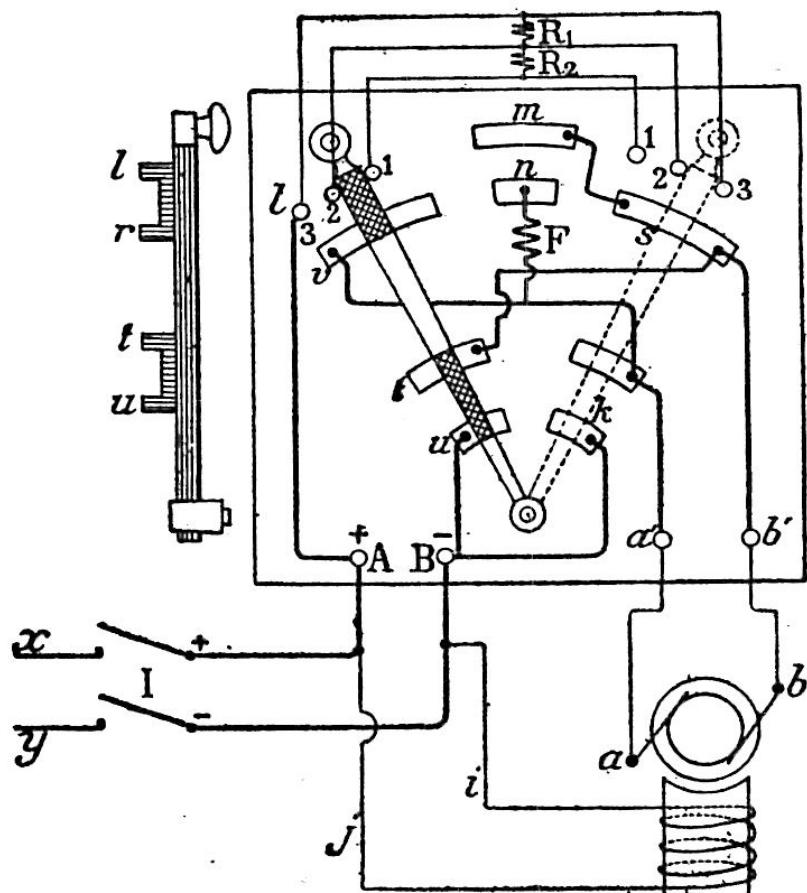


FIG. 32. — Appareil de commande pour moteur de pont roulant, réalisant la marche avant, la marche arrière et le freinage électrique.

Dans cet appareil, la manette poussée vers la droite réalise la marche du moteur dans un certain sens; poussée vers la gauche, on marche en sens inverse, et enfin disposée au milieu du plot de repos le moteur reste excité, son induit étant relié à des résistances; c'est la position de freinage qui doit toujours être interposée entre deux changements de marche.

Les connexions sont réalisées de la façon suivante :

Le courant arrive par les fils x, y , traverse un interrupteur I, excite le moteur (shunt) par une dérivation ij et aboutit aux bornes AB du démarreur.

Prenons le levier dans la position figurée en traits pleins. Le courant part de la borne A, arrive au plot l , est obligé de traverser la résistance R_1 , la résistance R_2 , et aboutit au plot 1, gagne le secteur v par le balai lr de la manette (voir le profil de la manette à gauche) et arrive à la borne a de l'induit.

Traversant l'induit qu'il fait tourner, le courant revient par b' au secteur s isolé à ce moment, et de là se rend au secteur t d'où il gagne le secteur u par le 2^e balai tu de la manette, il revient en B à la source.

Si on pousse la manette vers la gauche, elle franchit le 2^e plot, puis arrive sur le 3^e, ce qui a pour effet de supprimer les résistances de démarrage $R_1 R_2$, la pleine vitesse est ainsi obtenue.

Poussons, au contraire, la manette sur le plot 1 de droite : le courant arrivant par A vient en l , traverse les résistances R_1 et R_2 et aboutit au plot 1 de droite (celui de gauche étant isolé), puis, par le balai lr de la manette, il passe sur le secteur s et va de là directement au balai b du moteur.

Le sens du courant est maintenant inversé dans l'induit, puisqu'il reçoit le courant par son balai b , tandis que quand la manette était à gauche il le recevait par le balai a ; le sens de marche se trouvera donc changé.

De a , le courant gagne le secteur k par le balai tu de la manette, il revient à la source par la borne B.

Freinage. — Plaçons la manette verticalement, le courant d'alimentation est supprimé sur l'induit,

puisque le balai *tu* de la manette se trouve dans le vide. L'induit, au contraire, est mis en court-circuit sur la résistance F puisque ses balais *ab* communiquent par les fils *a'b'* au secteur *n* d'une part, à travers la résistance F et au secteur *m* d'autre part, par la pièce *lr*. Les inducteurs étant excités, le freinage se produit.

Nota. — Pour éviter de couper l'excitation au repos quand on n'utilisera pas le moteur, on devra ramener la manette soit à droite, soit à gauche, et quand le moteur aura pris sa vitesse on mettra à l'arrêt l'interrupteur I, les inducteurs resteront en dérivation sur l'induit, et quand le moteur sera arrêté on ramènera la manette au milieu; on évitera ainsi toute rupture brusque du circuit d'excitation.

Couplage des moteurs. — Les premiers tramways électriques ne comportaient qu'un seul moteur, dont on réglait la marche en utilisant un commutateur du genre de celui de la figure 26. Puis, à la suite du développement de la traction électrique et pour satisfaire aux demandes croissantes du public qui appréciait de plus en plus ce mode de locomotion rapide et peu coûteux, on fut obligé d'employer des voitures plus spacieuses exigeant, par suite, une puissance plus grande. Cela conduisit à installer deux moteurs par voiture, un sur chaque essieu.

Ce système permettait en outre de pouvoir toujours marcher avec un des moteurs en cas d'avarie à l'autre.

Il était nécessaire, dès lors, de prévoir sur le combinateur le couplage de ces moteurs; il a été réalisé de la façon suivante :

Position zéro de la manette. — Toutes les connexions sont coupées, le schéma (fig. 33-*a*) indique clairement les organes et les liaisons développées : R_1 et R_2 sont les résistances de démarrage, I_1 et I_2 les induits des deux moteurs-série dont les bobines inductrices sont en C_1 et C_2 .

Position 1. Démarrage. — Tous les organes sont

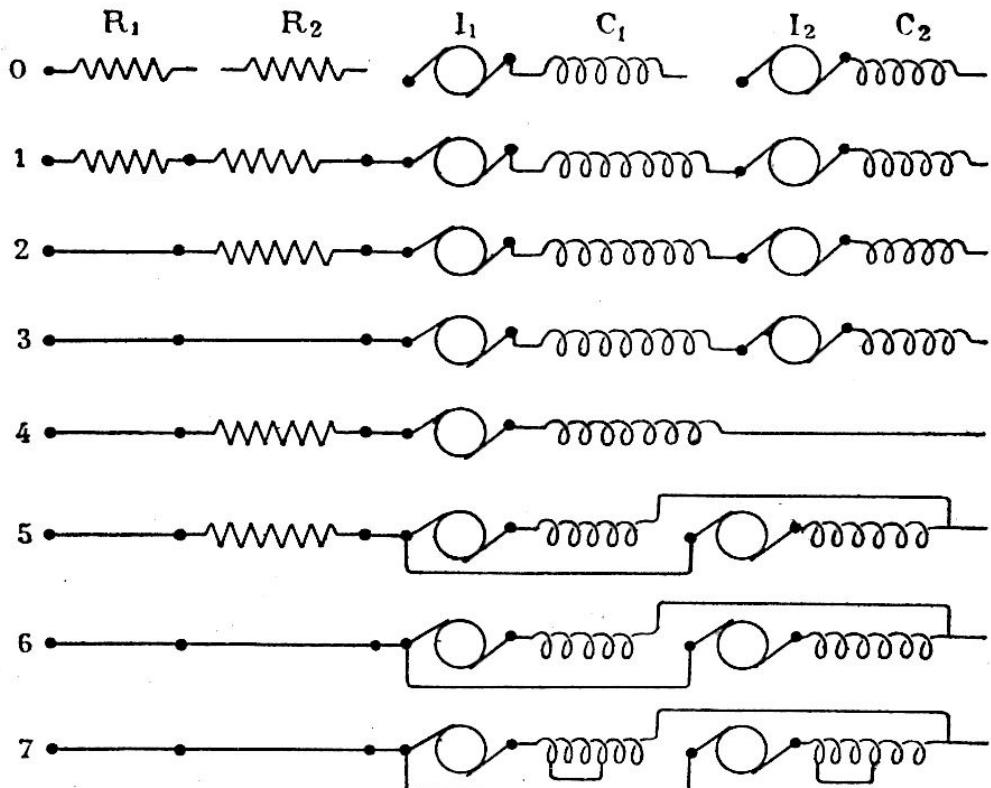


FIG. 33.— Couplages divers réalisés sur les voitures de tramways.

en série, le courant traverse le maximum de résistance et successivement les deux moteurs, le démarrage s'effectue.

Position 2. Accélération. — La résistance R_1 est supprimée, le courant augmente dans les deux moteurs, la vitesse s'accroît.

Position 3. — Touffes les résistances sont supprimées, c'est la marche en série à demi-vitesse.

Position 4. — La voiture étant lancée, son conducteur passe sur la touche 4 sans s'y arrêter; il n'y a plus qu'un moteur en circuit, mais on introduit la résistance R_2 pour éviter un afflux trop considérable du courant. c'est une position intermédiaire servant à préparer le couplage suivant.

Position 5. — Mêmes connexions que précédemment, sauf que le deuxième moteur est en dérivation ou en parallèle avec le premier. La vitesse s'accroît, car tandis que dans le couplage en série 3 la tension d'alimentation était répartie entre les deux induits, la moitié sur chacun d'eux, ici chaque moteur reçoit la tension totale d'alimentation, ils doivent donc tourner plus vite pour produire la force contre-électromotrice correspondant à la tension du réseau.

Position 6. — Toute résistance est supprimée, les deux moteurs sont en dérivation sur la ligne, ils travaillent en parallèle, c'est la marche normale.

Position 7. — Elle correspond à la grande vitesse; certains réseaux même ne l'emploient pas par mesure de prudence; on réalise le même couplage en parallèle que précédemment, mais on met en court-circuit quelques spires des bobines inductrices, ce qui affaiblit l'aimantation, l'induit doit alors tourner plus vite pour produire dans le champ affaibli la même force contre-électromotrice.

NOTA. — Voir les schémas de freinage des moteurs électriques dans le *Recueil de plans de pose et schémas d'électricité industrielle*, par A. SOULIER. Garnier frères, éditeurs.

CHAPITRE VI

ENTRETIEN DES MOTEURS A COURANT CONTINU

Dans une installation importante comprenant un grand nombre de moteurs électriques, l'entretien joue un grand rôle; s'il est fait régulièrement et consciencieusement, il évitera souvent des réparations coûteuses.

On devra avant tout maintenir les moteurs et l'appareillage, tel que les coupleurs et les rhéostats, en parfait état. Tous les mois, par exemple, on visitera minutieusement chaque moteur au point de vue de l'isolement entre les divers circuits et la masse métallique ou bâti de la machine, en s'a aidant d'un ohmmètre¹, ou si l'on veut faire l'essai en marche en utilisant une simple lampe à incandescence, l'un des pôles de lampe étant relié à la *masse* du moteur, l'autre pôle étant mis en communication successivement avec les bornes d'arrivée du courant au moteur à essayer. Si aucun contact anormal n'existe entre le bobinage et la carcasse, la lampe ne s'illuminera pas; au contraire, si un fil touche à une pièce

1. Voir *Les Installations électriques*, par A. SOULIER, p. 177-191. Garnier frères, éditeurs.

métallique faisant corps avec le bâti, la lampe brillera (à condition, toutefois, que la source de courant soit bien isolée et ne comporte pas de neutre à la terre).

On vérifiera également si, à l'arrêt, l'induit tourne bien librement dans la cavité polaire, et s'il ne touche pas aux inducteurs on enlèvera avec soin les limailles de toutes sortes qui restent souvent attachées sur les pièces polaires. Les porte-balais seront réglés ; on vérifiera les ressorts et on remplacera les balais en charbon qui seraient trop usés. Le collecteur sera nettoyé en appliquant contre sa surface du papier verre ou au carborundum qui use à la fois le mica et le cuivre (se méfier du papier émeri dont les grains, parfois conducteurs, s'introduisent entre les lames en provoquant des courts-circuits). Les câbles seront examinés avec soin, principalement dans les parties coudées ; on isolera avec du ruban chittertonné les régions qui auraient pu se trouver dénudées.

Les avaries les plus fréquentes sont surtout des contacts à la masse provenant de ce que des fils ou câbles se sont dénudés par le frottement et viennent toucher au bâti. On constate aussi quelquefois des courts-circuits entre les lames du collecteur provoqués par l'accumulation de limaille de cuivre et de poussière de charbon entre les lames ou entre les tiges de connexion reliant les lames aux bobines.

Quand un moteur refusera de fonctionner, la première chose à faire sera de visiter les *parties déjà réparées ou retouchées*. Bien souvent le défaut se trouve dans une réparation mal faite.

Enfin, l'humidité peut provoquer des courts-circuits : l'eau en imprégnant le coton qui recouvre les

fils des enroulements permet au courant de passer d'une spire à l'autre, en supprimant l'isolation; on devra donc veiller avec soin à ce que les enroulements soient toujours protégés contre les projections d'eau, c'est pour cela que l'on n'emploie plus dans les ateliers que des moteurs blindés.

Parmi les réparations les plus fréquentes, celles que l'on retrouve le plus souvent sur les livres des ateliers, citons :

Changement de lames du collecteur;
Remplacement de bobines de l'induit;
Réfection de bobines inductrices;
Remplacement du frettage de l'induit;
Remplacement des câbles souples;
Remplacement des lames de mica du collecteur;
Réfection d'un collecteur;
Repassage du collecteur sur le tour, etc.

Les bobines d'inducteur ou d'induit refaites à neuf doivent être *séchées* avec soin avant leur montage; on sait, en effet, que, pour leur permettre de résister plus facilement à l'humidité, on imprègne les enroulements de vernis formé de gomme laque dissoute dans de l'alcool ou de bitume de Judée dissous dans la benzine, ou encore de vernis à la *bakélite*. On devra, avant de mettre le moteur en service, sécher convenablement les bobines, et pour cela les placer dans une étuve chauffée à la vapeur ou au gaz; on les y laissera plusieurs jours.

Une fois les bobines sèches, on les remonte sur le moteur que l'on devra faire tourner d'abord lentement à vide sous l'action du courant dont la tension sera réduite par intercalation d'un rhéostat. En augmentant peu à peu la vitesse ou en diminuant la

résistance, on arrivera à lui appliquer progressivement la tension normale, tout en s'assurant avec un ampèremètre que le courant n'est pas exagéré.

On peut même par ce procédé obtenir le séchage complet des induits, si l'on ne peut faire autrement; mais il faut avoir bien soin de commencer à faire tourner le moteur à très petite vitesse, de façon à ce que la tension appliquée sur ses enroulements soit faible; il faut compter de 6 à 12 heures de marche continue. Du reste, la durée de cette opération doit être telle que, une fois le moteur refroidi, la résistance d'isolement entre les enroulements et la masse soit au moins de 1 mégohm (un million d'ohms).

Dans certains dépôts de tramways, on sèche les enroulements sans remonter le moteur, simplement en les faisant traverser par un courant égal au courant normal ou légèrement supérieur, courant que l'on règle par des résistances; on dispose un thermomètre entre les fils (entre les spires de l'induit, par exemple) qui permet de surveiller l'opération.

On ne perdra pas de vue que l'élévation de température diminue l'isolement électrique, de sorte qu'à la température de 80° à la fin du séchage, l'isolement ne paraît pas plus grand qu'au début; mais si on laisse refroidir l'induit, on constate une valeur bien plus grande lorsqu'il atteint la température ambiante. La dépense de courant nécessitée par le séchage électrique représente un prix plus grand peut-être que celui obtenu avec le séchage à l'étuve, mais il a l'avantage de pouvoir être réalisé sur place sans nécessiter de matériel compliqué.

Lorsqu'un moteur aura été immergé plusieurs heures dans l'eau, il devra être traité spécialement

(voir page 219, Remise en état de moteurs ayant subi des inondations).

Enfin, les rhéostats de démarrage doivent être surveillés avec beaucoup de soin. Trop souvent, il arrive en effet que, par suite d'un oubli ou de négligence, quelques spires du rhéostat sont laissées en circuit et s'échauffent d'une façon continue; elles rougissent, et en se dilatant viennent toucher les spires voisines ou simplement le bâti en fer du rhéostat; il en résulte un contact à la masse. On redressera avec soin la résistance endommagée, et si on ne peut le faire sur place on interposera provisoirement une feuille de mica ou d'amiante entre la spirale et la pièce métallique la plus voisine pour éviter toute perte de courant. On n'emploiera que l'amiante ou le mica qui sont les seuls isolants résistant à l'action de la chaleur.

De même, dans les rhéostats hydrauliques (voir page 41), on devra vider et nettoyer les réservoirs de liquide environ une fois par mois en enlevant les boues tombées au fond et en remettant du liquide neuf (solution de carbonate de soude dans l'eau). Les pièces métalliques rougies ou oxydées seront nettoyées et décapées, et l'isolation des bornes vérifiée.

DEUXIÈME PARTIE

LES MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

CHAPITRE PREMIER

EXPÉRIENCES AVEC LES COURANTS ALTERNATIFS

Avant de commencer l'étude des moteurs à courants alternatifs, et pour bien familiariser le lecteur avec l'emploi de ces courants, nous étudierons leurs propriétés assez curieuses.

Prenons comme générateur de courants alternatifs une de ces petites magnétos qui furent si répandues pour l'allumage des voitures automobiles ou pour produire les appels téléphoniques sur les appareils portatifs.

La figure 34, qui représente une coupe de ces machines, en montre aussi leur simplicité qui est idéale. Nous voyons en NS les pôles d'un aimant en fer à cheval embrassant l'induit, lequel est constitué par une simple bobine en forme de navette. On le réalise en prenant un cylindre de fer évidé sur la longueur duquel on enroule du fil de cuivre *ab* recouvert de coton ou de soie.

En faisant tourner cette bobine entre les pôles NS de l'aimant dont les lignes de force vont de N vers S, on voit qu'elle est traversée par un flux entrant par *c* et sortant par *d*, puis quand elle a fait un demi-tour et que la partie *d* vient en regard de N le flux entre par *d* et sort par *c*.

La bobine étant le siège de *rapides variations de*

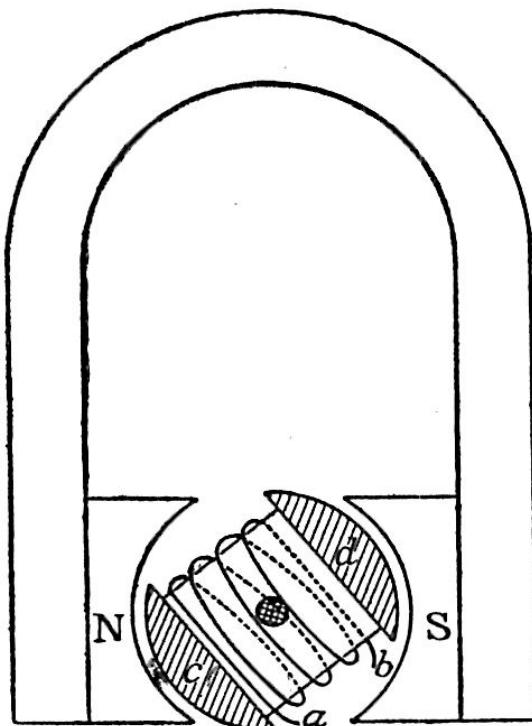


FIG. 34. — Générateur de courant alternatif.

flux pourra fournir un courant, si ses extrémités sont reliées de façon à constituer un circuit fermé.

Ce courant est *alternatif*, car d'après la loi de Lenz, il doit constamment s'opposer à la variation du flux. Or, nous venons de voir que la bobine, par suite de sa rotation, était traversée par les lignes de force de l'aimant, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, ce qui correspond à un flux alternatif. Le flux étant alternatif, le courant le sera aussi, et le

nombre de changements de sens qu'il éprouvera dépendra du nombre de fois que le flux changera lui-même de sens, c'est-à-dire de la vitesse de rotation de la bobine. Remarquons en passant qu'on aurait très bien pu laisser la bobine fixe et faire tourner l'aimant autour, le courant produit dans la bobine serait aussi bien alternatif.

Nous voyons donc déjà une première notion se dégager, c'est celle de la *fréquence* des courants

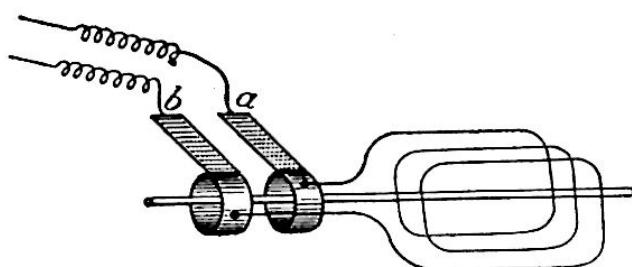


FIG. 35. — Bobine mobile et bagues de captation du courant.

alternatifs, c'est-à-dire leur apparition plus ou moins fréquente dans un temps donné.

Captions ce courant alternatif à l'aide de deux bagues isolées reliées chacune à l'une des extrémités du fil de la bobine et sur lesquelles nous ferons appuyer deux balais (fig. 35).

Relions les balais *a*, *b* à une petite lampe à incandescence; nous la verrons s'illuminer à mesure que l'on fera tourner l'induit, ce qui montre que les courants alternatifs produisent des effets lumineux et calorifiques, aussi bien que les courants continus, et cela se comprend puisque l'échauffement d'un fil par un courant ne dépend nullement du *sens* de ce courant; il subsiste si ce dernier change constamment de direction, comme c'est le cas du courant alternatif.

Si nous faisons tourner notre machine à faible vitesse de façon à ce que le filament de la lampe ait le temps de se refroidir entre deux changements de sens consécutifs du courant, on verra se produire des scintillations désagréables de la lumière. Ce fait nous montre que les courants alternatifs à de trop basses fréquences sont improches à assurer un éclairage convenable.

Effets magnétiques. — Reprenons notre machine à courant alternatif, que, pour plus de simplicité, nous représenterons par un cercle A sur lequel appuient deux balais (à l'intérieur, une flèche à double direction indique la nature alternative du courant produit), reliers les deux balais *a* et *b* à un électro-aimant E et intercalons un ampèremètre I pour courants alternatifs.

Faisons tourner la machine lentement d'abord, puis de plus en plus vite. Au début, en approchant une palette de fer doux de l'électro-aimant E, nous la sentirons très bien vibrer, et avec un peu d'attention on observera une attraction à chaque changement de sens; mais, chose plus curieuse, à mesure que nous augmentons la vitesse de la machine l'ampèremètre ne paraît pas indiquer des courants plus intenses : son aiguille marque presque la même valeur. Répétons la même expérience avec une magnéto à courant continu, à anneau de Gramme par exemple, et nous verrons, au contraire, l'aiguille de l'ampèremètre suivre les variations de vitesse. Cela se comprend très bien, car à mesure que la vitesse augmente la force électromotrice produite par la machine augmente et l'intensité aussi, car

elle suit la première en vertu de la loi d'Ohm $I = \frac{E}{R}$.

Avec la machine à courant alternatif, rien de semblable; cependant, si l'on retire l'électro-aimant et si l'on met un voltmètre V entre les fils a et b , on constate bien que, comme avec la magnéto à courant continu, la tension augmente avec la vitesse. Alors pourquoi l'intensité n'en fait-elle pas autant?

Tout le mal vient évidemment de l'électro-aimant E ,

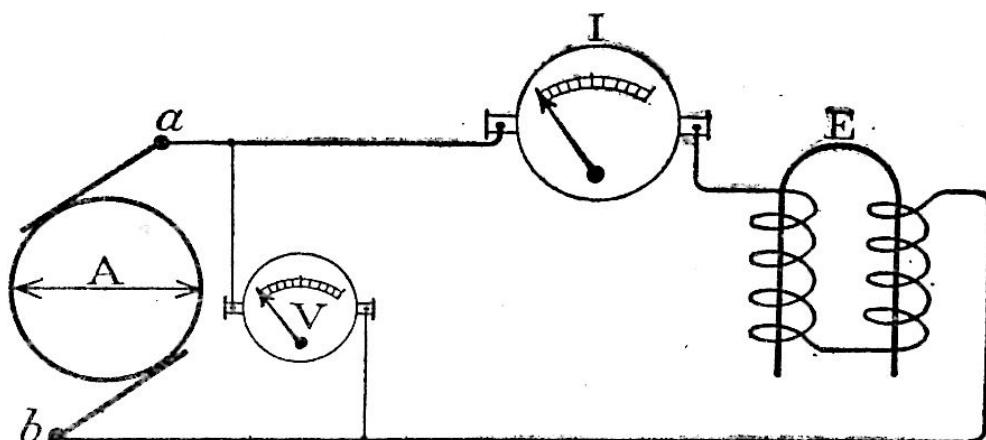


FIG. 36. — Effet des courants alternatifs.

et nous voyons qu'il ne paraît pas s'accommoder facilement des rapides variations de courant qu'on lui envoie. Il cherche à s'opposer à ces fluctuations; la cause se devine, c'est dans la loi de Lenz qu'il faut la trouver.

En effet, lorsque le courant va dans un certain sens, l'électro-aimant s'aimante; il s'établit dans son noyau de fer un flux de force magnétique de direction bien déterminée; puis, si le courant change de sens, le flux devra changer aussi; or, comme *toute variation de flux de force embrassé par un circuit donne naissance à un courant, si ce circuit est fermé* il va s'établir des courants ayant pour effet de s'oppo-

ser aux variations de flux, et par suite en sens inverse de ceux que tend à produire la machine à courant alternatif; ces courants se *contrariant* constamment, on voit que l'intensité ne pourra guère augmenter.

On traduit cet effet en disant que l'électro-aimant présente de la *self-induction*, du mot anglais *self* qui veut dire soi-même. Ce mot rappelle l'expérience précédente où des courants antagonistes sont induits par l'électro-aimant lui-même, du fait des variations de flux dont il est le siège pour s'opposer au passage du courant de la machine.

Il suffira de nous rappeler que toute bobine que nous intercalerons dans un circuit parcouru par des courants alternatifs tendra à faire diminuer l'intensité du courant traversant ce circuit.

Une application heureuse de ce phénomène a été faite pour les lampes à arc marchant sur le courant alternatif. Plutôt que de se servir de rhéostats pour réduire l'intensité, on emploie des bobines dites de *self* beaucoup plus économiques, puisqu'elles constituent un écran, au lieu de dissiper l'énergie sous forme de chaleur, comme cela a lieu dans les rhéostats.

Mais ce n'est pas tout ce que nous remarquons sur l'électro-aimant alimenté par du courant alternatif; d'abord il *ronfle*, et ce bruit vient de la succession des attractions produites à chaque changement de sens du courant. Le martèlement de la palette qui résulte de ces variations de courant ainsi que l'attraction intermittente des différentes pièces constituant l'électro-aimant sont la cause de ce bruit. Ensuite, l'électro-aimant, ou plutôt son noyau de fer doux,

s'échauffe rapidement. Ceci est plus grave, car si l'on n'y prend garde l'élévation de température sera telle que les bobines elles-mêmes, auxquelles la chaleur se communiquera, pourront être détériorées.

Cet échauffement tient à deux causes :

En premier lieu, comme dans l'induit des dynamos, le renversement du sens des lignes de force souvent répété provoque un échauffement du fer par le phénomène d'*hystéresis*. Il se passe dans le noyau de fer ce que l'on constate quand on cherche à faire tourner une surface plate, une pelle par exemple, dans l'eau ou dans un liquide visqueux; de même que, dans ce cas, l'énergie qu'il faut produire se perd en frottements dans le liquide, de même dans l'électro-aimant il faut dépenser une certaine énergie pour orienter les molécules du fer dans le sens de l'aimantation, dépense qui se répète à chaque variation de flux. Cette énergie se dissipe en chaleur qui élève la température du noyau; elle est d'autant plus grande que la fréquence ou le nombre d'inversions est plus grand dans un temps donné, que le noyau est plus volumineux et que l'aimantation est plus forte.

La seconde cause d'échauffement du noyau tient à ce qu'il se forme à l'intérieur des courants parasites bien connus sous le nom de courants de Foucault.

L'électro-aimant parcouru par des courants alternatifs peut, en effet, être assimilé à un transformateur dont l'enroulement en fil de cuivre est le primaire, et le noyau de fer le secondaire fermé sur lui-même; il est dès lors le siège de courants intenses. Pour diminuer l'importance de ces courants parasites, on est conduit comme pour l'induit des dynamos, à diviser le noyau de fer en feuilles minces isolées entre elles,

où à le constituer, comme dans la bobine de Ruhmkorff, par un faisceau de fils de fer isolés par du vernis. Les bobines elles-mêmes, si elles sont en métal, devront être fendues (fig. 37) pour ne pas constituer un circuit fermé.

En employant des noyaux lamellés ou feuilletés, non seulement on combat l'échauffement par la diminution de l'effet dû aux courants de Foucault, mais on rend plus faible aussi la perte par hysté-

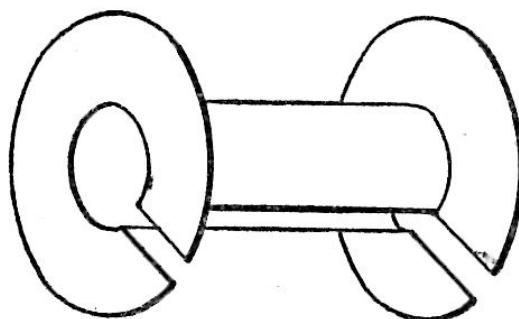


FIG. 37. — Bobine fendue.

résis. Ce fait tient à ce que l'on utilise des feuilles de tôle choisies en fer très doux, la perte par hystéresis étant moindre à mesure que l'on prend du fer plus doux ; c'est le cas de certaines tôles spéciales. C'est un peu ce

qui se passe si on ajoute de l'eau à du sirop : tandis que dans le sirop il est plus difficile de déplacer rapidement une pièce présentant une certaine surface, cela devient plus aisément si la viscosité est diminuée par addition d'eau.

Décalage. — Une autre surprise plus importante nous attend encore si nous examinons de plus près ce qui se passe dans l'expérience ci-dessus.

Prenons un électro-aimant avec un noyau de fer feuilleté très doux, puisque nous venons de reconnaître que c'était indispensable avec le courant alternatif ; plaçons un voltmètre V entre les bornes de notre machine à courant alternatif que, pour simplifier, nous appellerons un *alternateur*, et faisons tour-

ner l'induit en observant les indications des appareils de mesure (fig. 36).

Nous lisons, par exemple, 110 volts sur le voltmètre et 4 ampères sur l'ampèremètre; si ces chiffres étaient obtenus avec du courant continu au lieu du courant alternatif, nous dirions que le circuit absorbe une puissance $P = EI = 110 \times 4 = 440$ watts, c'est cette puissance que devrait fournir la machine.

Faux tout cela en courant alternatif! Ainsi nous pouvons très bien avoir 110 volts et 4 ampères, et la machine ne fournira même pas la moitié des 440 watts que l'on croirait nécessaires. En voulons-nous la preuve? il n'y a qu'à intercaler un compteur ou un wattmètre; c'est à peine s'ils indiqueront 200 watts! A quoi cela peut-il bien tenir?

Remplaçons l'électro-aimant par 8 lampes de 55 watts; elles s'illumineront, l'ampèremètre marquera encore 4 ampères, le voltmètre 110 volts, et le compteur ou le wattmètre indiqueront 440 watts; nous voici replacés dans le cas du courant continu.

Ainsi donc, une bobine insérée dans un circuit à courant alternatif absorbe une *puissance apparente* qui peut atteindre le double de la *puissance vraie ou réelle*, tandis que des lampes absorbent une puissance identique à celle qu'elles nécessiteraient sur courant continu.

Un autre phénomène se produit donc ici sous l'effet de la bobine, phénomène dont il est difficile de saisir le sens à première vue, mais qui a fait dire à des mécaniciens ou à des chauffeurs, dans leur langage imagé, que les «ampères pour lampes sont plus durs à produire que les ampères pour moteurs». Qu'on nous pardonne cette expression, mais elle tra-

duit mieux que toute autre ce phénomène, et c'est le plus souvent, non plus au wattmètre que le mécanicien le constate, mais sur le nombre de pelletées de charbon qu'exige sa chaudière, ce qui est pour lui un résultat tout aussi important.

Pour expliquer ce phénomène, il faudrait ralentir suffisamment les variations du courant pour pouvoir les suivre attentivement. Certains appareils extrêmement ingénieux, tels que l'ondographe Hospitalier, permettent de réaliser ce ralentissement et de tracer ce que l'on appelle la courbe du courant.

Supposons qu'un observateur assez habile arrive à noter tous les centièmes de seconde l'intensité du courant qu'il lirait sur un ampèremètre à indications rapides avec zéro au milieu, et en même temps la tension sur un voltmètre analogue.

Portant ses résultats sur le papier, notre observateur recueillera, dans le cas du montage avec l'électroaimant de la figure 36, les courbes suivantes (fig. 38) :

Sur la ligne OK divisée en centièmes de seconde, on portera les temps, et sur des perpendiculaires à cette ligne les valeurs correspondantes lues sur le voltmètre et l'ampèremètre.

Supposons que l'on parte du moment où l'aiguille du voltmètre est au zéro, on voit peu à peu l'aiguille marquer + 50, + 100 et atteindre un maximum de 140 volts au bout de 25 centièmes de seconde, puis la tension décroît, repasse par 100 volts... 50, et revient à zéro après 50 centièmes de seconde. A partir de ce moment, le courant s'inverse, l'aiguille du voltmètre passe de l'autre côté et accuse — 50 volts, — 100, et atteint un maximum de 140 volts au bout de 75 centièmes de seconde, et après ce maximum le courant

décroît régulièrement jusqu'à zéro pour recommencer ensuite ; c'est le phénomène provoqué par les bobines de l'alternateur qui s'éloignent et s'approchent des pôles ; jusqu'ici, rien que de très naturel.

Mais observons en même temps l'ampèremètre :

Nous voyons, par exemple, l'aiguille de cet instrument au zéro tandis que le voltmètre est déjà à 100 *volts*, l'ampèremètre est donc en *retard* sur le

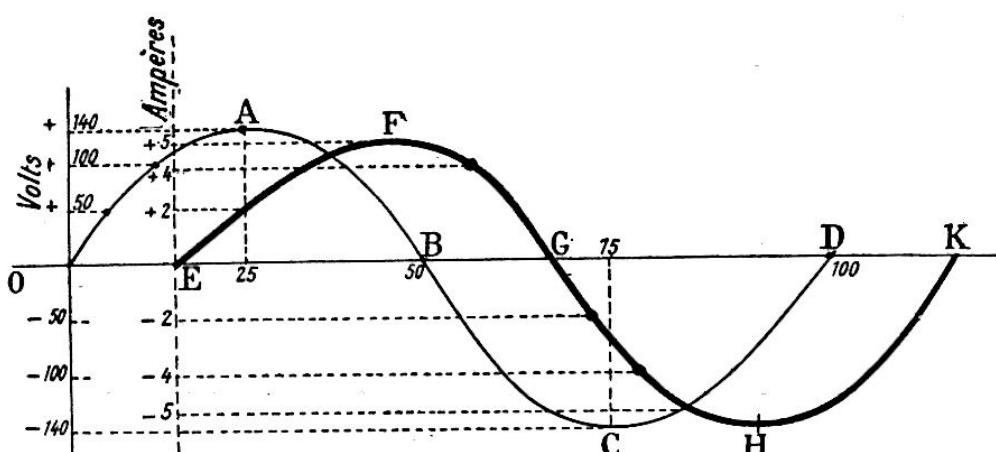


FIG. 38. — Courants décalés.

voltmètre, puis l'aiguille de l'ampèremètre continue à monter, tandis que celle du voltmètre descend, l'intensité atteint un maximum F de 5 ampères par exemple, tandis que l'aiguille des volts approche de zéro et va passer de l'autre côté.

On voit maintenant pourquoi nous ne sommes plus en droit de multiplier les volts par les ampères pour avoir la puissance absorbée, comme on le fait avec le courant continu, la présence de l'électro-aimant a pour effet de *retarder* l'intensité ou de *décaler* le courant sur la force électromotrice, les ampères et les volts n'apparaissant pas *en même temps*, leur produit n'exprime plus la puissance vraie.

Remplaçons l'électro-aimant par des lampes absorbant la même intensité, et nous verrons les aiguilles de l'ampèremètre et du voltmètre manœuvrer en même temps; dans ce cas, la courbe de l'intensité ne sera plus décalée et viendra se loger sous celle des volts (fig. 39), la concordance sera parfaite et on pourra multiplier l'une par l'autre les indications des deux instruments pour avoir la puissance vraie.

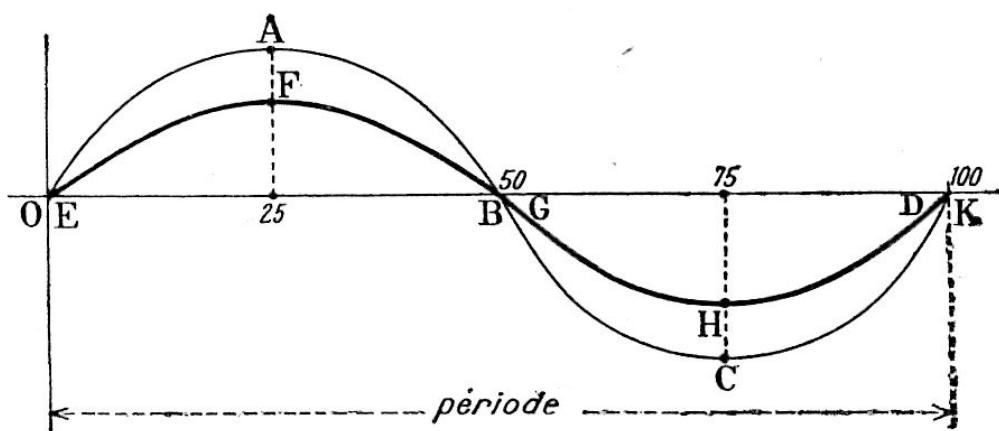


FIG. 39. — Courants en concordance de phase.

Si l'on pouvait exagérer ce phénomène et décaler le courant exactement d'un quart de période (l'intervalle de 0 à 100 représentant une période), on arriverait à un résultat assez curieux : c'est d'avoir un circuit absorbant des volts et des ampères, tout en prenant une puissance nulle; ce fait tiendrait à ce que la courbe des volts atteindrait son maximum, tandis que celle des ampères serait au zéro (fig. 53) et, réciproquement, celle des ampères arriverait au maximum, tandis que celle des volts passerait par zéro¹.

1. Dans ce cas, on dit que le circuit absorbe des courants *déwattés*; comme ce courant ne sert qu'à maintenir l'aimantation dans les bobines dont se compose le circuit, on l'appelle de préférence *courant magnétisant* ou *courant réactif*.

Ce retard dans la courbe de l'intensité est causé uniquement par la self-induction de l'électro-aimant, l'aimantation du noyau tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre se fait en quelque sorte avec peine, ce qui entraîne un *retard* dans l'établissement du courant. Il se passe quelque chose d'analogue à ce que l'on observe dans le démarrage d'un train; ce n'est qu'un instant après que le mécanicien a appliqué la pression de la vapeur sur les pistons de la locomotive que le train démarre, et encore il ne prend pas tout de suite sa vitesse; l'*inertie* qu'oppose la masse du train à sa mise en vitesse aussi bien qu'à son arrêt rapide est, en somme, assimilable à la *self-induction* de la bobine.

C'est encore ce phénomène qui veut que lorsqu'on applique une tension continue sur les inducteurs d'une dynamo ou d'un moteur, et si on intercale un ampèremètre, on voit l'aiguille de ce dernier monter lentement, de la même manière que fait le train ou un véhicule quelconque sur lequel on exerce une traction.

Actions répulsives observées avec le courant alternatif. — On obtient avec les courants alternatifs un grand nombre d'expériences impossibles à réaliser avec du courant continu; beaucoup d'entre elles ont été utilisées pour la construction de moteurs, aussi avons-nous pensé qu'il était utile de les faire connaître avant d'entreprendre l'étude des alternomoteurs.

Prenons un noyau de fils de fer F; entourons-le d'une bobine AB que nous pourrons relier par ses fils *ab* à un alternateur. Enfilons sur le noyau de

fer une bague CD en aluminium, métal léger et conducteur. Faisons agir le courant alternatif sur la bobine, quelle n'est pas notre surprise de voir la bague chassée en l'air.

Si nous maintenons la bague autour du noyau de fer, nous ne tarderons pas à la sentir s'échauffer entre

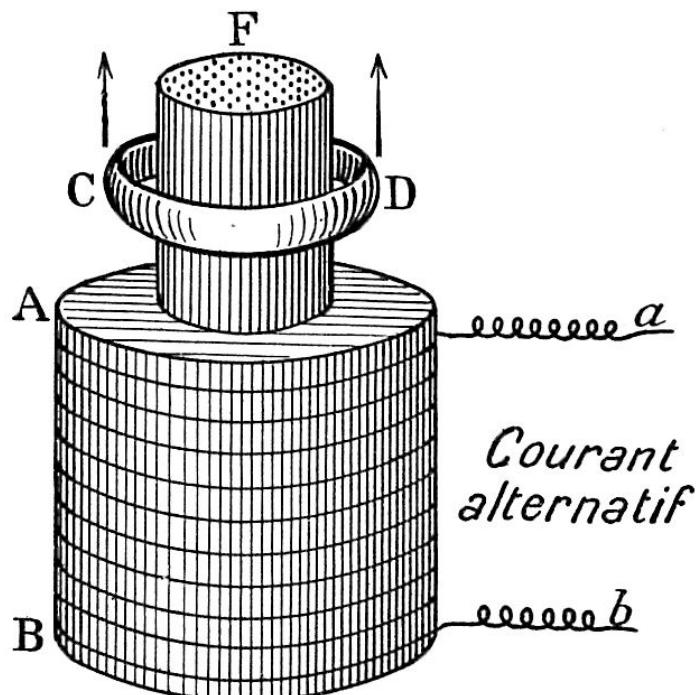


FIG. 40. — Répulsion d'un anneau.

nos doigts; ce fait seul va nous permettre de déceler la cause qui produit sa répulsion.

Nous voyons, en effet, que cet ensemble peut être assimilé à un transformateur¹: la bobine AB en est le primaire, F le noyau de fer et CD l'enroulement secondaire constitué par une seule spire fermée sur elle-même.

Chaque fois que le courant circulera dans un sens

1. Voir *l'Électricité sans algèbre*, par A. SOULIER, p. 211-218. Garnier frères, éditeurs.

dans la bobine AB, un courant induit prendra naissance dans la bague CD, et son sens sera tel que le flux engendré sera de sens inverse de celui produit par AB. Cela revient à dire que le sens du courant circulant dans la bague sera de sens inverse de celui de la bobine AB. Or, si l'on met en présence deux courants (l'expérience se fait aisément avec du courant continu) on constate que s'ils sont de *même sens* ils s'attirent; s'ils sont de sens inverse, ils *se repoussent*.

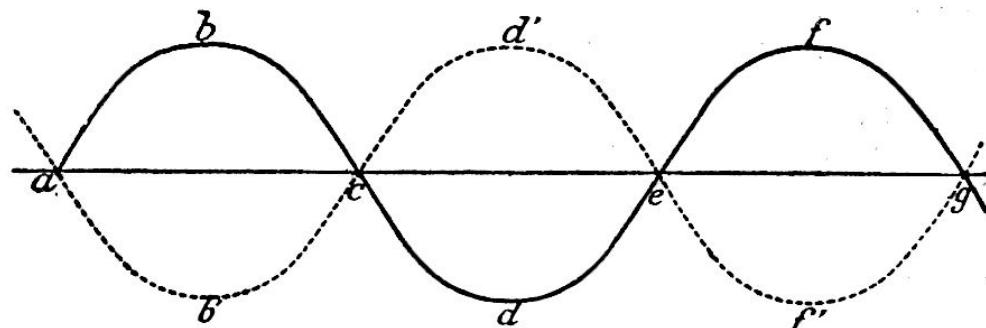


FIG. 41. — Courants dans le primaire et le secondaire d'un transformateur.

*sens*¹. L'anneau sera donc *chassé* loin de la bobine AB en vertu de cette loi.

La courbe *abcdef* en trait plein (fig. 41) représente par exemple le courant dans la bobine AB; celui dans l'anneau CD sera représenté par le trait pointillé en *ab'cd'ef'g*; l'examen de ces deux courbes montre bien que lorsque le courant dans AB est dirigé vers le haut, celui de l'anneau est dirigé vers le bas, et inversement.

On peut aussi appliquer ces deux courbes à la représentation du phénomène de la self-induction dans une bobine. Quand le courant envoyé par la

1. Voir *l'Électricité sans algèbre*, p. 187-188.

source tend à augmenter (courbe en trait plein), il s'en produit un autre exactement de sens inverse contre-balancant le premier (courbe en pointillé). C'est ce qui fait qu'une bobine formée de quelques spires enroulées sur un noyau de fer qui laisserait passer un courant continu excessivement intense est à peine traversée par un courant alternatif appréciable, grâce à la présence d'un courant de sens inverse qui s'oppose constamment au passage du premier.

Tension et intensité des courants alternatifs.

— La mesure des courants alternatifs peut se faire très facilement à l'aide de voltmètres ou d'ampèremètres à fil chaud étalonnés avec du courant continu. On conçoit très bien que si un voltmètre thermique accuse 110 volts avec du courant alternatif, cela veut dire que le courant auquel on le soumet produit le même effet qu'un courant continu à la tension de 110 volts. Cependant, nous venons de voir que la valeur d'un courant alternatif oscillait constamment entre un maximum positif et un minimum négatif en passant par zéro; dans ces conditions, que doit-on prendre, seraient-ce les écarts maxima qu'atteint ce courant?

Non, car si nous faisons tracer la courbe du courant alternatif à ces appareils très ingénieux que l'on appelle l'ondographe Hospitalier ou l'oscillograph de Blondel, on verra que pour un courant donnant sur le voltmètre thermique une tension de 110 volts, les valeurs maxima et minima sont respectivement de + 155 volts et — 155 volts.

On est convenu de désigner sous le nom de *tension efficace* ou *intensité efficace* les chiffres lus sur un voltmètre thermique ou un ampèremètre ther-

mique; ce sont ceux qui intéressent, en effet, l'industriel, c'est cette valeur qui intervient dans l'échauffement des fils, câbles et pour l'alimentation des lampes à incandescence. On peut dire que l'intensité efficace d'un courant alternatif correspond à la valeur de l'intensité d'un courant continu produisant dans un fil donné le même échauffement.

L'intensité *maxima* est toujours plus grande d'une certaine valeur que l'intensité *efficace*, car il faut compenser le manque d'effet thermique quand le courant diminue et passe par zéro. On admet que l'intensité maxima est 1,41 fois plus grande que l'intensité efficace, ou bien encore que l'intensité efficace vaut environ les deux tiers ou plus exactement les 0,7 de l'intensité maxima.

Il en est naturellement de même pour la tension; c'est pour cela que la tension maxima que l'on relève sur la courbe d'un courant alternatif d'une tension efficace de 110 volts est de 155 volts

$$110 \times 1,41 = 155 \text{ volts.}$$

C'est pour cette raison qu'une commutatrice¹ recevant du courant alternatif à la tension efficace de 110 volts fournira sur son collecteur du courant continu à 155 volts. La tension maximum convenablement utilisée par les bobines de la machine se maintient à la valeur de 155 volts du côté continu. Cette tension ne subit pratiquement plus de fluctuations ou, s'il y en a, elles sont très atténuées, d'autant plus que l'induit de la commutatrice comporte plus de bobines.

1. Machine transformant les courants alternatifs en courant continu. Voir les *Installations électriques*, par A. SOULIER, p. 244. Garnier frères, éditeurs.

CHAPITRE II

MOTEURS SYNCHRONES A COURANT ALTERNATIF

Nous avons vu avec quelle facilité on pouvait réaliser des moteurs électriques à courant continu, grâce à la réversibilité que possède la machine dynamo-électrique.

On peut se demander, par suite, s'il n'en serait pas de même avec les courants alternatifs et si on ne pourrait pas faire tourner un alternateur comme moteur en le reliant à un réseau à courant alternatif.

Reprendons notre alternateur d'expérience (fig. 42) et relions-le à une machine identique, une autre magnéto, par exemple. Si nous faisons tourner la première machine, elle va envoyer dans la deuxième des courants alternatifs, mais, chose curieuse, cette dernière ne tournera pas et se contentera de vibrer, surtout si la magnéto-génératrice tourne rapidement. Ce fait s'explique facilement :

Supposons un instant que les induits des deux machines occupent des positions analogues à celles de la figure 43 ; à ce moment, l'alternateur envoie un courant d'un certain sens dans le moteur, l'induit de ce dernier va s'aimanter comme un électro-aimant, ses

pôles réagiront sur ceux de l'aimant inducteur; il tendra à tourner. Mais notre machine génératrice étant actionnée à une vive allure aura tôt fait de quitter la position indiquée; son induit enverra bientôt après un courant de sens inverse du premier, et si notre ma-

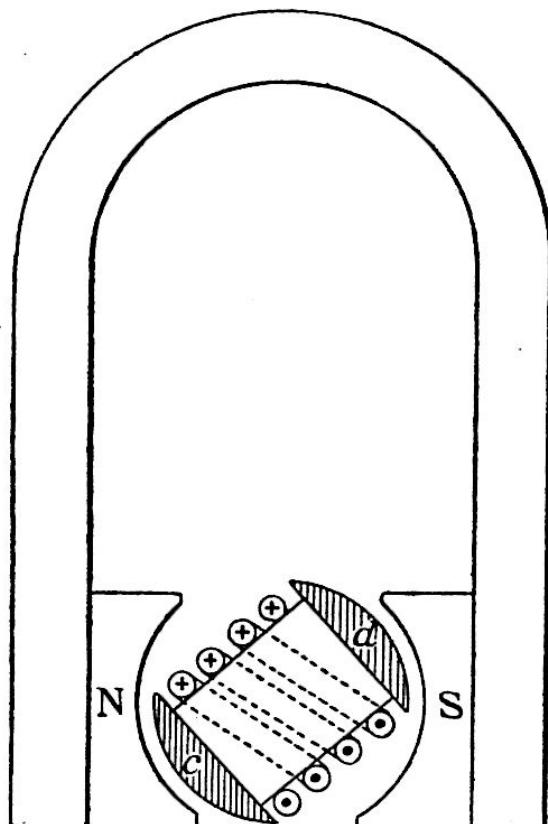


FIG. 42. — Machine à courant alternatif.

chine réceptrice *n'a pas eu le temps de suivre* le mouvement, le courant qu'elle recevra étant de sens inverse détruira l'effet du premier. Il en résulte que la magnéto réceptrice vibrera simplement au lieu de tourner sous l'action de ces courants alternatifs se succédant rapidement.

Si, au contraire, nous aidons l'induit en l'entraînant par une courroie à une vitesse voisine de celle de l'alternateur, il sera lancé, et si les vitesses sont les

mêmes il pourra occuper des positions qui seront constamment les mêmes que celles de l'induit de l'alternateur, et *dans ce cas seulement* les courants qu'il recevra arriveront juste au moment opportun pour produire des attractions capables d'entretenir la rotation. Nous pourrons supprimer l'entraînement, le moteur restera *accroché*, comme on dit, et continuera à tourner.

Ces moteurs, dont la vitesse est intimement liée à

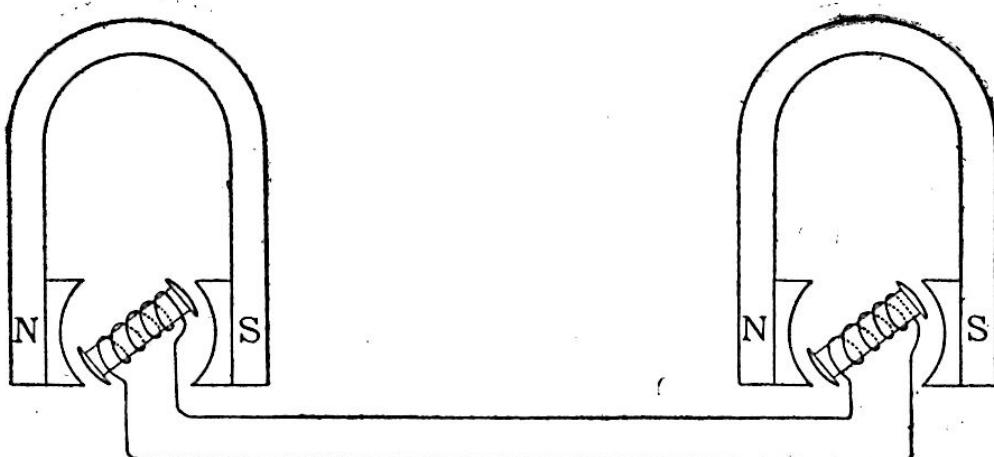


FIG. 43. — Transmission d'énergie par courant alternatif au moyen de machines synchrones.

celle de l'alternateur générateur, sont appelés *moteurs synchrones*.

Cette qualité que possède le moteur synchrone d'avoir sa vitesse intimement liée à celle de l'alternateur générateur constitue aussi un de ses plus grands défauts. Qu'un à-coup survienne qui retarde même légèrement le moteur, et il se décrochera. Il suffit que les pôles de son induit ne passent plus en regard des pôles inducteurs au même instant que cela se produit dans l'alternateur-générateur pour qu'il y ait *décrochage*. Étant ainsi en retard, il reçoit un cou-

rant de sens inverse de celui qu'il demande et il s'arrête rapidement, tout en absorbant de l'énergie.

Ainsi donc, nous voyons que, à l'inverse de ce qui se passe avec les moteurs à courant continu, il faut lancer le moteur synchrone exactement à sa vitesse de régime, car il ne peut y arriver par ses propres moyens ; ensuite il ne faut pas trop le surcharger, car il se décroche et s'arrête¹.

Les inconvénients de ces moteurs, reconnus depuis longtemps, ont fait que l'on a donné la préférence au courant continu dans les premières installations industrielles. Puis, quand on découvrit les moteurs asynchrones à courants triphasés et diphasés dont nous nous occuperons longuement par la suite, on reconnut les avantages des distributions à courants alternatifs, et c'est avec elles que l'on réalisa les plus importants réseaux de transmission et de distribution d'énergie électrique.

Le moteur synchrone a cependant reçu quelques applications intéressantes que nous citerons, parce qu'elles mettent en évidence ses qualités, en premier lieu pour l'éclairage de la gare du Quai d'Orsay, à Paris, au moment où cette dernière fut construite.

Cette gare, tête de ligne de l'ancien Chemin de fer d'Orléans, avait au début son éclairage alimenté par le courant continu à 600 volts servant à la traction des trains à l'intérieur de Paris. Les démarrages

1. Les moteurs synchrones industriels ne comportent pas des aimants comme celui de l'expérience précédente, on emploie des électro-aimants excités par une source séparée de courant continu (dynamo, accumulateur), etc.. Cela permet de faire varier l'excitation et d'augmenter au besoin la stabilité de marche (voir p. 97).

fréquents des locomotives produisaient sur la lumière de tels à-coups que l'éclairage était rendu ainsi très désagréable. Les ingénieurs qui avaient fait l'installation surmontèrent la difficulté qui se présentait et résolurent le problème d'une façon élégante en réalisant un éclairage d'une fixité merveilleuse de la façon suivante :

On installa des moteurs *synchrones* d'une puissance correspondant à l'éclairage maximum de la gare, et on alimenta ces moteurs par les courants *alternatifs* triphasés de l'usine génératrice pour la traction. Les moteurs synchrones actionnaient à leur tour des dynamos, il est facile de voir que, dans ces conditions, l'éclairage devait être excellent. Les moteurs synchrones tournaient, c'est là leur rôle, à une vitesse intimement liée à celle des alternateurs de l'usine génératrice.

Or, ces dernières machines étaient commandées par des moteurs à vapeur pourvus d'excellents régulateurs qui leur assuraient une allure absolument constante. Il en résultait que la dynamo qu'entraînait le moteur synchrone tournait aussi à une vitesse très régulière, et les lampes qu'elle alimentait étaient aussi fixes que si elles avaient été branchées sur une batterie d'accumulateurs.

Le démarrage des locomotives, quoique provoquant de fortes chutes *de tension*, était sans effet sur le moteur synchrone qui tournait toujours à vitesse constante, quelles que pouvaient être les variations de tension du courant qui l'alimentait, l'excitation de ces moteurs étant fournie par une source séparée de courant continu indépendante, elle aussi, des variations de tension du réseau général.

Ceci nous amène à parler de l'effet de l'excitation sur les moteurs synchrones.

Influence de l'excitation. — Un moteur synchrone étant accroché sur un réseau à courant alternatif, que se passe-t-il si on fait varier son excitation ?

Supposons un instant que nous nous trouvions dans le cas de courant continu alimentant un moteur en dérivation, nous savons qu'en introduisant une résistance dans le circuit d'excitation, on diminue le champ magnétique, et la vitesse augmente (Voir page 18). Inversement, en augmentant l'intensité du courant d'excitation on diminue la vitesse. Ce fait tient à ce que la force contre-électromotrice développée par le moteur dépend du champ magnétique et de la vitesse, et comme cette force contre-électromotrice doit rester sensiblement égale à celle du réseau, toute variation du champ entraîne une variation correspondante de vitesse.

Avec le moteur synchrone dont la vitesse est intimement liée à la fréquence des alternateurs du réseau, comme le sont deux roues dentées aux prises par leurs dents, on aura beau agir sur l'excitation, *la vitesse restera invariable*.

En revanche, le courant absorbé par le moteur synchrone variera, car, de même que dans le moteur à courant continu la force contre-électromotrice doit constamment rester égale à celle du réseau. Il en résulte que si on diminue l'excitation, par exemple, la force contre-électromotrice aura une tendance à diminuer, mais aussitôt le moteur absorbera un courant supplémentaire qui ne servira qu'à rétablir la force contre-électromotrice à sa valeur.

Ce courant qui, en somme, remplace le courant d'excitation trop faible est dit *magnétisant*; il est, dans ce cas, en retard ou *décalé en arrière* sur la force électro-motrice.

Augmentons le courant d'excitation, nous voyons peu à peu le courant absorbé par le moteur synchrone diminuer, sa vitesse restant toujours constante; cela tient à ce que, l'excitation augmentant, le moteur n'a plus besoin de puiser sur la ligne le courant magnétisant qui lui manquait auparavant.

Continuons à faire croître le courant d'excitation, et qu'elle n'est pas notre surprise de voir le courant absorbé par le moteur, qui diminuait jusqu'à présent, augmenter peu à peu comme lorsque l'excitation s'affaiblissait. Que se passe-t-il? Tout simplement le phénomène inverse, le moteur trop riche en excitation fournit du courant à la ligne, ce courant supplémentaire est *décalé en avant*, c'est-à-dire qu'il est en avance sur la force électromotrice, tandis que tout à l'heure il était en retard.

En somme, si l'on réfléchit un peu, ce fait, quelque bizarre qu'il puisse paraître, s'explique assez bien physiquement. Lorsque l'excitation est insuffisante, l'attraction des pièces polaires est faible, l'induit reste *en retard* et absorbe des courants d'autant plus intenses qu'il est davantage resté en arrière.

Augmentons l'excitation; l'attraction croît et peu à peu l'induit se remet en place. Quand il y a exactement concordance entre la courbe de force contre-électromotrice de l'induit et celle de la ligne, le moteur吸orbe le minimum de courant. C'est ce que les techniciens expriment en disant qu'il fonctionne au bas de la courbe en V de Mordey.

Augmentons encore l'excitation; cette fois, l'induit est en avance, et au lieu d'absorber des courants magnétisants il va en fournir au réseau.

Cette propriété curieuse des moteurs synchrones a été ingénieusement mise à profit sur certains réseaux pour améliorer le facteur de puissance. Nous verrons plus loin que les moteurs à cage d'écureuil dits «*asynchrones*», ne pouvant s'exciter eux-mêmes, puisent sur le réseau les courants magnétisants qui leur sont nécessaires. Ces courants ne produisant pas de puissance sur l'arbre ne marquent pas au compteur, mais ils n'en échauffent pas moins la ligne et les transformateurs.

Disposons de place en place des moteurs *synchrones surexcités*, et les courants en *avance* qu'ils produiront compenseront ceux en *retard* qu'absorbent les moteurs asynchrones, en sorte que le réseau fournira simplement les courants qui l'intéressent, ceux qui produisent de la puissance, appelés improprement *courants wattés*, en réalité *courants actifs*. Malheureusement, il est parfois difficile de multiplier autant qu'on le voudrait les moteurs synchrones, qui cependant jouissent de précieuses qualités.

CHAPITRE III

MOTEURS ASYNCHRONES OU A CHAMP TOURNANT

Principe. — Considérons un cadre formé d'un fil de cuivre ab , entourant une aiguille aimantée NS librement suspendue. On sait que si l'on fait passer

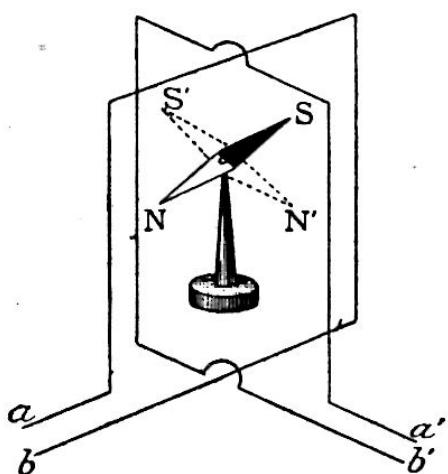


FIG. 44.

un courant continu dans le fil ab , l'aiguille aimantée dévierait et tendrait à se mettre *en croix* avec le fil. Tandis qu'elle est ainsi déviée par le courant traversant le fil ab , disposons un deuxième cadre $a'b'$ que nous placerons perpendiculairement au premier, et envoyons un courant continu dans ce nouveau fil $a'b'$ tandis que nous le supprime-

rons en ab . L'aiguille qui était *en croix* avec ab , et par conséquent parallèle à $a'b'$, va tendre à se mettre *en croix* avec $a'b'$ cette fois et tournera encore d'un quart de tour. Rétablirons le courant en ab en changeant le sens; puis en $a'b'$, nous voyons qu'il nous sera possible de faire tourner

l'aiguille autour de son support, chassée qu'elle sera par les courants successifs que nous envoyons dans les cadres.

Nous avons réalisé ainsi un *champ magnétique tournant*, et l'aiguille dans lequel elle se meut nous indique la vitesse de rotation de ce champ.

Ainsi donc, on entrevoit la possibilité de construire un moteur sans collecteur ni balais, rien qu'en faisant tourner un champ magnétique. Comment allons-nous procéder pratiquement pour réaliser ce champ tournant ? Telle est la première question qui se pose ; la réponse se trouvera vite dans l'emploi de courants diphasés ou triphasés, dont l'application aux moteurs est la seule raison d'être.

Supposons que dans le cadre *ab* on puisse envoyer les courants alternatifs d'un premier alternateur, puis dans le cadre *a'b'* les courants également alternatifs d'un deuxième alternateur, identique au premier. Admettons que ces courants soient décalés d'un quart de période, c'est-à-dire qu'au moment où le courant du premier alternateur atteint son maximum dans la bobine *ab*, celui du deuxième alternateur est nul dans *a'b'*, il s'ensuivra que le courant décroîtra dans *ab* par exemple, tandis qu'il augmentera dans *a'b'*, passera au maximum dans *a'b'* tandis qu'il sera nul en *ab*, et ainsi de suite.

Nous aurons réalisé, en somme, l'expérience précédente et l'aiguille aimantée tournera.

La production des courants diphasés, car ce sont bien des courants de cette nature que l'on emploie ici, s'obtient en prenant un alternateur ordinaire entre les bobines induites duquel on *intercale* un deuxième

enroulement identique¹. Il est facile de comprendre alors que chaque pôle inducteur passant d'abord devant le premier enroulement induit donnera naissance à un premier courant alternatif, puis le même pôle en passant devant le deuxième enroulement fera naître un nouveau courant alternatif, et ainsi de suite, ces courants étant *décalés*, c'est-à-dire ne se produisant pas en même temps. C'est là toute la science

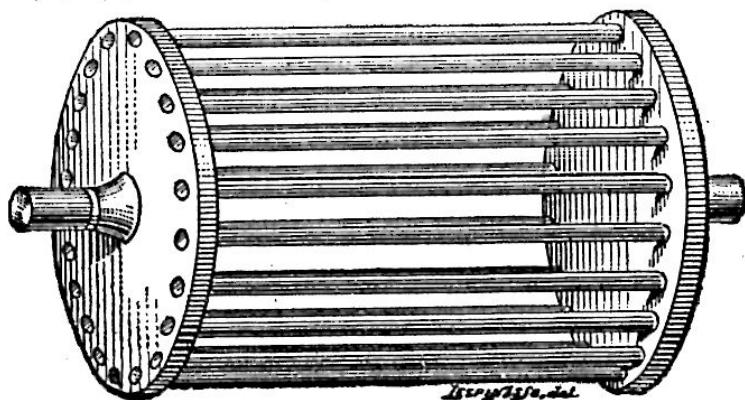


FIG. 45. — Cage d'écureuil.

des champs tournants; elle se réduit au fond, comme on le voit, à quelque chose d'assez simple.

Mais on ne peut pas se contenter d'une simple aiguille aimantée pour utiliser ce champ tournant; en pratique, on la remplace par une *cage d'écureuil*.

Comme son nom l'indique, l'induit de ces moteurs, appelé *rotor* parce qu'il tourne, se compose d'une sorte de cage cylindrique à barreaux de cuivre, ces barreaux étant soudés à leur extrémité à deux plateaux circulaires qui donnent à l'ensemble l'aspect d'une vraie cage (fig. 45).

1. Voir *l'Électricité sans algèbre*, par A. SOULIER, p. 252. Garnier frères, éditeurs.

Si on place un système de ce genre R dans un champ tournant créé par deux bobines ab , $a'b'$, il va tourner (fig. 46).

En effet, cet appareil peut être assimilé au bobinage secondaire d'un transformateur fermé en court-circuit dont le primaire serait constitué par les bobines ab , $a'b'$; il va s'y développer par induction des courants. Or, en vertu de la loi de Lenz, *l'action des courants induits développés dans un circuit est telle qu'elle tend à s'opposer à la variation du flux magnétique qui lui a donné naissance.*

Ces courants tendront à s'opposer au déplacement du champ tournant, et ne pouvant l'empêcher de tourner ils tourneront avec lui en entraînant l'induit.

Il se produit quelque chose de comparable à ce qui se passerait si l'on voulait arrêter une voiture ou un tramway; on serait forcément entraîné dans le sens du mouvement de ces véhicules, c'est ce qui se passe pour l'induit, sans que cependant cet induit puisse arriver à rattraper le champ tournant, il « glisse » (c'est l'expression consacrée) derrière le champ tournant et tourne à vide à une vitesse légèrement plus faible. Si on charge le moteur l'induit tourne un peu moins vite, et comme le champ tournant, lui, se maintient toujours à la même vitesse, liée à la fréquence des courants alternatifs, on dit que le *glissement* augmente. A ce moment il se produit un

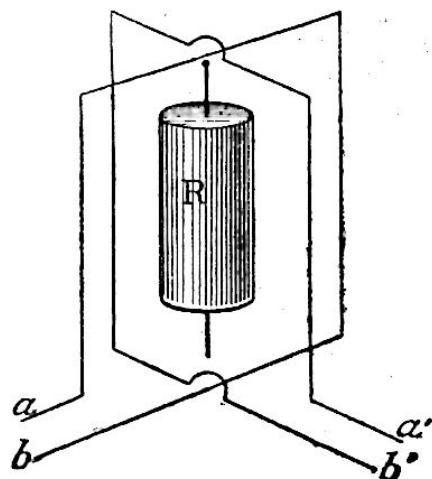


FIG. 46. — Moteur théorique constitué par deux cadres avec au centre un cylindre de cuivre.

appel de courant dans le stator qui renforce le champ tournant et augmente l'effort d'entraînement sur la cage d'écureuil et, par suite, le couple du moteur.

Réalisation pratique des moteurs à champ tournant. — Dans les moteurs à champ tournant, nous aurons à examiner deux parties bien caracté-

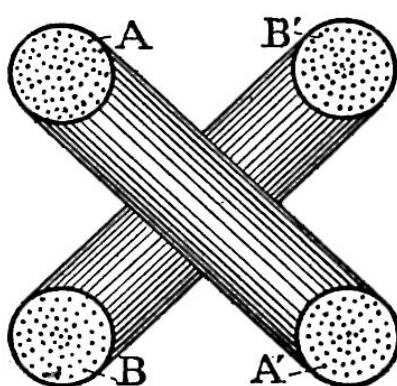
ristiques : *le stator*, ou enroulement immobile, représenté théoriquement par les bobines ab , $a'b'$, (fig. 44 et 46) et le *rotor* ou cage d'écureuil R. Le stator d'un moteur diphasé pourra être constitué par plusieurs cadres constituant deux bobines AA', BB' placées en croix comme les bobines de la figure 47, mais

FIG. 47. — Bobinages en croix.

que nous logerons dans une carcasse en fer doux pour faciliter le passage des lignes de force et pour avoir un champ magnétique tournant plus intense.

Au lieu de prendre un bloc de fer doux, nous prendrons, comme pour les induits à courant continu, des anneaux en tôle découpés séparés par du papier, et dans ces anneaux nous pratiquerons des trous AA' BB' (fig. 51) laissant passer nos deux bobines. Le *rotor* sera, lui aussi, constitué par des feuilles de tôle isolées et assemblées entre elles comme celles d'un induit de dynamo à courant continu (fig. 48).

Des trous pratiqués à la périphérie laisseront passer les barres de la cage d'écureuil, barres qui seront soudées ou, mieux, *brasées* à deux plateaux de cuivre formant les deux extrémités.



L'emploi du fer dans le stator et dans le rotor permet de mieux réunir les lignes de force du champ tournant, et en les concentrant dans l'induit autour des barres on obtient ainsi un excellent rendement.

Pour cette raison, l'entrefer ou jeu entre le stator et le rotor doit être *aussi petit que possible*, et en particulier dans ces moteurs on ne dépasse jamais *un millimètre*. C'est chose facile du reste, puisque le

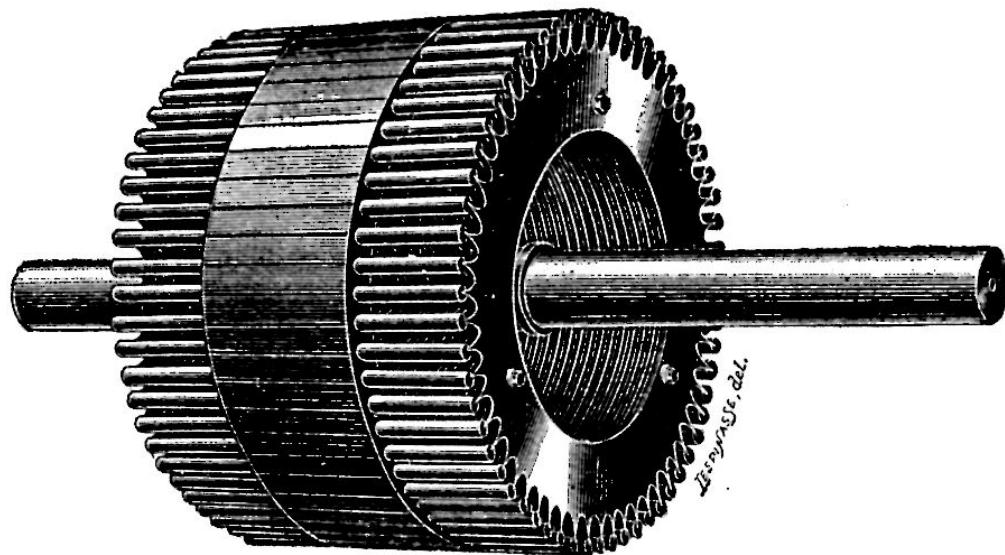


FIG. 48. — Cage d'écuréuil montée.

rotor et le stator peuvent être tournés et alésés comme un piston ou un cylindre de machine; il n'y a à cela aucun inconvenient, les fils des enroulements étant *noyés* dans la masse de fer (fig. 49).

On réalise ainsi des moteurs extrêmement simples, avec des enroulements qui peuvent être facilement isolés, puisqu'il n'y a ni collecteur ni balai, ce qui a permis à certains constructeurs d'établir des moteurs de ce genre fonctionnant au fond de l'eau (pour actionner des cloches sous-marines, par exemple, ou des pompes). L'entretien se borne à assurer le graissage.

sage de deux paliers, et c'est tout. On comprend, maintenant, facilement pourquoi on rencontre par-

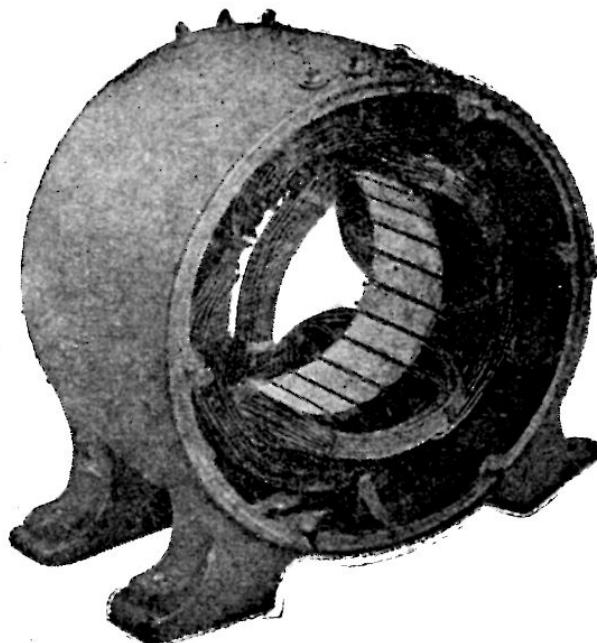


FIG. 49. — Inducteur ou stator d'un moteur asynchrone.

tout des courants triphasés ou diphasés dont la vogue ne tient qu'à l'extrême simplicité des moteurs



FIG. 50. — Induit ou rotor en cage d'écurieul se logeant dans le stator ci-dessus.

qu'ils permettent d'actionner; ces machines peuvent être abandonnées presque sans surveillance, ce qu'on ne pourrait faire avec aucun autre moteur; aussi leur nombre s'étend-il tous les jours davantage.

CHAPITRE IV

MOTEURS ASYNCHRONES DIPHASÉS

Reprendons nos deux cadres aa' et bb' (fig. 47), faisons-les passer dans les trous diamétralement opposés d'un anneau de fer doux (fig. 51), nous aurons réalisé un moteur diphasé.

Pour nous rendre compte comment un champ tournant peut s'établir à l'intérieur de l'anneau de fer doux, envoyons dans le cadre AA' du courant continu et supposons que son sens soit tel qu'il s'établisse en A un pôle sud et en A' un pôle nord, nous aurons une répartition des lignes de force telle que celle indiquée (fig. 52) [gauche]. Supprimons ensuite le courant en AA' , et établissons-le en BB' , le sens pourra être tel, par exemple, que B soit un pôle sud et B' un pôle nord (fig. 52) [droite]. Puis rétablissons le courant en AA'

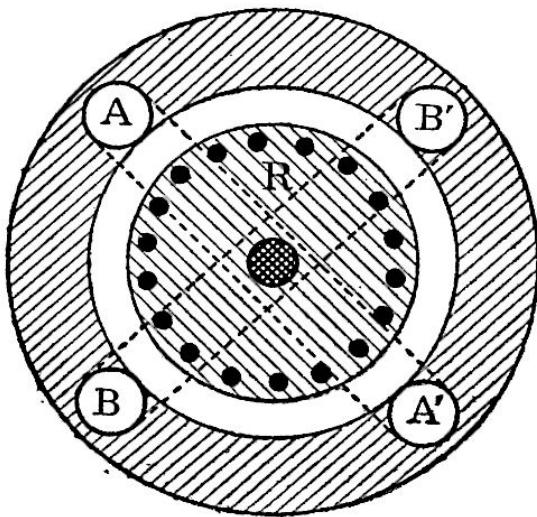


FIG. 51. — Coupe d'un moteur diphasé à deux enroulements AA' et BB' .

mais en l'inversant, cette fois nous aurons un pôle *sud* en A' et un pôle *nord* en A; faisons cesser le courant dans AA' et établissons-le en l'inversant dans BB', cette fois B' sera un pôle *sud* et B un pôle *nord*, et ainsi de suite.

Il est facile de voir que, grâce à cette façon de procéder, le pôle sud qui était en A est passé en B, puis en A', enfin en B' et revient en A pour continuer à

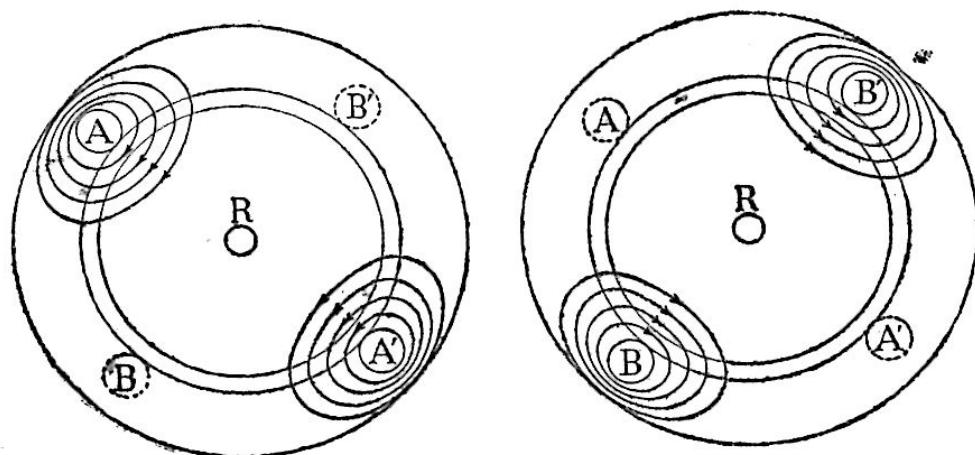


FIG. 52. — Succession des pôles dans un moteur diphasé.

tourner toujours dans le même sens; on comprend très bien qu'une aiguille aimantée se mette ainsi à tourner et, mieux encore que la cage d'écureuil placée dans l'anneau, soit entraînée avec le champ tournant par suite de la réaction sur le champ des courants induits dont elle est le siège.

Le seul inconvénient que présenterait un moteur de ce genre serait la distribution du courant dans les différentes bobines et son inversion au moment voulu, mais les courants alternatifs nous donnent une excellente solution en supprimant toute espèce de commutateur.

Envoyons dans AA' du courant alternatif; nous

aurons en A et A' tantôt un pôle sud et tantôt un pôle nord ; si, pendant que ce courant alternatif circule dans le circuit AA', nous en faisons passer un autre courant alternatif identique dans BB', mais qui atteint son maximum exactement au moment où celui de AA' passe par zéro, nous aurons réalisé l'expérience précédente. Ces courants sont appelés *diphasés*; ils s'obtiennent, avons-nous dit, très facilement à l'aide

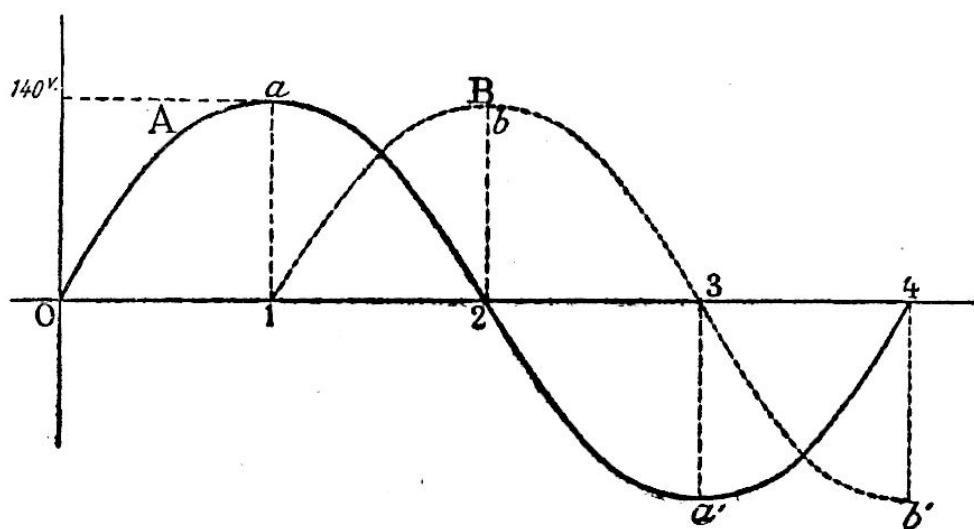


FIG. 53. — Forme des courants diphasés.

d'un alternateur qui diffère des alternateurs ordinaires en ce qu'un bobinage supplémentaire est intercalé entre l'enroulement ordinaire de façon à réaliser deux circuits AA' et BB'.

La forme des courbes des courants diphasés est clairement indiquée figure 53. Prenons le courant A au moment où il part de zéro; son intensité augmente d'abord pour atteindre son maximum en *a*. A partir de ce moment, le courant A décroît, tandis que le courant B commence à s'établir, il augmente jusqu'à son maximum *b*; à ce moment A passe par zéro en 2, puis B décroît, passe par zéro en 3 tandis que A s'est

inversé, et passe à son maximum négatif en a' pour décroître ensuite, etc.

Tel qu'on le réaliserait en se conformant à la figure 51, le moteur diphasé fonctionnerait mal à cause de la faiblesse de son champ tournant. Pour renforcer ce dernier, on est conduit à multiplier le nombre de trous ou d'encoches contenant l'enroule-

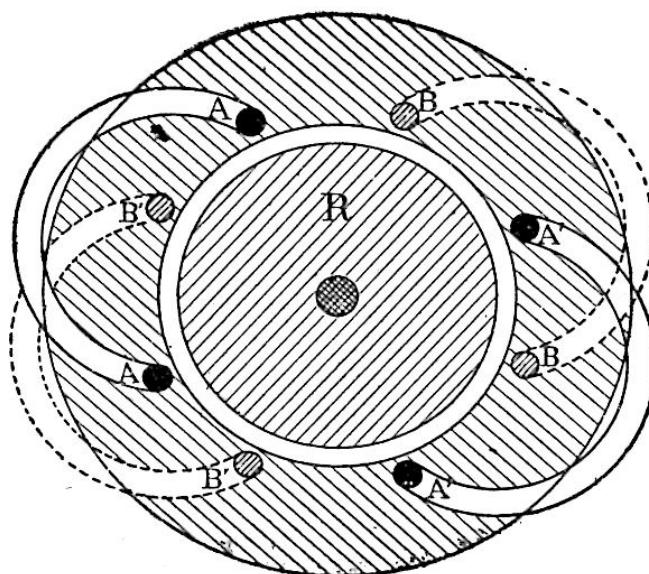


FIG. 54. — Bobinage diphasé à 4 pôles.

ment. On doublera d'abord ce nombre, ce qui permettra de réaliser des moteurs à quatre pôles. (Le moteur primitif n'est, en effet, qu'à deux pôles, chaque bobine AA' ou BB' ne pouvant fournir que deux pôles). Le moteur de la figure 54 est à quatre pôles, puisqu'il comporte deux bobines A, de même il contient deux bobines B qui donneront aussi naissance à quatre pôles¹.

1. Cela ne fait pas huit pôles en tout comme on serait tenté de le croire, car les pôles de A et ceux de B n'apparaissant jamais

Pour mieux loger les fils et mieux répartir le bobinage, on adoptera la disposition de la figure 55, dans laquelle les fils de chaque trou ou encoche sont divisés en deux moitiés A_1A_2 , A_2A_3 , A_3A_4 , et A_4A_1 . Il y a le même nombre de fils, mais ils suivent des chemins différents, ce qui permet de mieux les loger autour du stator, l'effet reste le même puisqu'il est dû unique-

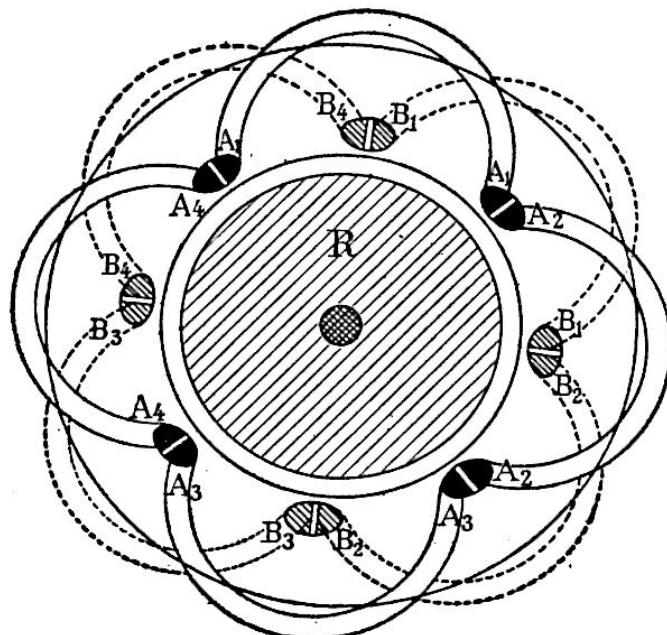


FIG. 55. — Répartition de l'enroulement avec deux bobines par encoche.

ment au courant circulant dans les fils des encoches. Dans la figure 54 on a deux bobines par phase, tandis que dans la figure 55 on a quatre bobines par phase.

Il y a mieux encore : comme les encoches avec une disposition de ce genre doivent être faites assez ouvertes et surtout assez profondes pour recevoir tous les fils, on préfère répartir les fils d'une même

en même temps, le moteur n'a donc jamais que quatre pôles, que ce soit l'enroulement A ou l'enroulement B qui les fournit.

encoche dans plusieurs trous voisins les uns des autres (fig. 56) qui permettront dès lors de disposer, aussi près

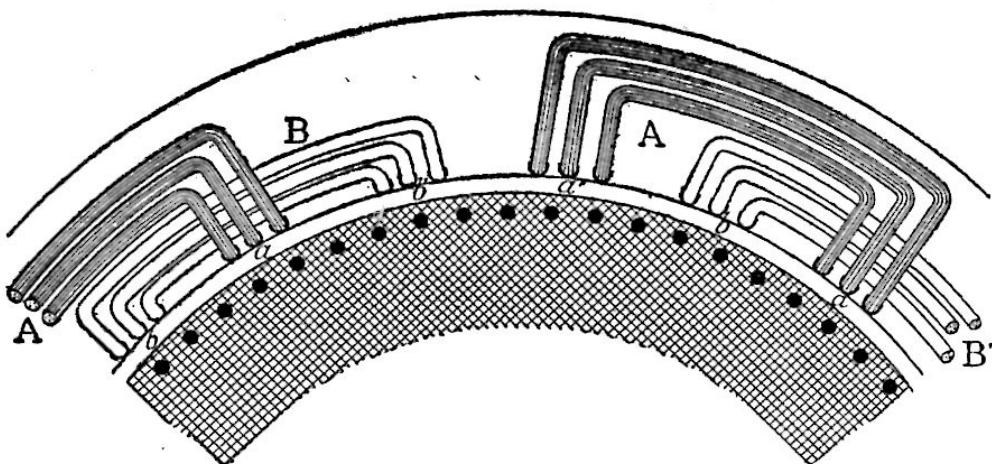


FIG. 56. — Montage des bobines d'un moteur diphasé. dans plusieurs encoches voisines.

que possible du bord, les divers fils et de les faire mieux participer à la création du champ tournant.

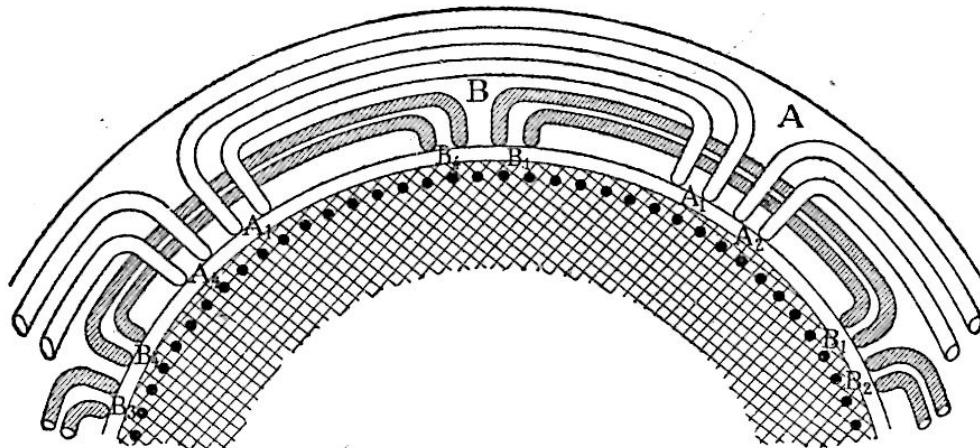


FIG. 57. — Répartition des bobines d'un moteur diphasé dans les encoches.

On arrive alors à la réalisation des bobinages de stator tout à fait modernes, dont la figure 58 donne une idée. Pour que l'on puisse mieux se rendre compte, nous avons représenté (fig. 56) le bobinage

diphasé de la figure 54, chaque phase étant répartie à raison de trois encoches par bobine, et figure 57 un autre bobinage diphasé se rattachant à celui de la figure 55, dans lequel l'enroulement d'une bobine est réparti dans deux encoches.

Dans la figure 58, nous avons séparé à dessein les groupes d'encoches A_1A_2 , etc., des groupes B_1B_2 , etc., afin que le lecteur puisse les rattacher plus facile-

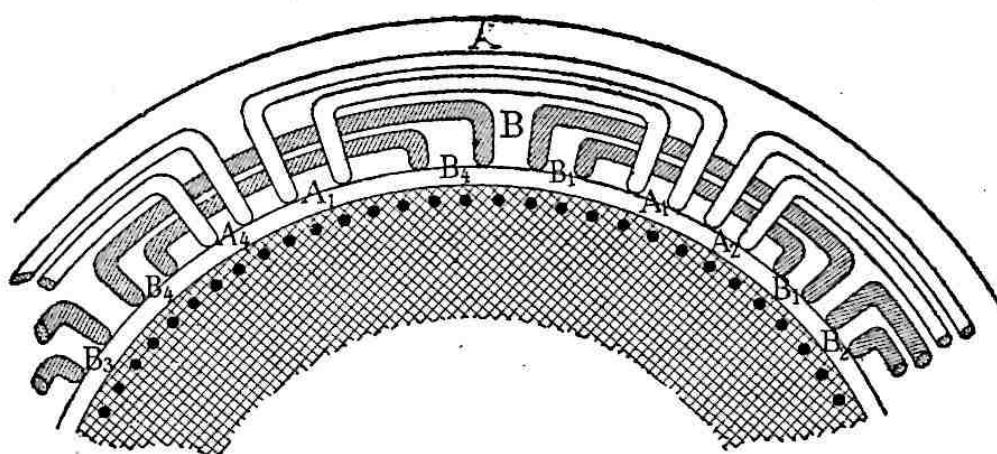


FIG. 58. — Disposition du bobinage d'un moteur diphasé.

ment au schéma de la figure 55; mais, en réalité, pour mieux utiliser le stator, on rapproche les encoches et on obtient un stator de la forme de celui de la figure 60 qui représente un enroulement diphasé moderne de moteur asynchrone.

Construction des bobines. — On pourrait, comme pour les dynamos à courant continu, préparer d'avance sur gabarit les différentes bobines et n'avoir plus qu'à les glisser dans leurs encoches respectives au moment du montage; mais, pour certaines raisons, et en particulier pour obtenir un meilleur rendement, on est obligé d'employer des encoches presque *fer-*

mées. On est donc conduit, surtout pour les petits moteurs, à faire sur place le bobinage du stator en passant les fils dans les encoches.

Avant de commencer le bobinage, on tapisse la partie intérieure de feuilles de micanite qui assureront à l'enroulement un excellent isolement. On peut ensuite, soit passer les fils en les glissant par le fente

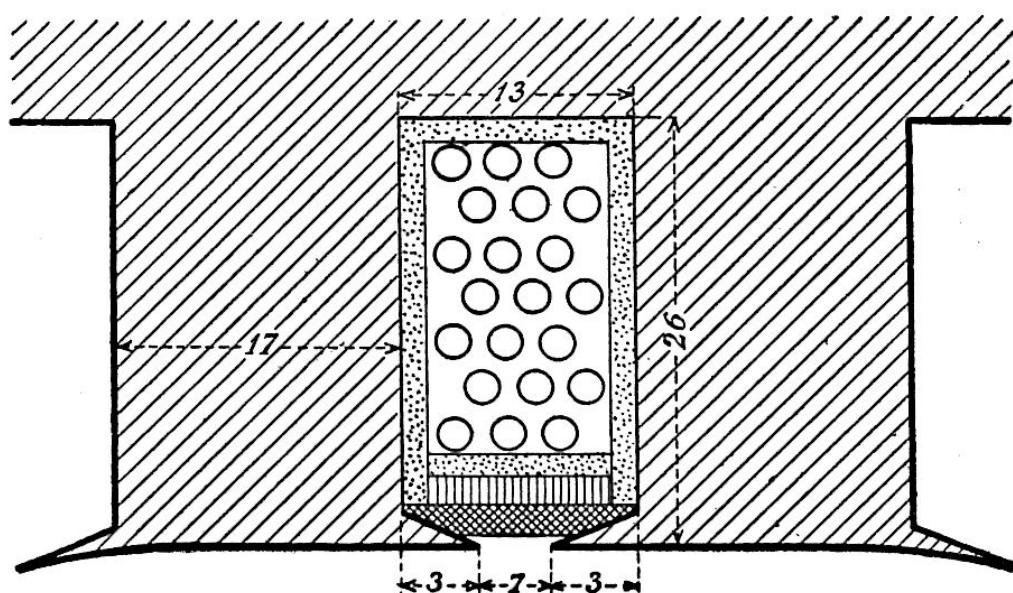


FIG. 59. — Coupe d'une encoche.

et en les tassant dans l'encoche, soit remplir l'encoche, d'avance, d'aiguilles d'acier d'un diamètre égal à celui du fil et tirer les fils en commençant par enlever une aiguille d'acier et en la remplaçant par le fil de cuivre isolé.

Cette façon de procéder qui, s'emploie avec des induits à trous, permet de loger exactement autant de fils que l'on a mis de baguettes d'acier, à condition de retirer ces baguettes les unes après les autres en les remplaçant chaque fois par un fil de cuivre isolé.

Pour maintenir l'enroulement, on glisse une feuille

de micanite pour boucher l'ouverture de la rainure et on introduit de force une cale en bois qui, s'appuyant sur les becs de l'encoche, assure l'immobilité complète du bobinage à l'intérieur (fig. 59).

Les fils circulant à l'extérieur d'une encoche à l'autre sont réunis en paquets et ligaturés par de la

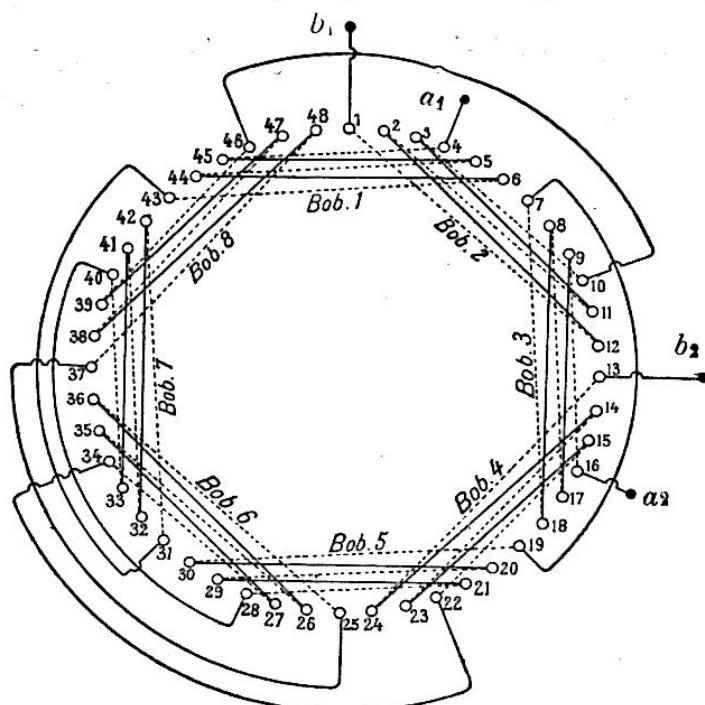


FIG. 60. — Schéma simplifié d'un enroulement diphasé à deux circuits et quatre bornes.

ficelle; on les enduit de plusieurs couches de vernis, et si l'enroulement doit résister à de hautes tensions on a soin de séparer bien nettement les divers paquets, de façon à ce qu'ils ne puissent pas être mis hors de service par une étincelle qui pourrait jaillir entre deux bobines voisines.

Le plus souvent, les divers paquets de fils sont entourés de toile ou de micanite qui en assurent l'isolation parfait.

Le courant passe d'une bobine à la suivante à

l'aide de fils de liaison non représentés sur la figure, mais qu'il est facile d'établir en vue de réaliser les deux circuits bien distincts de la figure 54, recevant chacun une des phases du courant diphasé.

La figure 60 correspond au schéma de bobinage d'un stator de moteur diphasé formé de deux enroule-

1^o Montage en série
(220^V)

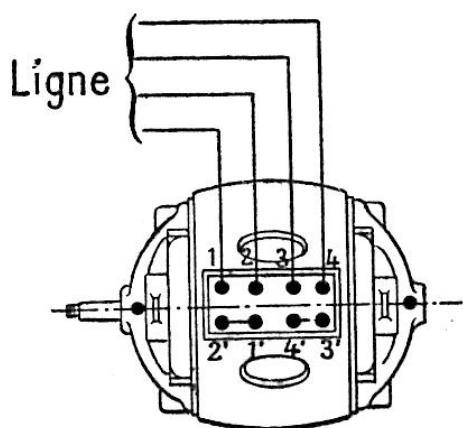


FIG. 61.

2^o Montage en parallèle
(110^V)

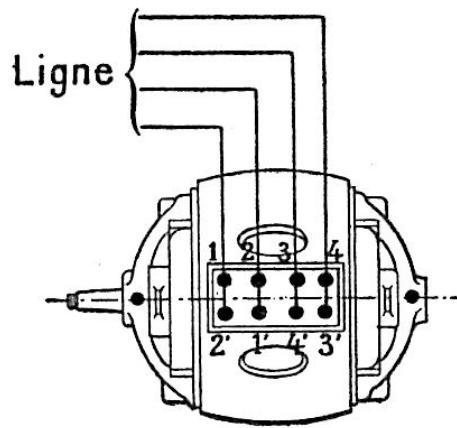


FIG. 62.

Couplages des enroulements d'un moteur diphasé suivant les tensions appliquées.

ments distincts, l'un correspondant à une phase se termine aux points a_1 et a_2 ; l'autre, celui de la deuxième phase, aboutit aux points b_1 et b_2 . Mais chacun de ces deux enroulements peut lui-même être formé de deux parties que l'on peut coupler en *série* ou en *parallèle*, suivant la tension appliquée. C'est ainsi que l'enroulement a_1a_2 qui correspond à une phase peut être divisé en deux moitiés : 1, 1' et 2, 2' que l'on couplera en *série* (fig. 61) pour marcher sur 220 volts par exemple ou en *parallèle* (fig. 62) pour

marcher sur 110 volts. Naturellement, l'autre enroulement, celui de la deuxième phase, sera aussi divisé en deux moitiés 3, 3' et 4, 4' que l'on montera en série ou en parallèle en même temps que l'on fera cette opération pour 1, 1' et 2, 2'. Les figures ci-dessus se rapportant au bobinage de la figure 60 montrent clairement comment on peut réaliser ces couplages sur la boîte à bornes même du moteur.

CHAPITRE V

MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASÉS

Principe. — Tout ce que nous venons de voir s'applique aux moteurs triphasés, qui ne diffèrent des moteurs diphasés qu'en ce qu'il y a trois circuits au lieu de deux.

Considérons (fig. 63) un générateur de courants

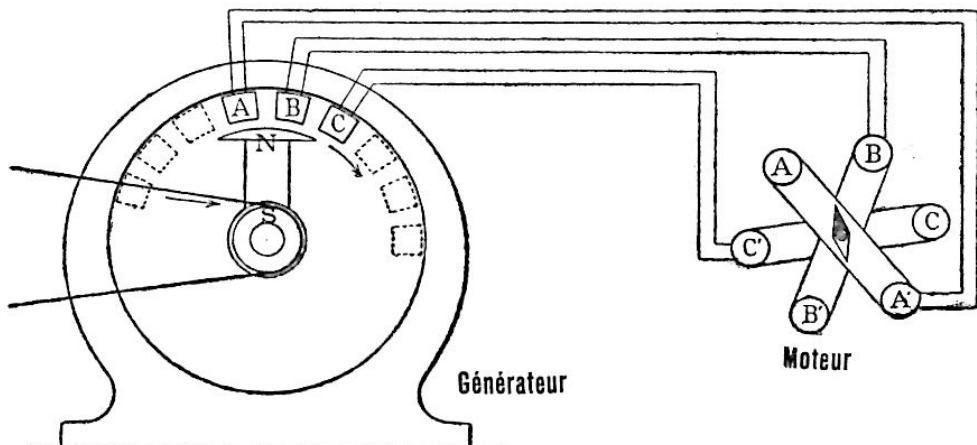


FIG. 63. — Fonctionnement d'un moteur triphasé.

triphasés constitué par une carcasse métallique portant trois bobines ou trois groupes de bobines A, B, C. Un aimant NS, placé au centre et entraîné par une poulie que met en marche une turbine ou un moteur à vapeur, vient passer successivement devant les pôles A, B, C.

Les lois de l'induction montrent que l'aimant ainsi entraîné fait naître dans chaque circuit un courant d'un certain sens quand l'aimant s'approche du circuit, et de sens inverse quand il s'en éloigne.

Nos trois bobines seront donc le siège de trois courants qui ne se produiront pas en même temps, mais *successivement*.

Envoyons chacun de ces courants dans un cadre ou une bobine et disposons les trois cadres correspondant aux trois bobines A, B, C, comme le représente la figure 63, en plaçant en leur centre une aiguille aimantée.

Ainsi qu'il est facile de le voir, le courant prenant naissance d'abord dans le circuit A, l'aiguille aimantée tendra à se mettre en croix avec AA', puis un autre courant commencera à passer dans BB', ce qui continuera à chasser l'aiguille ; ce sera enfin au tour de la bobine CC', et à ce moment le premier courant commençant à s'inverser dans A', chassera encore l'aiguille toujours dans le même sens ; elle sera encore reprise par B', puis par C', et ainsi de suite. L'aiguille tournera constamment, montrant clairement la présence d'un champ tournant à l'intérieur des cadres AA' BB' CC'. Ce champ n'est, en somme, que l'image du champ tournant créé par l'aimant tournant autour des bobines de l'alternateur.

Ne nous occpons pas du générateur¹ et perfectionnons notre moteur. Il est, en somme, identique au moteur diphasé (fig. 44), sauf que nous avons trois cadres au lieu de deux.

1. Voir le *Manuel de l'Electricien*, traité pratique des machines dynamo-électriques, p. 226.

Nous disposerons dans des trous pratiqués sur le bord intérieur d'un anneau en fer doux une série de bobines correspondant aux trois circuits A, B, C,

Un moteur réalisé en s'inspirant de la figure 64 serait à deux pôles, chaque cadre déterminant deux pôles, cela ne fait pas six en tout, comme on serait tenté de le croire, car il n'apparaît jamais que deux pôles à la fois.

En pratique, on prendra deux cadres par circuit, de façon à réaliser des moteurs à quatre pôles et plusieurs cadres si on désire avoir encore plus de pôles.

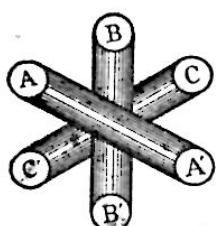


FIG. 64.
Trois bobines
d'un moteur
triphasé.

L'avantage des moteurs multipolaires tient à ce qu'ils permettent de réduire la vitesse, comme nous le verrons plus loin; c'est ainsi qu'un moteur à deux pôles seulement recevant du courant alternatif à la fréquence de 50 périodes par seconde tournera à 3 000 tours par minute, tandis qu'à quatre pôles et avec la même fréquence il ne tourne plus qu'à 1 500 tours par minute, ce qui est une vitesse très acceptable.

Nous avons représenté (fig. 65) le schéma du montage des circuits du stator d'un moteur triphasé à quatre pôles comparable à celui du moteur diphasé de la figure 54.

On distingue nettement les trois circuits formés par les trois cadres ABC, A'B'C', que l'on a rabattus sur les côtés pour rendre l'intérieur du stator accessible.

Le cadre A occupe les encoches 2 et 11, et son symétrique A' les encoches 5 et 8, chaque cadre déterminant deux pôles, cela fait bien quatre au

total, puisqu'ils appartiennent au même circuit; le cadre B occupe les encoches 1 et 4, et son symétrique B' les encoches 7 et 10, le cadre C vient en 3 et 6 et son symétrique C' en 9 et 12.

Si l'on suit la circonference à partir de l'encoche 3 en sens inverse des aiguilles d'une montre, on voit que l'on rencontre l'encoche 2 du circuit A, puis l'enco-

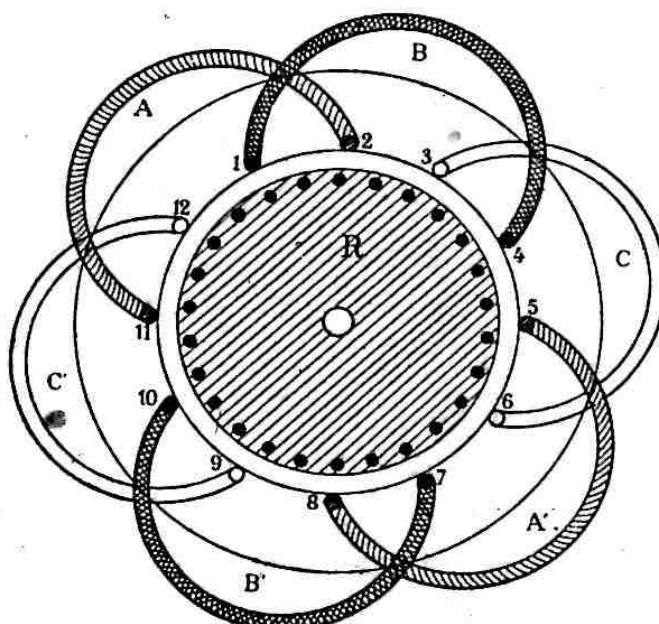


FIG. 65. — Enroulement triphasé à quatre pôles.

che 1 du circuit B et l'encoche 12 du circuit C' . On recommence ensuite à trouver l'encoche 11 de A, l'encoche 10 de B' et 9 de C' , et ainsi de suite. On comprend très bien dès lors que les courants successifs envoyés dans les circuits A, B, C vont pouvoir faire naître un champ tournant à l'intérieur du stator.

Si nous disposons au centre une aiguille aimantée ou, mieux, un rotor R formé d'une cage d'écureuil à barreaux de cuivre, nous savons que des courants induits sous l'action du champ tournant prendront

naissance dans les barres de cuivre de la cage d'écureuil, et ces courants qui tendent constamment à s'opposer au mouvement, ne pouvant empêcher le champ de tourner, tourneront avec lui. C'est en somme, ainsi que nous le disions plus haut, comme si une personne voulait arrêter un tramway lancé à toute vitesse en s'accrochant à lui; il sera entraîné, la chose ne fait aucun doute pour personne.

Construction pratique des moteurs triphasés.

— On pourrait réaliser des moteurs triphasés en se basant sur le schéma de la figure 65, mais on serait conduit à employer des encoches trop considérables pour pouvoir loger tous les fils d'un cadre.

Pour mieux utiliser la circonference intérieure du stator et faire contribuer plus facilement tous les fils à la production du champ tournant, on répartit les fils d'un même cadre A ou d'une même phase en trois séries d'encoches par exemple, et l'on obtient un stator de la forme de celui de la figure 66.

Avec cette disposition, les fils de la phase A (fig. 65) qui passaient tous par l'encoche 11 se trouvent répartis entre les trois encoches 1, 2 et 3; de même les fils de la phase B' contenus dans l'encoche 10 passent par les trois encoches 4, 5 et 6, et ainsi de suite.

Un stator de ce genre est dit à quatre pôles et à trois encoches par pôle et par phase; il comportera donc $3 \times 4 \times 3 = 36$ encoches.

Naturellement, si le diamètre intérieur du rotor le permet, on pourra employer 5 ou 6 encoches par circuit, mais comme on le devine, plus il y a d'encoches et plus les dents qui les séparent deviennent minces. Il ne faut pas aller trop loin dans cette voie,

car le fer doux qui constitue ces dents se sature vite de lignes de force, et si ces dents sont trop étroites elles ne passeront plus aussi facilement. Cet étranglement joue pour le moteur le même rôle qu'une aug-

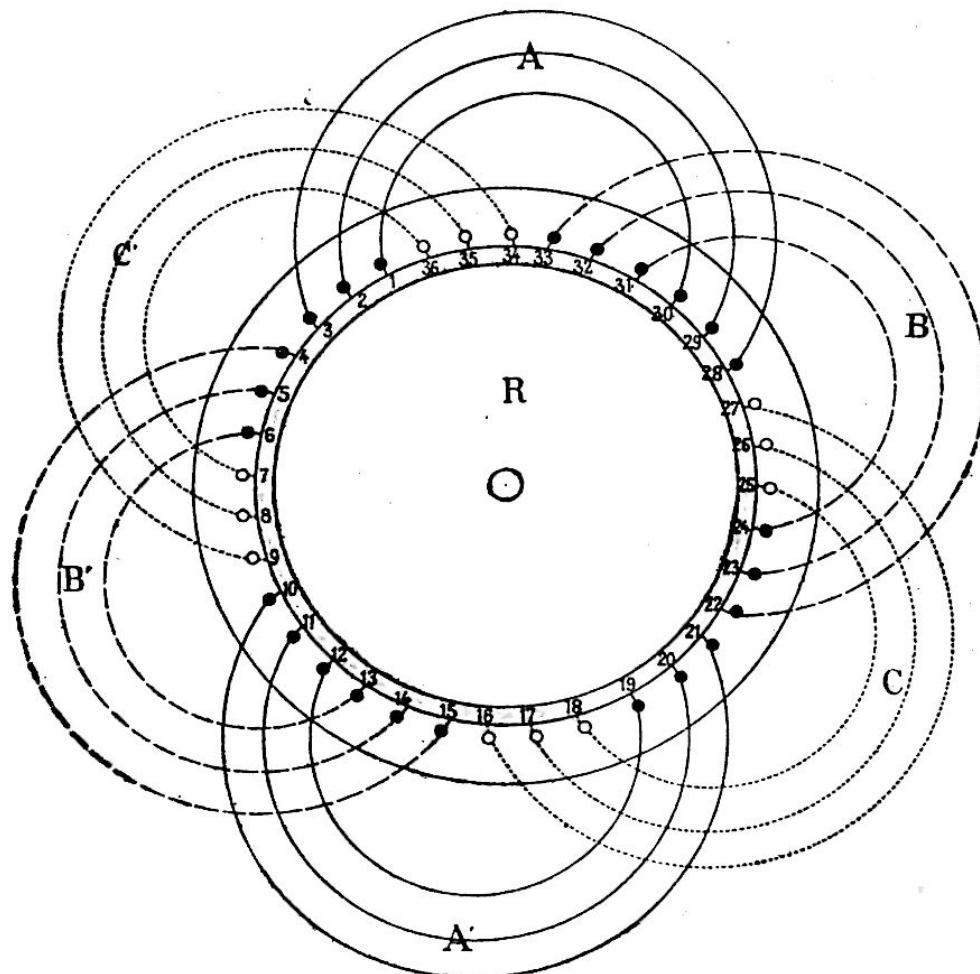


FIG. 66. — Schéma de l'enroulement d'un moteur triphasé.

mentation d'entrefer, et on n'oubliera pas que l'on doit *réduire* le plus possible l'entrefer dans les moteurs asynchrones.

On se rendra compte de l'importance que les constructeurs attachent à l'entrefer pour le bon rendement de leurs moteurs, en remarquant que cet entrefer n'est que d'un *demi-millimètre* pour un

moteur de 20 chevaux et au-dessous; il atteint 8/10^e de millimètre sur un moteur de 500 chevaux, et à peine *un millimètre* dans un moteur de 1 000 à 1 500 chevaux.

Un jeu aussi petit (fig. 67) du rotor à l'intérieur du

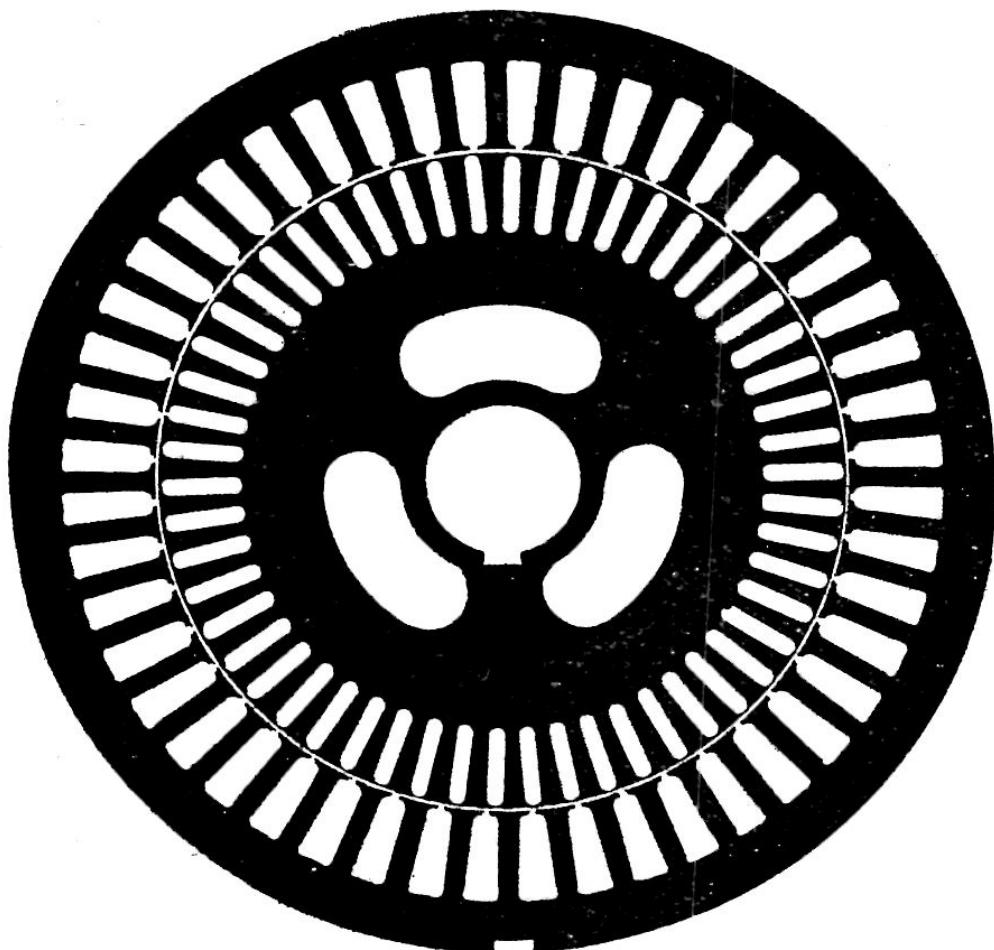


FIG. 67. — Tôles découpées de stator et de rotor d'un moteur triphasé montrant la finesse de l'entrefer.

stator exige une construction mécanique des plus soignées, des paliers larges et solides, un graissage parfait et un centrage absolu du stator dans le rotor.

Ce centrage est facilité dans ce genre de moteur par la constitution même des organes à ajuster; en effet, les encoches du stator étant fermées, aucun fil

ne se présente en dehors du fer et le rotor portant des barres ou des conducteurs passés dans des trous pratiqués sur le bord des tôles; on peut mettre le stator aussi bien que le rotor sur le tour et les amener chacun au diamètre exact que l'on s'est imposé.

La figure 68 représente la façon dont sont disposés pratiquement sur le stator des circuits de la figure 66, on y retrouve les trois bobines de chaque phase, en

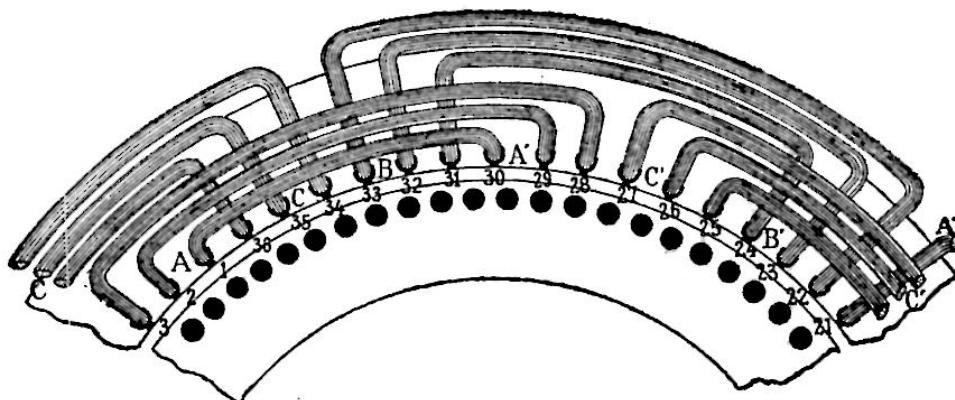


FIG. 68. — Répartition des bobines d'un moteur triphasé dans les encoches.

particulier celles de la phase A, réparties dans les encoches 1, 2 et 3 d'une part, et 28, 29, 30 d'autre part.

De même, les fils de la phase B sont répartis en trois bobines passant, d'une part, dans les encoches 31, 32 et 33, et d'autre part dans les trous 22, 23, 24, et ainsi de suite.

Les bobines sont rabattues sur les côtés du stator de façon à dégager le centre pour permettre l'introduction facile du rotor. Comme nous l'avons indiqué à propos des moteurs diphasés, les encoches sont tapissées intérieurement de micanite et les fils réunis en forme de faisceaux sont isolés soigneusement à l'aide d'un vernis spécial et ligaturés soit avec de la ficelle, soit avec des rubans, soit enfin, s'il s'agit d'en-

roulements à haute tension, ils seront isolés par des bandes de micanite et séparés les uns des autres.

Le schéma de la figure 69 est celui de l'enroulement complet d'un moteur triphasé : 1, 2 et 3 sont les entrées des enroulements, 1', 2' et 3' sont les sorties que l'on couplera différemment suivant que l'on voudra mon-

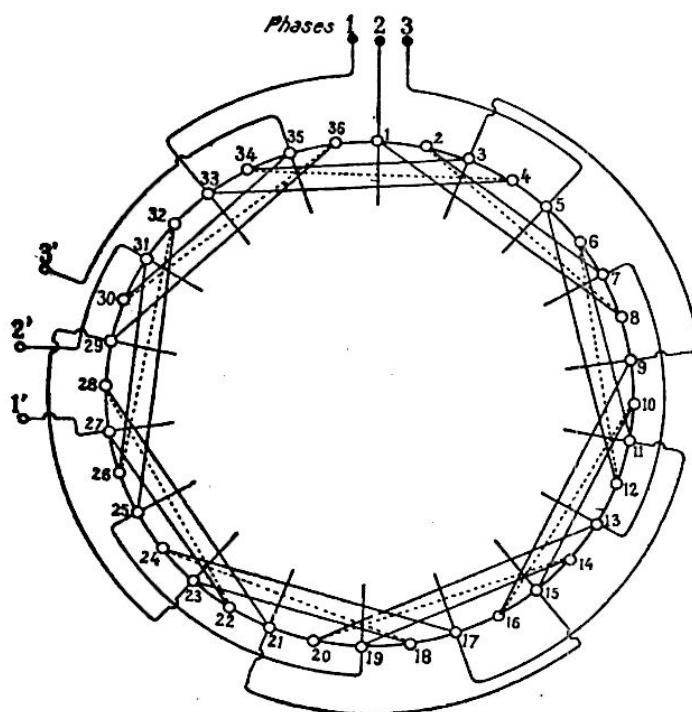


FIG. 69. — Schéma d'un enroulement triphasé, 3 circuits, 6 bornes.

ter les enroulements en étoile ou en triangle, ainsi qu'on va le voir.

Groupement des circuits d'un moteur triphasé.— D'après les figures 63 et 69, six fils seraient nécessaires avec le courant triphasé, mais on a remarqué que chacun d'eux peut servir de retour au courant des deux autres circuits, en sorte que l'on n'emploie que trois fils seulement.

Les trois phases ou trois circuits A, B, C du moteur peuvent être montés de deux façons bien différentes : en *étoile* ou en *triangle*.

Pour le montage en étoile (généralement employé) on réunit à un point commun appelé *point neutre* une des extrémités de chacun des circuits A, B, C;

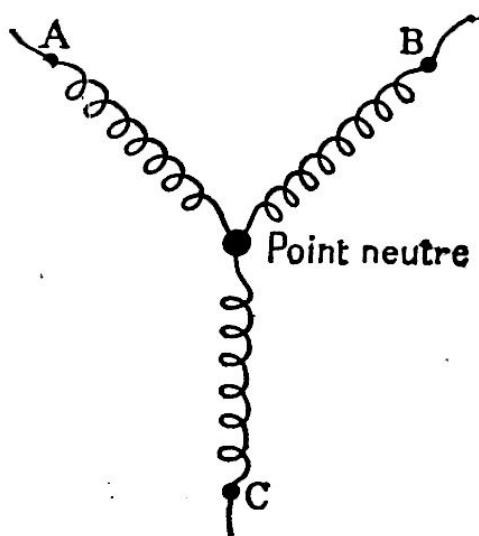


FIG. 70.
Montage en étoile.

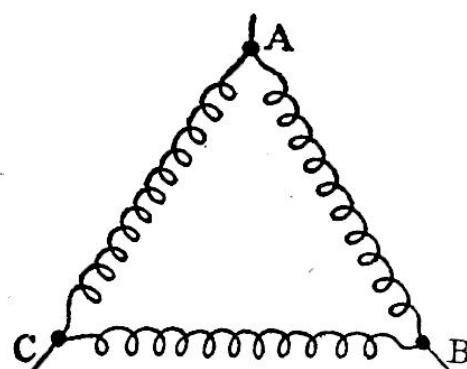


FIG. 71.
Montage en triangle.

il reste trois bouts libres A, B, C, qui reçoivent les courants triphasés (fig. 70 et 73).

On peut aussi réunir deux à deux les extrémités des circuits A, B, C et l'on obtient le montage en triangle (fig. 71).

Quels sont les avantages de ces deux modes de montage ?

Au point de vue fonctionnement, ils sont identiques, car le champ tournant est aussi régulier dans un cas que dans l'autre ; il n'y a qu'au point de vue tension qu'ils diffèrent.

Supposons que le nombre de spires de chacun des circuits A, B, C soit tel qu'ils puissent supporter nor-

malement une tension alternative de 110 volts avec une fréquence de 50 périodes par seconde.

Si l'on dispose, pour alimenter le moteur, de courant

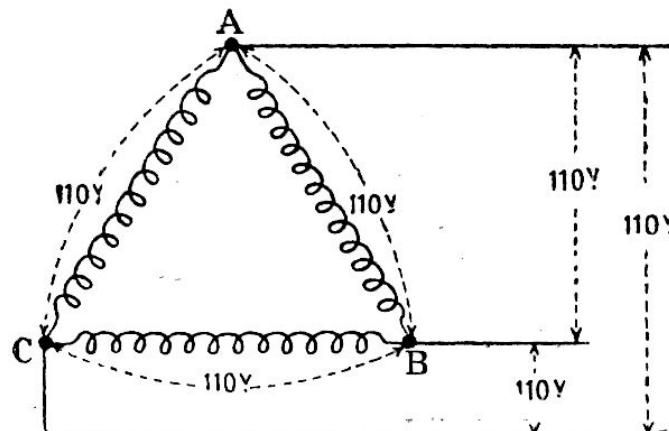


FIG. 72. — Enroulements montés en triangle pour la marche sur 110 volts.

alternatif à 50 périodes par seconde, mais à 110 volts entre fils, on adoptera le montage en *triangle* (fig. 71).

Si nous montons les circuits en *étoile* (fig. 73), on

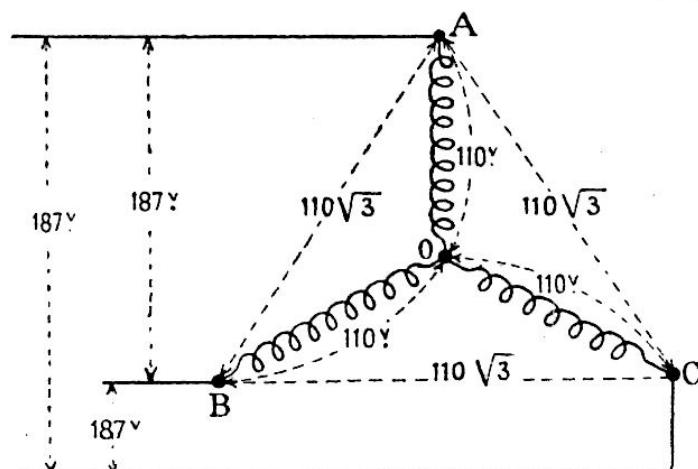
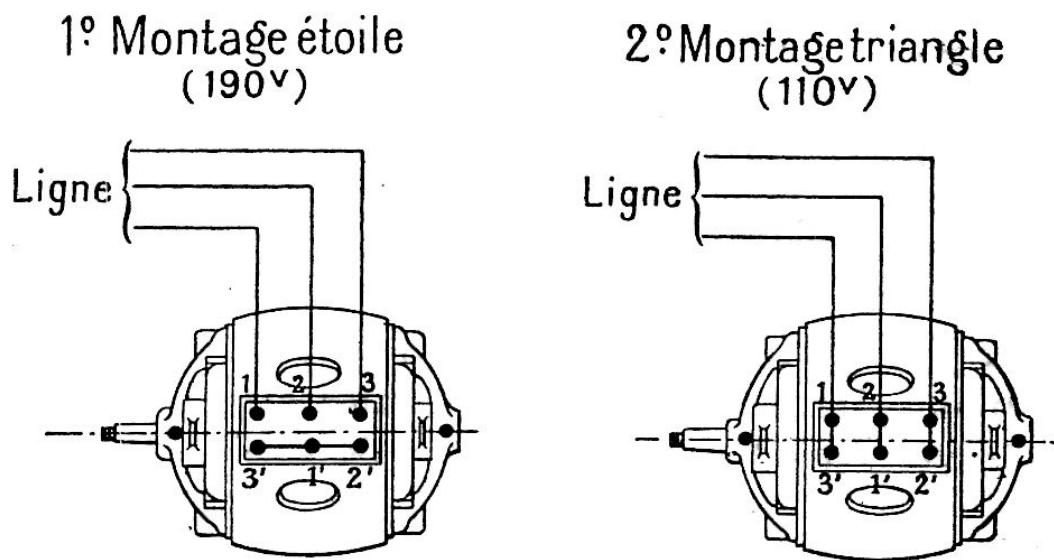


FIG. 73. — Les mêmes enroulements montés en étoile pour la marche sur 190 volts.

peut appliquer 110 volts entre chaque point A, B, C et le point neutre O, ce qui correspond à $110 \times \sqrt{3} = 110 \times 1,732 = 187$ volts entre fils d'arrivée.

Grâce à ce simple changement de connexions, un moteur monté en triangle dans le but d'être actionné par des courants triphasés à 110 volts pourra recevoir ces mêmes courants triphasés à la tension de 187 volts par le passage du montage en triangle au montage



Les bornes marquées 1,1'-3,3'etc... correspondent aux extrémités d'un même enroulement.

FIG. 74. — Couplages en étoile ou en triangle des enroulements d'un moteur triphasé par des connexions sur les boîtes à bornes.

en étoile. L'intensité varie exactement de la façon inverse.

On a ainsi la ressource d'augmenter, si on le désire, la puissance du moteur sans changer les fils de l'installation, simplement par un autre mode de groupement de ces circuits.

Ce procédé est utilisé couramment sur les transformateurs et les alternateurs, suivant les cas; il constitue un avantage de plus en faveur des courants triphasés.

Sur les moteurs, on trouve généralement des « boîtes à bornes » qui permettent de réaliser facilement de tels couplages au moment des montages, ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte sur les figures ci-dessous, analogues à celles que nous avons donné, page 116, pour le groupement des enroulements d'un moteur diphasé.

D'autre part, ainsi que nous le verrons plus loin, pour faciliter dans certains cas le démarrage des moteurs, on est conduit à passer rapidement du montage « étoile » au montage « triangle », on peut employer dans ce but l'inverseur figuré page 157 dont les deux positions, « étoile » pour le démarrage et « triangle pour marche normale, réalisent, ainsi qu'il est facile de le voir, les deux groupements de bobines.

Moteurs asynchrones synchronisés. — On peut transformer un moteur asynchrone en moteur synchrone en injectant du *courant continu* à basse tension (4 à 8 volts) entre deux quelconques des trois bagues du rotor d'un moteur asynchrone. On a alors un moteur asynchrone synchronisé qui possède la propriété intéressante de marcher à vide et même à faible charge avec un facteur de puissance égal à 1, parce qu'il est devenu synchrone (voir p. 92). Le schéma de la figure 75 indique comment on peut réaliser la chose expérimentalement avec une batterie d'accumulateurs C que l'on intercale avec un ampèremètre M dans le trajet d'un des trois fils se rendant des bagues au démarreur en manœuvrant l'interrupteur D que l'on fait passer de la position DH à la position DK.

Le mécanisme de cette action est bien simple : le

passage du courant continu entre deux quelconques des bagues d'un rotor à pour effet de « polariser » ce dernier, c'est-à-dire de faire apparaître des pôles *nord* et *sud* à sa surface. Lorsque ces pôles rencontrent ceux de nom contraire du champ tournant, ils sont

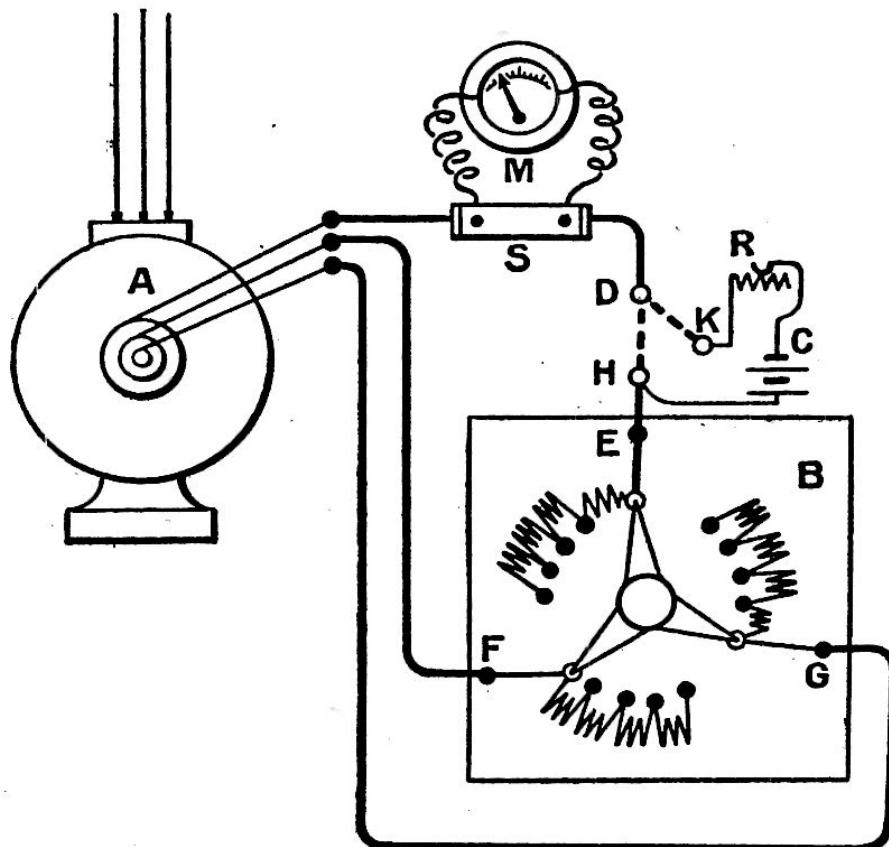


FIG. 75. — Moteur asynchrone rendu synchrone en envoyant le courant continu d'une batterie d'accumulateur C dans un des circuits du rotor.

accrochés par eux et le moteur devient synchrone¹. Le courant continu nécessaire est emprunté, en général, à une petite machine génératrice de 10 à 12 volts entraînée par le moteur et qui sert d'excitatrice. On

1. A. SOULIER, *Revue Générale de l'Electricité*, nos du 5 avril 1919, p. 505, et du 7 juin 1919, p. 831.

peut alors réaliser le schéma de la figure 76 qui est le même que le précédent, sauf en ce que la dynamo H remplace en permanence la batterie d'accumulateurs qu'il faudrait charger de temps en temps. Un rhéostat R sert à régler, dans les deux cas, la valeur du courant

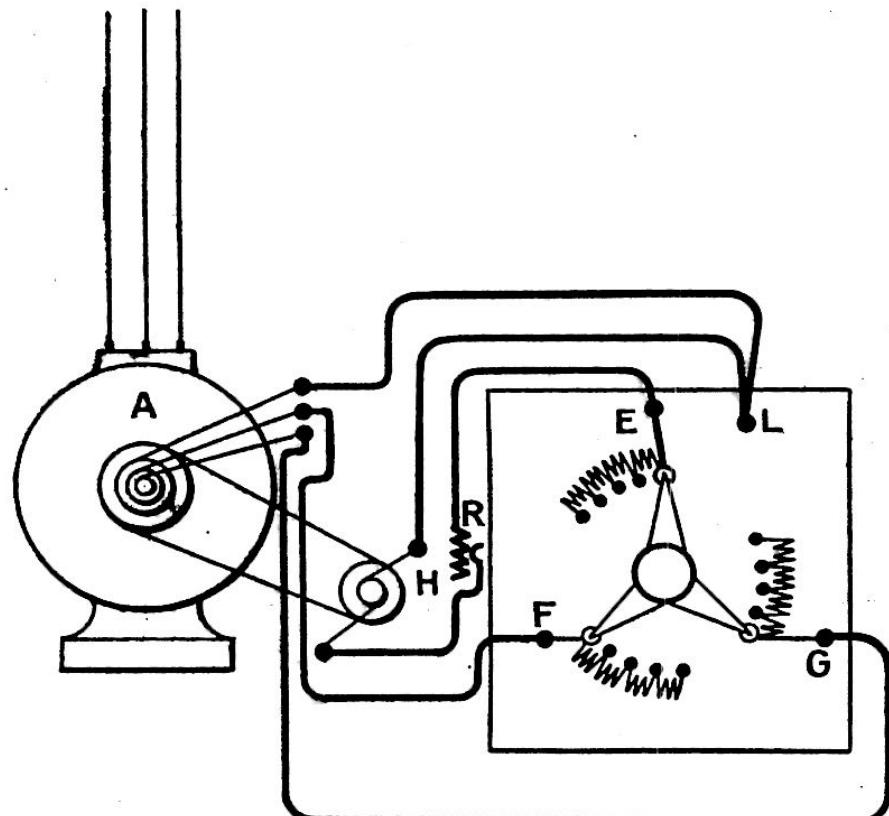


FIG. 76. — Moteur asynchrone rendu synchrone par l'envoi dans un des circuits du rotor du courant continu produit par la dynamo H.

d'excitation et, par suite, le facteur de puissance (voir p. 97).

Moteurs auto-synchrones. — Nous avons vu, page 103, qu'une cage d'écureuil entraînée dans un champ magnétique tournant s'efforce de rattraper le champ tournant sans pouvoir y arriver, on dit qu'elle « glisse » derrière lui. C'est un peu comme la courroie

qui est entraînée par la poulie d'un moteur, elle glisse, et si le glissement (ou la perte de vitesse) est trop grand on tend la courroie ou on met dessus de la résine. Si la poulie est striée, ou présente des dents comme le pignon d'une bicyclette, il n'y a plus de glissement.

Avec les moteurs asynchrones, c'est la même chose on peut réaliser des rotors qui s'accrochent dans le

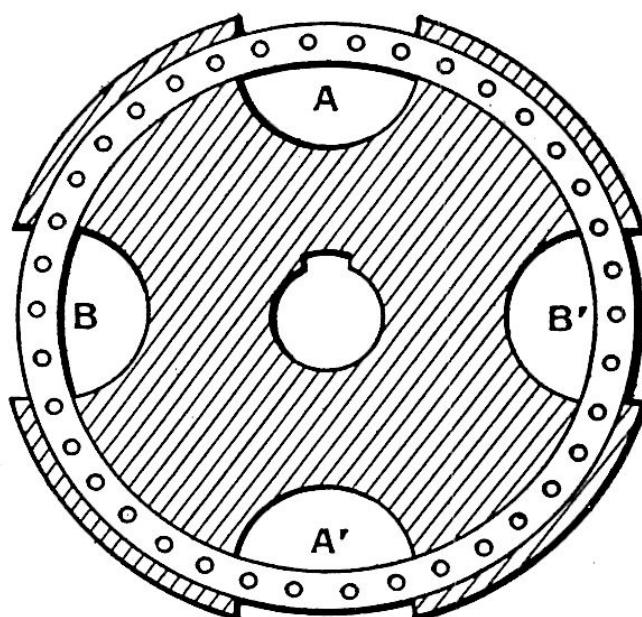


FIG. 77. — Rotor de moteur auto-synchrone.

champ tournant et tournent avec lui, simplement en pratiquant dans le fer doux qui le constitue *deux* grosses encoches, diamétralement opposées si le moteur est à deux pôles, ou quatre grosses encoches à 90° (AA' et BB', fig. 77) s'il est à quatre pôles, etc. Grâce à ces encoches, le champ tournant se canalise dans le rotor comme la chaîne dans les dents d'un pignon, et le rotor tourne en synchronisme avec le champ. De tels moteurs sont dits « auto-synchrones », parce qu'ils démarrent sur leur cage d'écureuil comme

les moteurs à rotor lisse, puis, lorsque leur vitesse arrive au voisinage de celle du champ magnétique tournant, le flux s'engage entre les grosses encoches et le rotor tourne avec le champ comme deux engrenages en prise. De tels moteurs sont employés pour entraîner des machines à vitesse constante, notamment dans le cinéma parlant ; mais il ne faut pas perdre de vue qu'ils sont, à volume égal, de puissance plus faibles que les moteurs à rotor lisse, à cause de la place prise par les grosses encoches. En outre ils ont un mauvais facteur de puissance, car il n'y a plus, comme dans les moteurs asynchrones synchronisés, une source d'excitation indépendante : l'excitation, ici comme dans les moteurs asynchrones ordinaires, est empruntée au réseau sous forme de courants « déwattés » ou « réactifs ».

CHAPITRE VI

UTILISATION DES CHAMPS TOURNANTS INDUIT OU ROTOR

Nous avons vu qu'il suffisait de disposer une cage d'écureuil en cuivre à l'intérieur du stator d'un moteur à champ tournant, qu'il soit diphasé ou triphasé, pour voir aussitôt cette cage tourner, entraînée qu'elle est par le champ magnétique. Nous savons que ce mouvement est dû à la réaction des courants induits dont elle est le siège sur le champ tournant qui leur a donné naissance. De même que dans les induits à courant continu, pour mieux capter les lignes de force du champ magnétique inducteur, on loge les conducteurs dans des rainures pratiquées dans une masse de fer doux; de même dans les moteurs à champ tournant, pour mieux concentrer les lignes de force de ce champ autour des conducteurs, on logera ces derniers dans des trous pratiqués à la surface d'un cylindre de fer doux tourné comme un piston pour s'emboîter exactement dans la cavité du stator.

On laisse un jeu pour la rotation, mais on le rend *aussi petit que possible* afin d'avoir un meilleur rendement (voir fig. 67).

Les petits moteurs jusqu'à 1 Ch comportent

une cage d'écureuil constituée par des barres de cuivre rouge passées dans des trous pratiqués dans un cylindre formé de tôles de fer doux et rivées à leurs extrémités à deux plateaux en cuivre rouge qui assurent la fermeture du circuit (fig. 45, 48 et 50).

Il vaut mieux rivet ou visser les barres que de les souder, car au moment du démarrage, si l'induit reste quelque temps immobile, soit qu'il soit calé, soit pour toute autre raison, il se développe dans la cage d'écureuil des courants excessivement intenses (de plusieurs milliers d'ampères), qui peuvent faire fondre les soudures. Ces intensités s'expliquent si l'on veut bien remarquer qu'un moteur asynchrone, dont l'induit est immobile et dont le stator est relié au courant alternatif, est comparable à un transformateur¹ dont le primaire est le stator et le secondaire la cage d'écureuil; comme cette dernière est fermée sur elle-même en court-circuit, elle devient le siège de courants très intenses, car la résistance des barres qui la constituent est presque nulle. C'est pour cette raison que dans les moteurs devant démarrer sous charge on ne peut plus employer la cage d'écureuil pour des puissances supérieures à 1 Ch; on est conduit alors à prendre un rotor bobiné et à insérer des résistances au moment du démarrage dans ce rotor, afin d'éviter d'avoir des courants d'une intensité exagérée qui le détérioreraient rapidement. Une fois en mouvement, le rotor est traversé par des courants moins importants, car il tourne dans le champ et n'est plus coupé par autant de lignes de force que

1. Voir *L'Électricité sans algèbre*, par A. SOULIER, p. 215-218 et 377;

lorsqu'il est immobile. Si même il arrive à tourner à la vitesse du champ, il ne sera plus le siège d'aucun courant, il deviendra *synchrone* (voir page 103).

Si, par un procédé quelconque, on peut faire démarrer le moteur et n'admettre le courant sur le stator que lorsque la cage d'écureuil est à sa vitesse, il n'y a plus à craindre la présence de ces courants énormes et l'ensemble fonctionne parfaitement.

C'est ce que l'on fait pour les très gros moteurs; pour la mise en marche, on commence par faire tourner le rotor à vide à l'aide d'un petit moteur auxiliaire, puis quand il arrive à sa vitesse normale on envoie le courant triphasé sur le stator. L'induit continue à tourner et on n'a de courant exagéré ni dans la cage d'écureuil ni sur la ligne d'alimentation, parce que, grâce à ce procédé, le rotor tourne sensiblement à la vitesse du champ tournant et se comporte en somme comme une bobine presque immobile entre les pôles d'un aimant. Il en résulte qu'il n'est le siège que d'un courant très faible, le courant ne prenant naissance que lorsqu'il y a déplacement de l'aimant par rapport à la bobine, ou inversement.

On ne devra pas perdre de vue non plus que si, sur le stator d'un moteur à cage d'écureuil au repos, on admet du courant alternatif l'ensemble devient assimilable à un transformateur dont le secondaire serait en court-circuit, en sorte qu'à sa mise sous tension il se produira un appel de courant sur la ligne par le primaire, ce dernier absorbant un courant d'autant plus intense que le secondaire débite lui-même un courant plus considérable. Il se produira donc à chaque mise en marche des à-coups sur le réseau; la cage d'écureuil simple ne peut donc être

employée pour des démarrages fréquents, il faut utiliser des rotors bobinés.

Rotors bobinés. — Le bobinage que l'on réalise généralement sur les rotors est un enroulement triphasé analogue à celui d'un stator à courant triphasé. Même si le stator est diphasé, on peut employer un rotor triphasé, car ce dernier se déplace en somme dans un champ tournant identique à celui qu'on aurait avec un stator triphasé, or il est plus simple comme construction de faire un enroulement triphasé sur le rotor; ce bobinage conduit à l'emploi de trois bagues pour insérer des résistances, alors qu'il en faudrait quatre avec un bobinage diphasé ordinaire; il en résulte que l'on emploie toujours ce bobinage pour les rotors.

On pourrait prévoir sur le rotor un nombre d'encoches égal à celui du stator, mais cette disposition serait très mauvaise, car le démarrage se ferait mal. Avec un tel montage, les dents tendraient à se mettre en regard et il se produirait un véritable engrènement, analogue à celui qui se produit entre deux roues dentées, ce qui rendrait le démarrage difficile; aussi choisit-on un nombre d'encoches sur le rotor qui soit *premier* avec celui du stator ou qui soit tel qu'ils aient comme commun diviseur un nombre aussi grand que possible (voir fig. 67).

Le bobinage du rotor étant triphasé pourra être monté en étoile ou en triangle; on devra simplement veiller à ce que ce bobinage comporte autant de pôles que celui du stator; c'est ainsi qu'un stator à 4 pôles, qu'il soit diphasé ou triphasé, aura un rotor à quatre pôles et ainsi de suite.

Les enroulements du rotor, qu'ils soient montés en

étoile ou en triangle, laissent trois extrémités libres que l'on fait généralement aboutir à trois bagues isolées A, B, C, disposées sur l'arbre et sur lesquelles frottent des balais a_1 , b_1 , c_1 (fig. 78).

Des balais, le courant se rend à un rhéostat triple

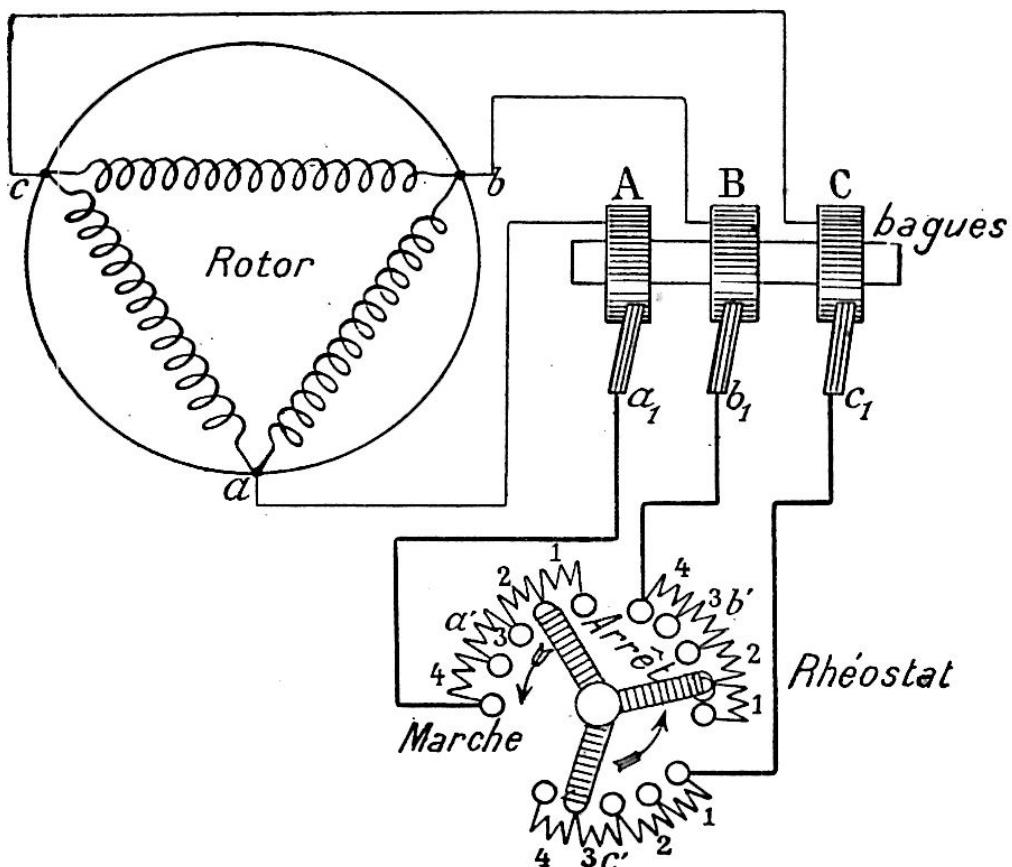


FIG. 78. — Schéma du montage d'un moteur triphasé avec bagues communiquant avec un rhéostat pour le démarrage.

formé de trois séries de résistances a', b', c' , qu'un triple curseur commandé par une même manette peut mettre simultanément en court-circuit.

Pour le démarrage, on insère le maximum de résistance en disposant les curseurs sur le plot 1. Dans ces conditions, le courant venant des trois bagues est obligé de traverser les résistances insérées sur

chaque fil. Une fois le moteur en marche, on tourne lentement la manette jusqu'à amener les curseurs sur le plot 4, et alors les enroulements du rotor sont mis directement en court-circuit par le curseur à triple manette.

A l'arrêt, on devra ramener les curseurs sur le plot 1, de façon à laisser les résistances insérées pour le démarrage. Si l'on oublie de faire cette manœuvre, on s'expose à faire sauter les fusibles au moment du démarrage, à cause de l'appel considérable de courant qui se fera sur le primaire par suite de la mise en court-circuit du rotor ou secondaire. Ce dispositif, bien connu aujourd'hui, est dû à l'ingénieur français Maurice Leblanc.

REMARQUE. — On peut se demander ce qui se passera si l'on applique le courant sur le stator d'un moteur asynchrone dont les enroulements du rotor sont ouverts, par exemple si les balais n'appuient pas sur les bagues. Hâtons-nous de dire que rien de grave ne peut en résulter.

Il se produit, comme dans tout transformateur, une force électromotrice induite dans le secondaire; mais comme le circuit n'est pas fermé, les balais étant relevés, aucun courant ne peut s'établir et le rotor reste immobile.

De son côté, le stator n'absorbe qu'un courant faible, simplement celui nécessaire pour magnétiser le fer et entretenir le champ tournant; de là le nom de *courant magnétisant* donné à ces courants correspondant à la marche à vide. Ces courants ne représentent du reste qu'une puissance insignifiante, car ils sont décalés par rapport à la force électromotrice;

il s'ensuit qu'un moteur asynchrone à vide consomme très peu au compteur.

La seule précaution à prendre à ce moment consiste à ne pas toucher aux bagues qui pourraient donner des secousses désagréables. En effet, les constructeurs établissent en général le bobinage du rotor de façon à ce que la force électromotrice à vide entre bagues soit dans les environs de 110 à 150 volts, cette tension sans être dangereuse peut être désagréable au toucher.

Fonctionnement d'un moteur à bagues. — Faisons appuyer les trois balais et relions-les au rhéostat triple de la figure 78; aussitôt le rotor va fonctionner comme un vrai secondaire de transformateur; il circulera des courants entre les trois bagues et les résistances. Mais ces mêmes courants qui proviennent de l'induit réagiront sur le champ tournant et entraîneront le rotor; en même temps leur action démagnétisante provoquera, comme dans les transformateurs, un appel de courant dans le stator, en sorte que ce dernier absorbera des courants bien plus importants qu'à vide. On peut, comme on le devine, choisir les résistances du rhéostat de façon à ce que le courant absorbé ne soit pas trop élevé.

Au fur et à mesure que le rotor tournera plus vite, sa vitesse se rapprochera de celle du champ tournant et tout se passera comme si on avait un induit de dynamo tournant entre ses pôles inducteurs et dont on ralentirait peu à peu l'allure; les spires coupent moins souvent les lignes de force du champ et la force électromotrice induite diminue, le courant faiblit également dans le rotor, et ce phénomène se

répercute sur le stator en sorte qu'à pleine vitesse et à vide ce dernier absorbe un courant moins intense qu'au démarrage.

Glissement. — Si même la vitesse du rotor pouvait atteindre celle du champ, les fils seraient immobiles par rapport au champ et *aucun courant* ne se produirait comme dans une dynamo au repos. En réalité, on n'arrive jamais à ce résultat et le moteur, même à vide, *glisse* lentement dans le champ tournant. On se rend compte facilement de ce glissement, en intercalant un ampèremètre à courant continu (à aimant) avec zéro au milieu entre une des bagues et la résistance correspondante. Le moteur fonctionnant à vide, on voit l'aiguille de l'ampèremètre se balancer lentement autour du zéro indiquant le passage d'un courant alternatif à fréquence très faible.

Si l'on charge le moteur, on voit les allées et venues de l'aiguille devenir plus rapides; cela tient à ce que le rotor glissant davantage dans le champ tournant a ses circuits plus souvent traversés par les lignes de force de champ tournant. On peut, en comptant le nombre d'allées et venues de l'aiguille dans un temps donné, *mesurer le glissement* du rotor, c'est-à-dire son retard par rapport au champ, et cette mesure permet d'évaluer d'une façon assez rapide le rendement du moteur.

Charge d'un moteur. — Lorsqu'on charge un moteur quel qu'il soit, et en particulier un moteur asynchrone, sa vitesse tend à diminuer, ce qui revient à dire ici que le rotor *glisse* par rapport au champ tournant qui tend à l'entraîner à sa suite.

En effet, la vitesse du champ tournant est intimement liée à la fréquence des courants alternatifs, si cette dernière reste fixe, comme c'est le cas des réseaux industriels, le champ tournant aura toujours la même vitesse; il n'en est pas de même de l'induit dont la vitesse dépend de la charge qu'il a à entraîner;

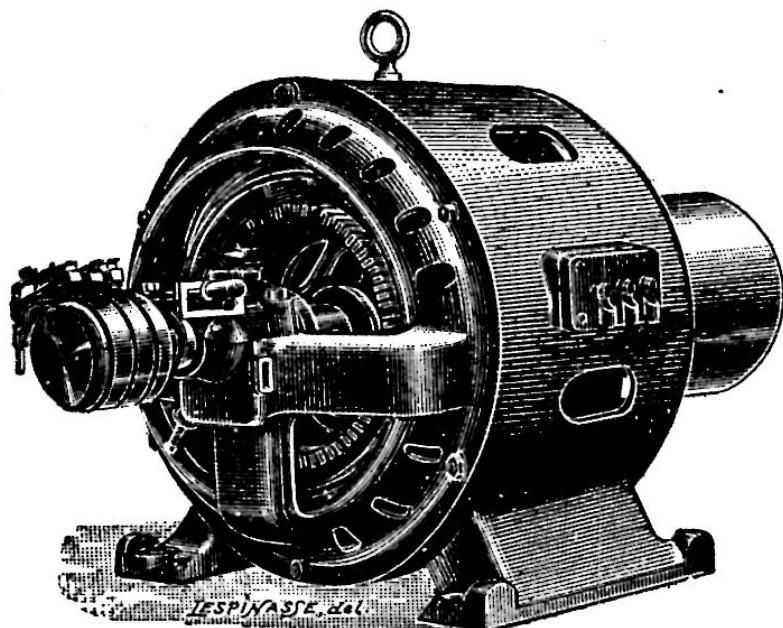


FIG. 79. — Vue d'ensemble d'un moteur triphasé à bagues et à relevage des balais.

si cette dernière augmente, il se produit une légère diminution de vitesse qui entraîne une production de courants plus intenses dans le rotor; ces courants étant plus importants qu'auparavant, réagissent sur le champ tournant en donnant un couple moteur plus élevé, en même temps qu'ils provoquent un appel de courant dans le stator.

Ainsi, comme dans le moteur shunt à courant continu, une charge appliquée sur un moteur asynchrone provoque une légère diminution de vitesse ayant pour effet de faire fournir au réseau un courant

plus important. Autrement dit, le moteur asynchrone dépensera proportionnellement à la charge qu'on lui donnera.

Il ne faudrait cependant pas aller trop loin en chargeant le moteur, car à partir d'un certain moment on le verrait ralentir et s'arrêter brusquement, en même temps qu'il absorberait un courant exagéré pouvant amener la détérioration de ses enroulements.

Ce fait tient à ce que lorsque le glissement devient *trop grand*, la self-induction du rotor entre en jeu et limite la puissance du moteur. Si on désire marcher avec un fort glissement, il faut intercaler des résistances pour combattre la self-induction, mais cette marche n'est pas économique et mieux vaut encore ne pas faire subir à ces moteurs des surcharges exagérées. C'est là le seul inconvénient de ce genre de moteurs ; à part cela, on voit que l'on peut réaliser sur le stator qui est immobile des bobinages pour des tensions élevées de 2 000 à 3 000 volts, ou même 12 000 volts comme on en trouve dans certaines installations de Paris, ce que l'on ne pourrait pas faire avec le courant continu.

Relevage des balais. — Nous avons vu que les moteurs triphasés à rotor bobiné (page 138) comportent trois bagues entre lesquelles on insère des résistances pour le démarrage, résistances que l'on met ensuite progressivement en court-circuit.

Dans beaucoup de moteurs, cette mise en court-circuit des bagues peut être obtenue dans le rotor lui-même à l'aide d'un dispositif mécanique manœuvré par la force centrifuge (page 152) ou simplement à la main (fig. 79). A partir de ce moment, il n'est plus

nécessaire que les balais appuient sur les bagues, c'est pourquoi on a prévu un système de *relevage des balais* qui évite tout frottement et toute usure de ces derniers, c'est également ce relevage que les constructeurs spécifient le plus souvent dans leur catalogue pour justifier une augmentation du prix.

Il n'est pas absolument nécessaire, mais il permet par la mise en court-circuit directe du rotor de se rapprocher de la cage d'écureuil dont la résistance est presque nulle et qui procure le fonctionnement idéal pour ce genre de moteur.

CHAPITRE VII

DISPOSITIFS DE DÉMARRAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES

Les petits moteurs triphasés ou diphasés peuvent, jusqu'à la puissance de un cheval, être pourvus de rotors en cage d'écureuil; ils démarrent alors très aisément à la simple fermeture de l'interrupteur tri-polaire chargé d'admettre le courant triphasé sur le stator.

L'induit de ces moteurs étant relativement petit se met en mouvement aussitôt qu'il subit l'action du champ tournant, si bien que les courants induits dans les barres de la cage d'écureuil n'ont pas le temps d'atteindre une valeur dangereuse. Toutefois, si un moteur de ce genre se trouvait calé par suite d'une charge trop forte, il pourrait se faire que les courants induits dans la cage d'écureuil par le champ tournant du stator atteignent une intensité capable de faire *fondre* les soudures de la cage d'écureuil; ce fait se produit quelquefois, aussi les constructeurs adoptent-ils des cages avec barreaux rivés ou plus simplement un bobinage en forme de cage fait avec du fil de cuivre nu sans solution de continuité, ou encore des cages en aluminium fondues d'une seule pièce; comme la tempéra-

ture n'atteint jamais celle qui correspond à la fusion du cuivre, ces induits sont très robustes et fonctionnent très bien.

A partir d'un cheval, les moteurs à champ tournant doivent posséder un dispositif permettant d'atténuer l'afflux de courant qui se produit au moment de la mise en marche. Beaucoup de procédés peuvent être employés; nous allons passer en revue les principaux, ceux que l'on rencontre le plus souvent.

Démarrage par rhéostat. — De même que dans les moteurs à courant continu on diminue l'afflux de courant qui tend à se produire au démarrage en intercalant un rhéostat, de même dans les moteurs à champ tournant on diminuera la valeur du courant induit en plaçant des résistances dans le circuit du rotor.

Le procédé est très simple (fig. 78), rappelons-en le principe, il consiste à réaliser sur le rotor un bobinage triphasé en étoile ou en triangle et à relier les trois bagues isolées A, B, C, placées sur l'arbre aux trois sommets a , b , c . D'autre part, trois balais a_1 , b_1 , c_1 frottent sur ces bagues et communiquent avec trois résistances a' , b' , c' , qu'une manette commune peut mettre en court-circuit.

Au moment où l'on veut faire démarrer le moteur on insère entre les trois bagues la résistance maximum, puis on admet le courant sur le stator en fermant un interrupteur tripolaire; le moteur prend peu à peu sa vitesse, on l'accélère en diminuant la résistance du rhéostat du rotor, et au bout de quelques secondes on peut mettre les trois résistances en court-circuit par la manette qui sert alors de point de liaison aux trois bagues.

Ce dispositif, dû, avons-nous dit, à M. Maurice Leblanc, est très employé, on le rencontre sur le plus grand nombre de moteurs.

Il présente cependant l'inconvénient suivant: lorsque le moteur est appelé à être manœuvré par le premier venu, si à l'arrêt on oublie de pousser la manette du rhéostat sur la dernière touche marquée arrêt, on court le risque de détériorer le moteur lorsqu'on essaie ensuite de le faire démarrer en agissant sur l'interrupteur du stator. La résistance n'étant plus intercalée, un courant exagéré traversera l'enroulement du rotor et pourra détériorer l'isolant des fils par l'élévation brusque de température qui en résultera. De plus, comme dans un transformateur en court-circuit, le primaire ou stator absorbera un courant intense et les fusibles sauteront.

Pour éviter que cet accident ne vienne à se produire, on peut utiliser un des dispositifs suivants.

Démarrage automatique par la force centrifuge. — On comprend facilement que si on place sur l'arbre un commutateur se manœuvrant par la force centrifuge on pourra l'utiliser pour mettre les résistances en court-circuit, sitôt que la vitesse du rotor atteindra une valeur suffisante.

La figure 80 représente un appareil de ce genre très simple, comme on va le voir. Les résistances r_1 , r_2 , r_3 sont disposées à l'intérieur du rotor et montées d'une façon permanente entre les trois fils a , b , c de l'enroulement. Une boîte cylindrique M pourvue de trois compartiments en matière isolante 1, 2 et 3 contient du mercure. Chacun des trois fils de l'enroulement

du rotor aboutit à un des compartiments et peut venir toucher au mercure. A l'extrême opposée de la boîte se trouve une languette métallique qui réunit électriquement les trois compartiments.

A l'arrêt, le mercure occupe le fond de la boîte et touche soit les trois fils a' , b' , c' , soit la languette, mais jamais ces deux parties simultanément. Les résis-

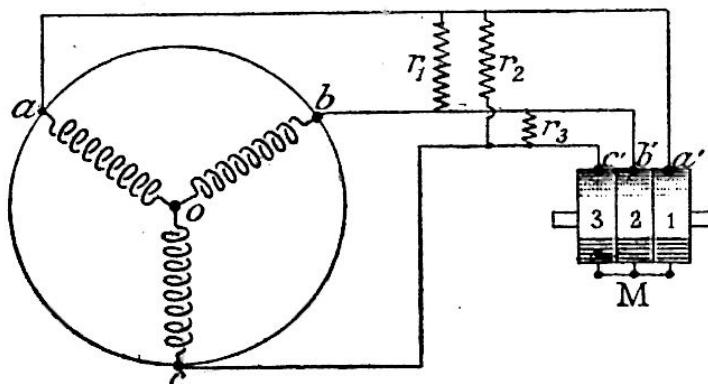


FIG. 80. — Démarrage automatique d'un moteur triphasé par contacteur à mercure.

tances r_1 , r_2 , r_3 sont donc insérées et le démarrage se fera sans courant exagéré.

A mesure que la vitesse de l'induit augmente, la force centrifuge chasse le mercure contre les parois de la boîte, et à un certain moment ce métal liquide vient réunir les points a' , b' , c' avec la languette; à ce moment, les résistances et l'induit sont mises en court-circuit et le résultat voulu est atteint.

Si le moteur s'arrête, le mercure reprend sa place et le démarrage pourra s'effectuer de nouveau sans précaution aucune. Ce système ingénieux est appliqué à des moteurs placés dans des endroits presque inaccessibles; il est robuste et ne donne lieu à aucun ennui.

Un autre procédé au moins aussi élégant a été

employé avec des moteurs de puissance assez considérable. Le rotor porte deux enroulements en étoile bobinés côté à côté et à nombre *inégal* de spires. Ces enroulements sont montés en opposition comme deux piles que l'on réunit par leurs pôles de même nom. S'ils produisaient la même force électromotrice, aucun courant ne circuleraient, mais comme l'un d'eux contient plus de spires que l'autre, il s'établit un cou-

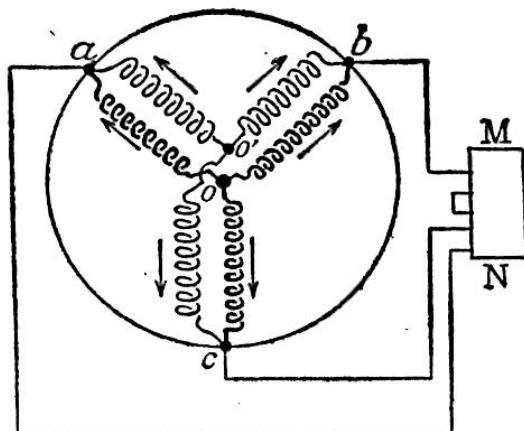


FIG. 81. — Enroulements en opposition mis en court-circuit par le contacteur M.

rant allant de l'enroulement plus fort au plus faible bien moins intense que si le bobinage était en court-circuit, mais suffisant pour produire le démarrage. Puis quand la vitesse atteint une valeur suffisamment grande, un commutateur à force centrifuge M (formé de masses que la force centrifuge tend à écarter) vient réunir les enroulements en court-circuit, chacun d'eux travaille alors séparément sur le court-circuit et la marche devient normale.

Procédé Fischer-Hinnen. — Entre les trois fils *a*, *b*, *c* de l'enroulement du stator sont montées à la fois trois résistances R_1 , R_2 , R_3 et trois bobines pré-

sentant peu de résistance et beaucoup de self-induction $L_1 L_2 L_3$ (fig. 82).

Lorsqu'on envoie le courant sur le stator d'un tel moteur dont le rotor est au repos, il se développe dans l'enroulement a, b, c un courant induit alternatif dont la fréquence est exactement la même que celle des courants du réseau tant que le moteur ne

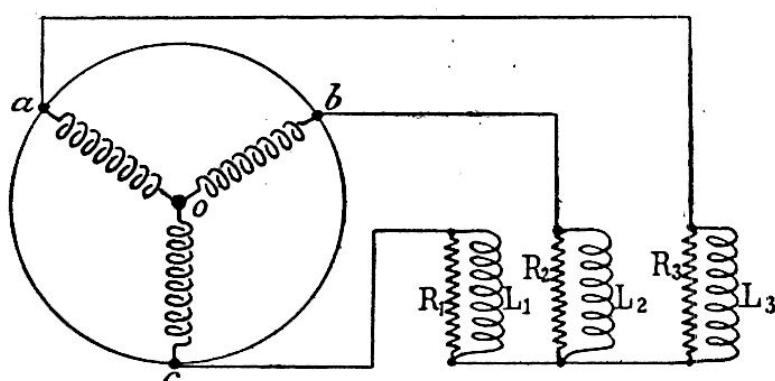


FIG. 82. — Démarrage par le procédé Fischer-Hinnen, utilisant des résistances fixes R montées aux bornes d'inductances L .

tourne pas (comme dans l'enroulement secondaire d'un transformateur).

Ces courants à fréquence relativement grande circuleront difficilement dans les bobines L_1, L_2, L_3 à cause de leur grande-self-induction et passeront plus facilement dans les résistances $R_1 R_2 R_3$, qui ne présentent pas de self-induction. Le moteur démarrera lentement.

A mesure que la vitesse du rotor augmentera, la fréquence des courants induits diminuera, car la différence de vitesse entre le rotor et le champ tournant devient plus faible. Mais si la fréquence diminue, les courants circuleront plus facilement à travers les bobines de self-induction, et quand le moteur atteindra sa vitesse normale très voisine du synchronisme, les

courants induits changeront très peu souvent de sens et seront presque assimilables à du courant continu, ils circuleront librement dans les bobines $L_1 L_2 L_3$ qui n'interviendront plus que comme une faible résistance. Ainsi donc, la self-induction jouera ici le rôle d'écran pour les courants de démarrage, en s'opposant de moins en moins au passage des courants du rotor quand la vitesse de ce dernier augmente. Les résistances et les bobines de self-induction pouvant être logées à l'intérieur du rotor, on voit que l'on obtient ainsi un moteur extrêmement facile à mettre en marche, se présentant extérieurement comme un moteur à cage d'écureuil et ne nécessitant aucun organe spécial de contact.

Moteurs à coupleur. — Dans d'autres moteurs, les résistances logées à l'intérieur du rotor sont mises en court-circuit automatiquement, à l'aide d'un coupleur actionné par la force centrifuge (fig. 83).

Dans ce but, trois câbles aboutissant à trois points équidistants *a*, *b*, *c* sur le rotor traversent l'arbre et arrivent (deux en *D* et *E*, l'autre à la masse *M*), à un coupleur qui les met en court-circuit progressivement. Deux masselottes mobiles en laiton *A*, *B*, l'une *A* plus *lourde* que l'autre *B*, sont enfilées sur une tige de guidage et peuvent se déplacer du centre vers l'extérieur sous l'effet de la force centrifuge. Elles portent chacune deux blocs en charbon reliés à l'aide de boudins en fil souple à la masse du coupleur qui communique avec un des câbles *C* venant du rotor.

Ces blocs en charbon peuvent venir toucher à leur fin de course des pièces fixes également en charbon

D, E et F, G reliées entre elles et à la masse par des résistances rr et $r'r'$.

Le fonctionnement se devine : au repos, chacune des masselottes est poussée vers le centre par un ressort enfilé sur une des tiges de guidage. Les points *a*, *b*, *c* du rotor étant reliés ensemble par les résistances rr et $r'r'$, le moteur peut démarrer sur ces résis-

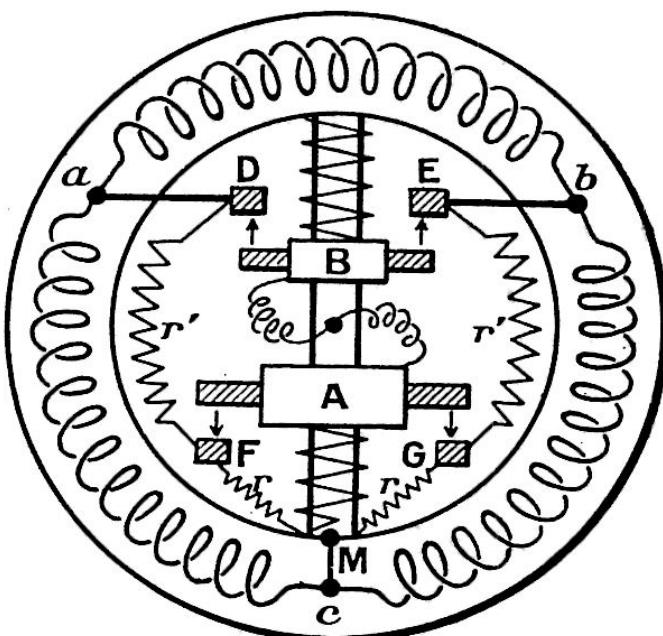


FIG. 83. — Coupleur à force centrifuge opérant en deux temps.

tances dès que le courant est admis sur le stator. Aussitôt, le rotor commence à prendre de la vitesse, la masselotte la plus lourde A est d'abord projetée contre F et G où elle supprime les résistances rr en laissant en circuit $r'r'$. Puis, quand la vitesse devient suffisante, la deuxième masselotte B, la plus légère, part à son tour et met, en D et E cette fois, en court-circuit franc sur la masse, les trois câbles venant du rotor. Le moteur se comporte alors comme un moteur asynchrone en court-circuit et sa vitesse devient normale.

Si par hasard la vitesse vient à diminuer par suite de la charge, au lieu de caler, le moteur continue à marcher, les masselottes ayant au moment voulu supprimé la mise en court-circuit intérieure du rotor et ayant introduit les résistances.

Moteurs Boucherot. — M. Boucherot, ingénieur-électricien, contemporain de Maurice Leblanc, a créé toute une série très intéressante de moteurs à champ tournant démarrant sans bagues, à l'aide du procédé suivant :

1^o *Moteur à stator double.* — Dans un premier système on met en opposition au démarrage les courants induits dans un rotor composé de deux parties, puis quand la vitesse est suffisante, on agit sur les stators de façon à ce que les courants des deux rotors, au lieu de se contrarier, ajoutent leurs effets et finalement fonctionnent à la façon d'une cage d'écureuil.

Pour réaliser facilement cette disposition, M. Boucherot prend deux rotors $R_1 R_2$ placés sur le même arbre et dont les barres formant cage d'écureuil dans chacun d'eux sont communes (fig. 84).

Des résistances r , placées entre ces barres dans le vide qui sépare les deux rotors, contribuent au démarrage, comme on va le voir. Chacun de ces rotors est soumis au champ tournant d'un stator, mais l'un de ces stators est mobile et peut tourner d'un petit angle autour de son rotor en agissant sur une vis. Pour le démarrage, on cale le stator mobile à l'aide de sa vis, de façon à ce que ses pôles ne soient pas sur la même ligne que ceux du stator fixe. De cette façon, chacun d'eux va induire des courants dans le rotor correspondant et ces courants pourront être en oppo-

sition si l'écart angulaire des deux stators est assez grand; ils ne pourront circuler d'un rotor à l'autre et se fermeront par les résistances r . C'est le résultat voulu, le démarrage se produira.

Puis quand le moteur commencera à prendre une certaine vitesse, on ramènera le stator mobile à sa position normale à l'aide de la vis, et quand les pôles seront sur la même ligne tout se passera comme si

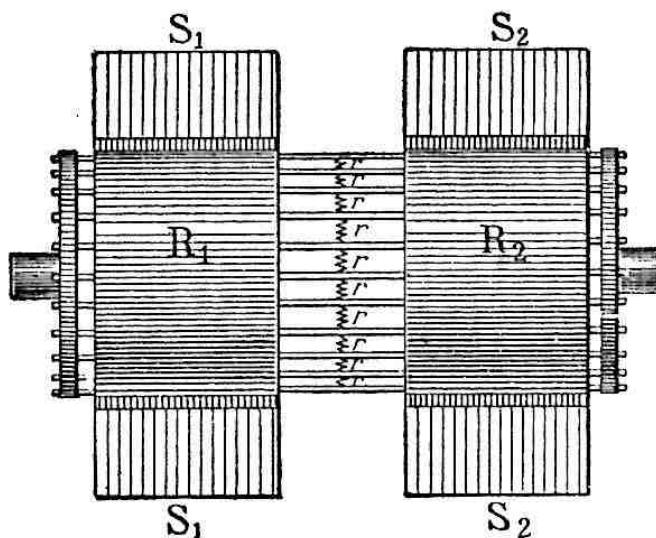


FIG. 84.—Moteur Boucherot à deux stators, dont l'un décalable.

l'on n'avait plus qu'un seul rotor tournant dans un stator unique. Les courants circuleront dans les barres comme dans une cage d'écureuil ordinaire.

A l'arrêt, on devra prendre la précaution de ramener le stator mobile à la position de démarrage, afin d'éviter les inconvénients résultant de l'application du courant sur un moteur à cage d'écureuil en court-circuit.

2^e Moteurs Boucherot à double cage. — Pour éviter toute manœuvre compliquée, M. Boucherot, dans un deuxième système, a eu l'idée d'employer un rotor spécial à deux cages *concentriques* (fig. 85) l'une en

barres de *maillechort* *a* formant résistance, l'autre *b*, en *cuivre*. Au démarrage, seule la cage à barres de maillechort la plus rapprochée du bord est le siège de courants, le moteur démarre sur la résistance ainsi offerte; peu à peu, en tournant l'effet d'écran formé

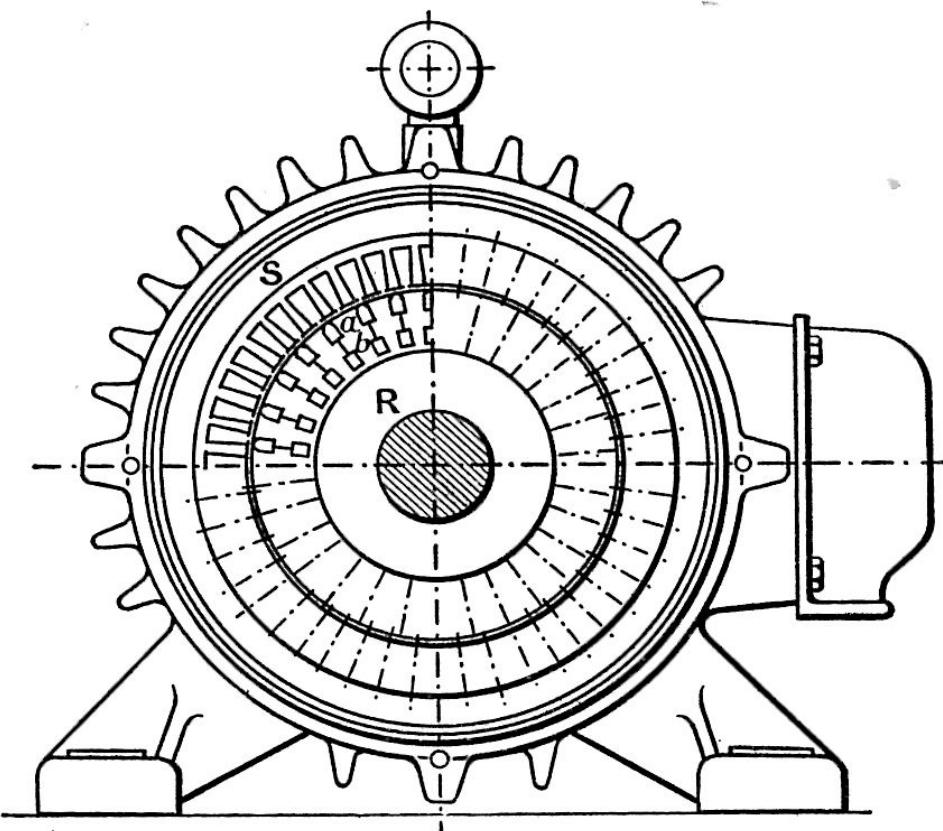


FIG. 85. — Moteur Boucherot à double cage, l'une résistante, *a*, en maillechort, l'autre, *b*, conductrice en cuivre.

par la première cage diminue et c'est la cage en cuivre qui intervient ensuite, le moteur se comporte alors comme un moteur à cage d'écureuil ordinaire.

Ainsi donc, avec ce procédé particulièrement élégant on n'a besoin *d'aucun coupleur*, car automatiquement, au départ, c'est la cage *résistante* en maillechort qui intervient pour limiter le courant et créer le couple moteur, puis à mesure que la vitesse aug-

mente la cage en cuivre, plus conductrice, se substitue peu à peu à la cage résistante en maillechort.

Démarrage « étoile-triangle ». — Certains constructeurs, pour éviter l'emploi d'un rhéostat tou-

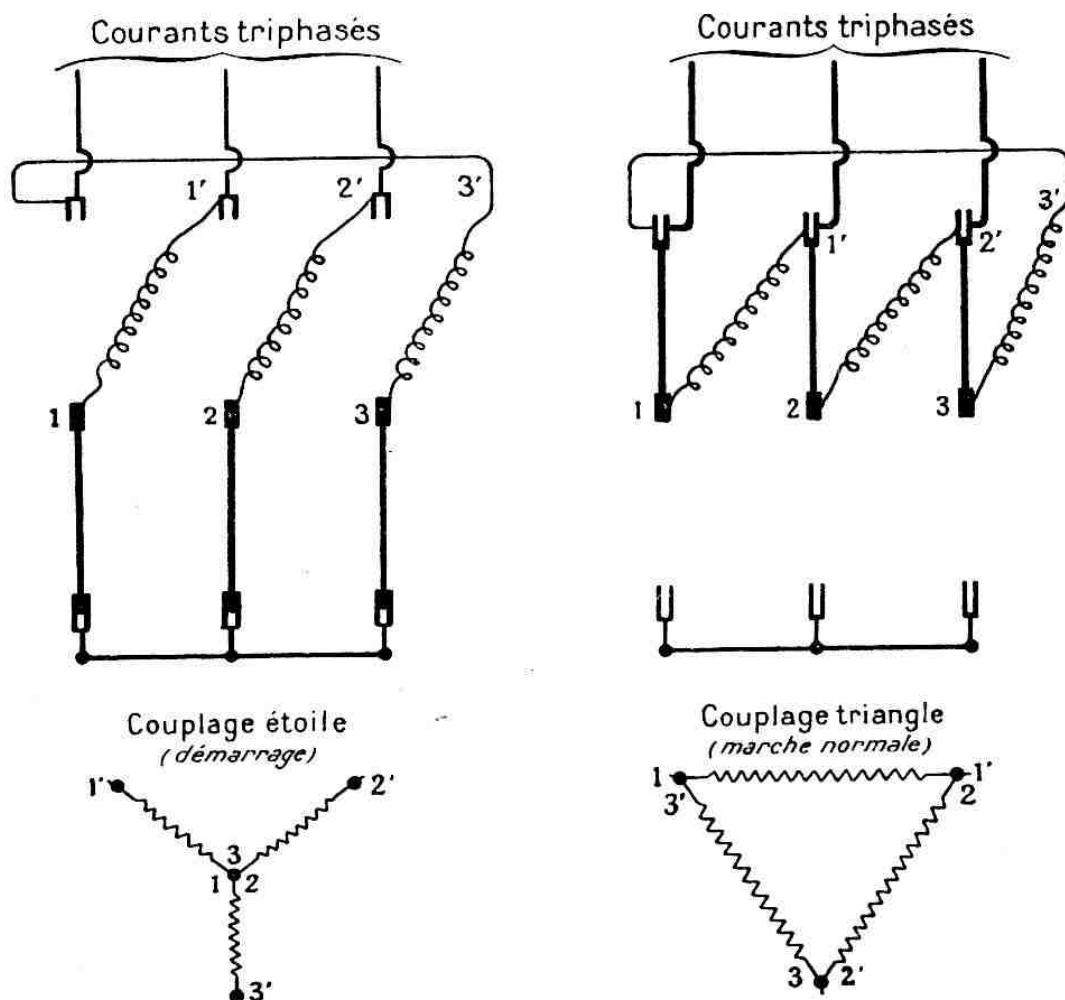


FIG. 86. — Couplages des enroulements d'un moteur triphasé en étoile ou en triangle à l'aide d'un inverseur.

jours coûteux, prévoient sur le socle du moteur un commutateur qui permet d'alimenter en courant triphasé le stator de deux façons différentes :

1^o Pour le démarrage, les enroulements sont cou-

plés en *étoile* (couplage correspondant à un montage en série);

2^o Pour la marche normale, les mêmes enroulements

sont montés en *triangle* (couplage correspondant à un montage en parallèle).

Le commutateur qui réalise ces couplages varie de forme avec les constructeurs, son principe reste le même, ainsi que son montage qui s'inspire des schémas que nous donnons figure 86.

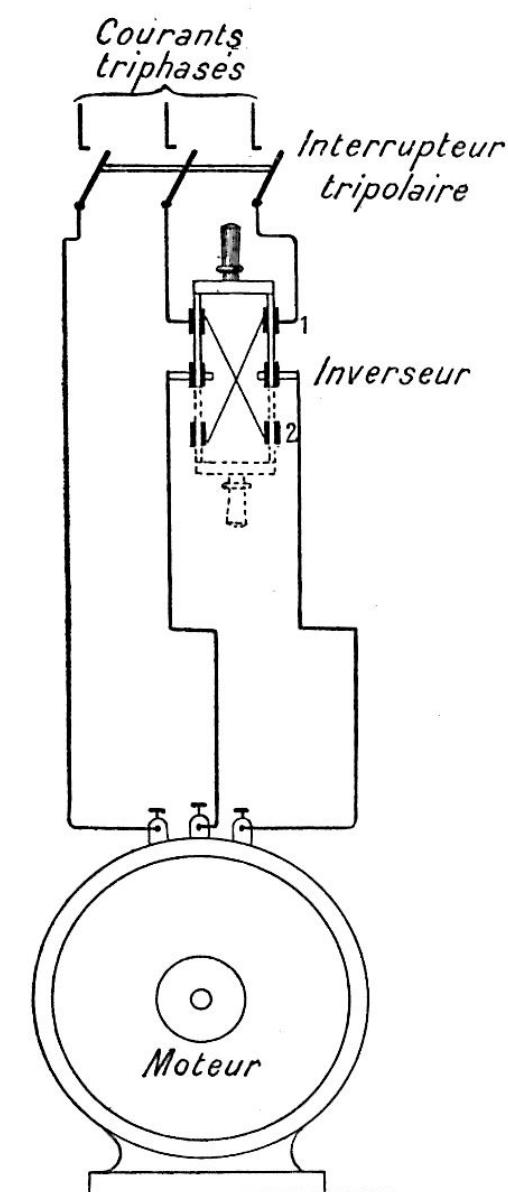


FIG. 87. — Schéma du montage d'un moteur triphasé avec inverseur du sens de marche.

Changement du sens de la marche. — Dans bien des circonstances, il peut être intéressant de faire tourner un moteur soit dans un sens, soit dans l'autre. Quoique les moteurs asynchrones se prêtent mal à des changements de sens en pleine marche ainsi qu'on les réalise avec les moteurs à courant continu (voir page 44), on peut cependant à l'arrêt, par un simple changement de connexions, obtenir ce résultat.

Il suffit en effet, sur un moteur triphasé, d'intervertir deux quelconques des trois fils amenant le cou-

rant au stator, et dans un moteur diphasé ou un moteur à courant alternatif à cage d'écureuil (voir page 165), d'intervertir les deux fils d'une quelconque des deux phases.

Ce simple changement de fils modifie le sens dans lequel se déplace le champ tournant, et l'induit qui suit le champ participe, lui aussi, à ce changement de sens de marche.

La manœuvre peut se réaliser avec un inverseur, ainsi que le représente la figure 87 relative à un moteur *triphasé*.

Si l'on a un moteur *diphasé*, le schéma reste le même, avons-nous dit, avec cette différence toutefois, c'est que tandis que pour un moteur triphasé on peut intercaler l'inverseur entre *deux* quelconques des trois fils alimentant le stator, dans le moteur diphasé il faut veiller à ce que l'inverseur soit intercalé dans le trajet de *l'une* des *deux* phases (peu importe laquelle), et non entre deux fils appartenant à des phases différentes.

Tous ces montages d'inverseurs peuvent être réalisés avec des contacteurs en vue d'une commande à distance, ainsi que l'indiquent les schémas de la page 210 et ceux que l'on trouve page 220 de notre ouvrage *Plans de pose et schémas d'électricité industrielle*, Garnier frères, éditeurs.

CHAPITRE VIII

LES MOTEURS ASYNCHRONES A COURANT ALTERNATIF SIMPLE

Aussitôt après l'invention des moteurs asynchrones à champ tournant et devant la simplicité idéale de ces machines, les constructeurs se sont demandé s'il ne serait pas possible d'appliquer leur principe à l'établissement de moteurs utilisant le courant alternatif simple ou monophasé.

La chose est, en somme, assez facilement réalisable et s'est trouvée vite vérifiée expérimentalement. Prenons un moteur diphasé, et tandis qu'il est en pleine vitesse coupons le courant sur l'une des phases, le rotor continue à tourner comme auparavant, et cependant le stator ne reçoit du courant alternatif que par deux fils, au lieu de quatre. La seule différence de marche s'observe au démarrage.

Tandis que le moteur diphasé démarre à la fermeture d'un interrupteur admettant le courant sur les deux enroulements du stator, le même moteur ne part pas si l'on ne fait agir que l'un des deux courants alternatifs.

Si, à ce moment, on communique au rotor une vive impulsion dans un sens ou dans l'autre, le moteur se

met aussitôt à tourner. Ce phénomène s'explique si l'on veut bien un instant comparer le moteur à cage d'écureuil à courant alternatif à une machine à vapeur à piston.

Dans cette dernière machine, l'action de la vapeur est alternative, tout comme l'attraction que produit le courant alternatif traversant le stator. Or, on sait qu'une machine à vapeur ne démarre pas quand elle est au point mort; mais si, à l'aide d'un levier, on pousse le volant elle part aussitôt. Cet inconvénient serait des plus graves pour la traction, en particulier pour les locomotives, qui seraient fréquemment en panne si l'on n'avait ingénieusement remédié à cette difficulté.

Accouplons deux machines sur le même axe, mais dont les manivelles sont à 90° , comme on le fait sur les locomotives à vapeur, et nous savons que nous pourrons toujours démarrer, car lorsqu'une des machines sera au point mort, l'autre sera au milieu de sa course et pourra développer l'effort maximum.

Ce qui a si bien réussi aux locomotives à vapeur peut bien s'appliquer aux moteurs à courant alternatif simple, et effectivement voici comment l'on procède :

Disposons sur le stator un deuxième enroulement à 90° du premier (ou à angle droit) et envoyons dans ce bobinage supplémentaire le courant alternatif du réseau convenablement retardé par une bobine de self-induction. Le dispositif sera en somme analogue à celui d'une locomotive, les deux enroulements à 90° pourront être comparés aux deux manivelles à angle droit et le courant alternatif retardé par la bobine est assimilable à la vapeur distribuée par le tiroir à un quart de période d'intervalle.

Si l'on veut bien y réfléchir, c'est ce que l'on réalise par l'emploi de courants diphasés et, en somme, la bobine de self-induction intercalée dans le circuit auxiliaire retarde l'apparition du courant dans cet enroulement, ce qui provoque un champ tournant entraînant le rotor.

On peut se demander pourquoi l'on n'emploierait pas toujours ce système plus simple en somme que les dispositifs utilisant des courants triphasés. Théoriquement, en effet, ces moteurs paraissent équivalents ; pratiquement, ils ne le sont pas.

La bobine de self-induction n'étant pas parfaite, ne retarde pas le courant de 90° exactement, mais d'un angle beaucoup plus faible ; il en résulte que le couple au démarrage est petit et que de tels moteurs ne peuvent démarrer sous charge ; on est obligé soit de faire passer à cet instant la courroie sur une poulie folle, soit d'en employer un embrayage à friction de façon à n'appliquer la charge que lorsque la vitesse est devenue normale.

Ce procédé n'en est pas moins intéressant, et il est très employé sur les réseaux à courants alternatifs simples. Remarquons en passant que si la self-induction retarde le courant alternatif, le condensateur fait avancer¹ ce même courant, mais tandis que l'on a beaucoup de peine à obtenir avec la self-induction un déphasage de 90° *en arrière*, on réalise sans difficulté, avec une capacité, un déphasage de 90° *en avant*, la seule différence pratique est qu'une self-induction est assez facile à construire, tandis qu'il faut pour pro-

1. Voir *L'Électricité sans algèbre*, par A. SOULIER, p. 393 et 394, Garnier frères, éditeurs.

duire un effet équivalent de très fortes capacités beaucoup plus chères d'achat.

Cependant, comme nous le verrons plus loin, les condensateurs sont de plus en plus employés pour les petits moteurs monophasés depuis que la téléphonie et la T. S. F. ont rendu courants ces appareils.

Moteur asynchrone à courant alternatif simple.

— On pourrait se contenter de prendre un stator de moteur à courant diphasé et d'envoyer dans l'un des enroulements le courant direct du réseau et dans l'autre une dérivation de ce même courant que l'on obligerait à traverser une bobine de self-induction. Mais comme, lorsque le démarrage est obtenu, on supprime ce dernier enroulement dit « auxiliaire », les constructeurs préfèrent donner plus d'importance au premier et réduisent le second.

Représentons (fig. 88) par un anneau Gramme le stator du moteur et supposons qu'il soit à deux pôles obtenus par les deux bobines principales A, B recevant directement le courant alternatif du réseau.

Entre ces deux bobines A et B, plaçons-en deux autres, C et D, à 90° des premières qui constitueront le circuit auxiliaire et que nous réaliserons en fil plus fin faisant plus de tours. Nous relierais cet enroulement au réseau MN, en intercalant une bobine de self-induction S, tandis qu'une résistance R sera insérée momentanément dans l'enroulement principal. Le courant alternatif pris à un instant donné réalisera en A et B deux pôles, mais à ce moment il ne passera encore rien en CD à cause du retard qu'introduit la bobine de self-induction S, puis le champ magnétique diminuera en AB pour augmenter en CD; on obtien-

dra de cette façon un champ tournant, bien mauvais, puisque la bobine ne réalise pas un décalage de 90° du courant, mais suffisant pour entraîner le rotor et lui communiquer l'impulsion initiale qui lui est nécessaire.

Nous avons vu que l'on intercalait un rhéostat R dans le circuit principal AB au moment du démar-

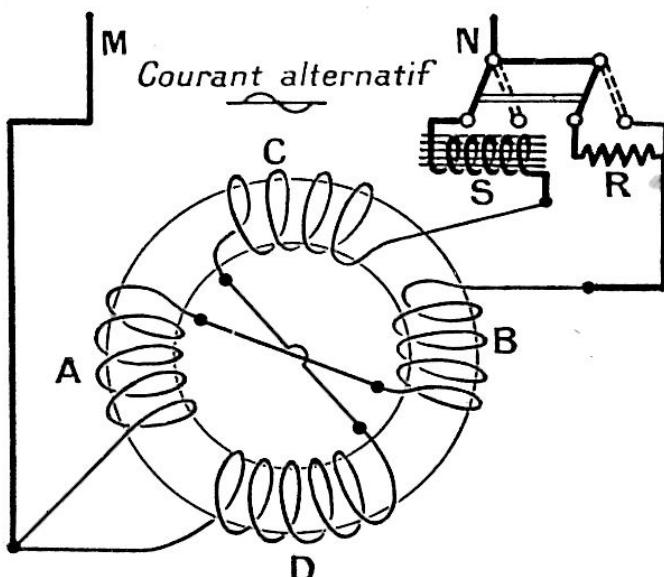


FIG. 88. — Schéma du montage d'un moteur asynchrone monophasé avec bobine d'inductance S et résistance R pour le démarrage.

rage, de façon à diminuer l'intensité du courant dans ce circuit tant que le rotor n'a pas atteint sa vitesse. Ce rhéostat R et la bobine S sont mis hors circuit en marche normale en utilisant un inverseur (fig. 88) qui rétablit la liaison directe de l'enroulement principal AB avec le réseau MN une fois le moteur lancé.

Il en résulte que la mise en marche d'un pareil moteur exigera les manœuvres suivantes :

1^o Insertion d'une résistance dans le circuit principal et de la bobine de self-induction dans le circuit auxiliaire pour le démarrage;

2^e Suppression de la résistance et du circuit auxiliaire en marche normale.

Enfin, si le moteur a une puissance supérieure à

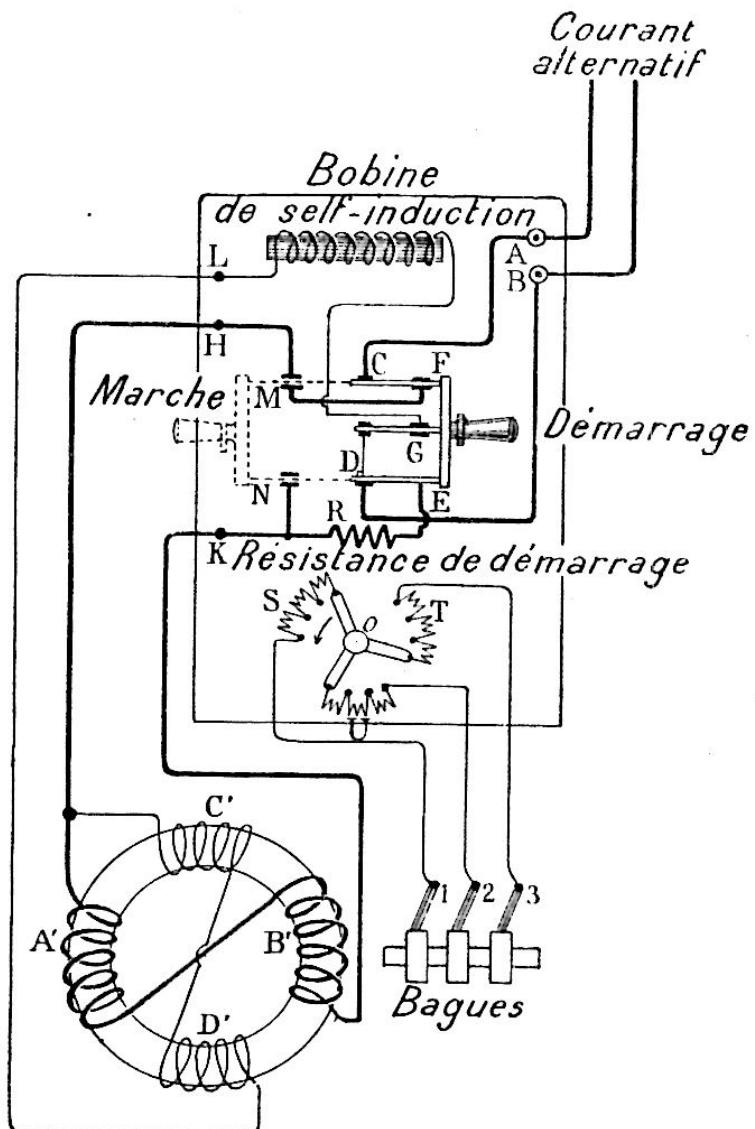


FIG. 89. — Schéma du montage d'un moteur asynchrone monophasé à courant alternatif et de ses appareils de démarrage.

1 cheval, il est nécessaire d'employer un rotor bobiné avec résistances insérées au démarrage. On réunit en général tous ces organes sur un tableau dont le schéma est donné figure 89.

Le courant alternatif simple arrive à deux bornes A et B, d'où il se rend à deux pièces C et D constituant l'axe d'un commutateur inverseur dont on va voir le rôle.

Supposons ce commutateur dans la position de la figure, c'est-à-dire la manette à droite, c'est la position de démarrage.

De C et D, le courant alternatif se rend au moteur par deux circuits différents, l'un en gros traits D, E, K et CFMH alimente l'enroulement principal A' B' au travers d'une résistance R; l'autre, en traits fins, dérivé par une manette supplémentaire suit le trajet DG, traverse la bobine de self-induction, aboutit à la borne L et de là à l'enroulement auxiliaire C' D'; son retour se fait par le fil H commun aux deux bobinages. Le moteur peut donc démarrer.

Une fois que le rotor a pris sa vitesse, on bascule brusquement l'inverseur de *droite à gauche*, la résistance R est retirée du circuit ainsi que l'enroulement auxiliaire. Le courant alternatif venant des bornes A et B se rend directement par CM et DN aux bornes HK de l'enroulement principal; c'est la marche normale.

A ce moment, les résistances S, T, U intercalées entre les bagues du rotor peuvent être supprimées et la charge appliquée.

A l'arrêt, on ne devra pas oublier de manœuvrer le commutateur O, de façon à introduire cette résistance comme cela se pratique dans les moteurs diphasés ou triphasés.

Moteur asynchrone à courant alternatif simple à condensateur. — Nous avons vu (p. 162)

que pour faire démarrer un moteur asynchrone à courant alternatif simple ou monophasé on pouvait remplacer la bobine de self-induction S (fig. 88) introduite dans le circuit de l'enroulement ou de la phase auxiliaire par un condensateur.

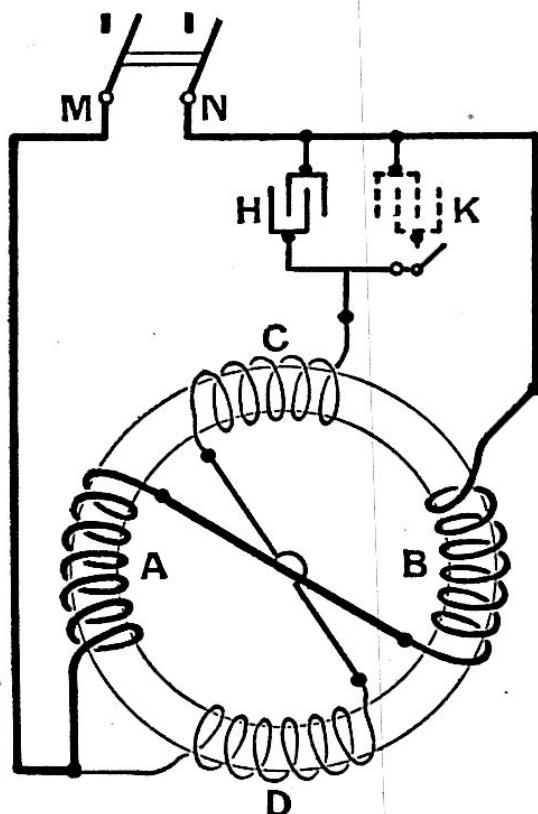


FIG. 90. — Schéma du montage d'un moteur asynchrone monophasé démarrant avec enroulement auxiliaire sur condensateur.

Il est évident, en effet, que le courant alternatif du réseau de distribution qui arrive en MN aussi bien dans la figure 88 que dans la figure 90 ci-dessus, a deux chemins qui lui sont offerts. L'un à travers l'enroulement principal AB du moteur dans les deux cas, l'autre chemin à travers l'enroulement auxiliaire CD, mais tandis que dans le cas de la figure 88 il passe auparavant dans la bobine de self-induction S qui

le retardé, dans le cas de la figure 90 il trouve sur son chemin le condensateur H qui l'avance¹. Or, que ce courant soit avancé ou retardé dans l'enroulement CD par rapport à celui qui passe dans l'enroulement principal AB, le résultat est identique, les maxima des deux courants n'ayant pas lieu en même temps il en résulte un champ tournant puisque ces courants deviennent analogues à des courants diphasés, le rotor du moteur se mettra donc en marche. Puis une fois lancé on pourra supprimer la self-induction ou le condensateur, il continuera à tourner en franchissant les points morts par la vitesse acquise comme le ferait une machine à vapeur à un seul cylindre sous l'effet de son volant.

Observons en passant que tandis qu'on supprime n général la self-induction une fois le moteur lancé, parce qu'elle吸orbe de l'énergie, son rendement n'étant pas parfait, on peut laisser le condensateur, qui, lui, ne consomme *rien* tout en contribuant à augmenter à la fois le couple et le facteur de puissance, ce qui est un gros avantage. On remarquera aussi que dans le cas du schéma de la figure 90 où le condensateur H tient la place de la bobine de self-induction S de la figure 88, il n'y a pas de résistance R, tout simplement parce que cette résistance qui était placée là pour augmenter le déphasage et limiter l'afflux de courant n'a plus autant sa raison d'être, le condensa-

1. On remarquera que nous avons figuré le condensateur dans toutes nos gravures par quatre traits ressemblant à deux peignes rentrant l'un dans l'autre au lieu de deux traits parallèles **=** comme on le fait d'habitude. En faisant cela nous avons voulu éviter une confusion qui se produit parfois avec la représentation d'une pile ou d'une coupure dans un circuit.

teur compensant automatiquement le courant magnétisant qui est pris au réseau dans le cas de la figure 88.

Il résulte de ces simplifications et surtout de l'amélioration du facteur de puissance¹ que réalise le condensateur que l'on tend à employer de plus en plus les moteurs à condensateurs. Si on ne l'a pas fait davantage jusqu'ici c'est que l'on ne disposait pas facilement de capacités assez grandes.

Condensateurs. — Ceci nous amène à dire un mot des condensateurs dont on trouvera une explication simple du fonctionnement à première vue mystérieux, dans *L'Electricité sans algèbre*².

En principe, les condensateurs sont constitués par de grandes surfaces conductrices séparées par un isolant. Ce seront des feuilles minces d'aluminium ou d'étain collées de part et d'autre d'une feuille de papier ou de mica ou même de verre, mais quel que soit l'isolant employé il devra être très mince, car la capacité d'un condensateur est d'autant plus grande que les plaques conductrices qui le constituent ont plus de surface et surtout sont plus rapprochées.

Cependant, si on prend un isolant trop mince on risque de le « crever »; en effet, la tension électrique qui existe entre les deux surfaces conductrices se porte tout entière sur l'isolant, et si ce dernier présente un point faible elle passe à travers sous forme d'éclat. Le condensateur est alors hors de service et doit

1. A. SOULIER, *L'Electricité sans algèbre*, p. 399.

2. Loc. cit., p. 386 et 400.

être remplacé, car une fois percé il ne joue plus son rôle. C'est parce que jusqu'ici on avait eu beaucoup de difficultés pour trouver un isolant homogène et résistant que ces appareils ne se sont pas répandus, néanmoins un « claquage » est toujours à craindre.

Fort heureusement, pour les tensions courantes de 110 ou 220 volts on arrive aujourd'hui à établir de bons condensateurs au papier dont le prix n'est pas prohibitif et, en outre, il a été réalisé d'autres condensateurs dits « électrolytiques » qui, eux, sont auto-réparables, ce qui leur a valu une grande quantité d'applications notamment pour les filtres utilisés en T. S. F.

Condensateurs électrolytiques. — Si l'on prend deux plaques en aluminium très pur et si on les plonge dans une solution pas trop concentrée de tartrate de potassium ou de sodium sans qu'elles se touchent en les reliant à travers un rhéostat à une source de courants alternatifs à 110 volts par exemple, on constatera que le courant, intense au début, diminue peu à peu, à tel point qu'au bout de quelques minutes on peut retirer le rhéostat. A ce moment c'est à peine si quelques bulles se dégagent, les plaques sont « formées ».

De telles plaques disposées dans un récipient approprié contenant une solution de borate d'aluminium formeront un condensateur qui ne claquera pas comme ceux au papier, si la tension s'élève, car il jouera à ce moment le rôle de soupape de sûreté. Un dégagement de gaz anormal signalera simplement la surtension dont l'appareil est le siège puis il reprendra ses qualités de condensateur une fois la surtension disparue.

Ce sont ces propriétés¹, jointes à celles d'un plus faible encombrement et d'un prix plus bas, qui ont fait préférer souvent les condensateurs électrolytiques aux condensateurs au papier dans les applications industrielles où l'on n'a besoin d'eux qu'un temps très court, comme pour le démarrage des moteurs à courant alternatif simple. Le schéma à employer sera celui de la figure 90 où le condensateur utilisé pour le démarrage, du type électrolytique par exemple, est représenté en pointillé en K, tandis que l'autre H qui pourra être au papier sera laissé en service continu afin d'accroître le couple moteur et de revaloriser le facteur de puissance qui, sans cela, ne serait pas très bon.

Moteurs mono-triphasés. — Poussant plus loin les choses on a même pu faire fonctionner des moteurs triphasés ordinaires (fig. 91) montés en étoile ou en triangle simplement en reliant deux des trois bornes (*c* et *b* par exemple) à une source de courant alternatif simple ou monophasé, la troisième borne *a* restée libre étant reliée à une des deux autres, *c* par exemple, par un condensateur *H* de capacité appropriée.

Un tel moteur démarre par simple fermeture de l'interrupteur, le circuit *bc* pouvant être assimilé à l'enroulement principal AB des figures précédentes et les autres enroulements *ab*, par exemple, correspondant à l'enroulement ou phase auxiliaire CD.

Le seul inconvénient d'un tel moteur est de n'avoir

1. A. SOULIER : Les condensateurs électrolytiques, *Revue générale de l'Electricité*, 30 janvier 1926, t. XIX, p. 175-181.

pas tout à fait la puissance qu'il aurait s'il était alimenté avec des courants triphasés à la même tension, mais le gros avantage est de ne nécessiter que deux fils au lieu de trois pour son alimentation et d'avoir un meilleur facteur de puissance grâce au condensateur H, un tel moteur est dit mono-triphasé puisqu'il réunit les qualités des deux systèmes.

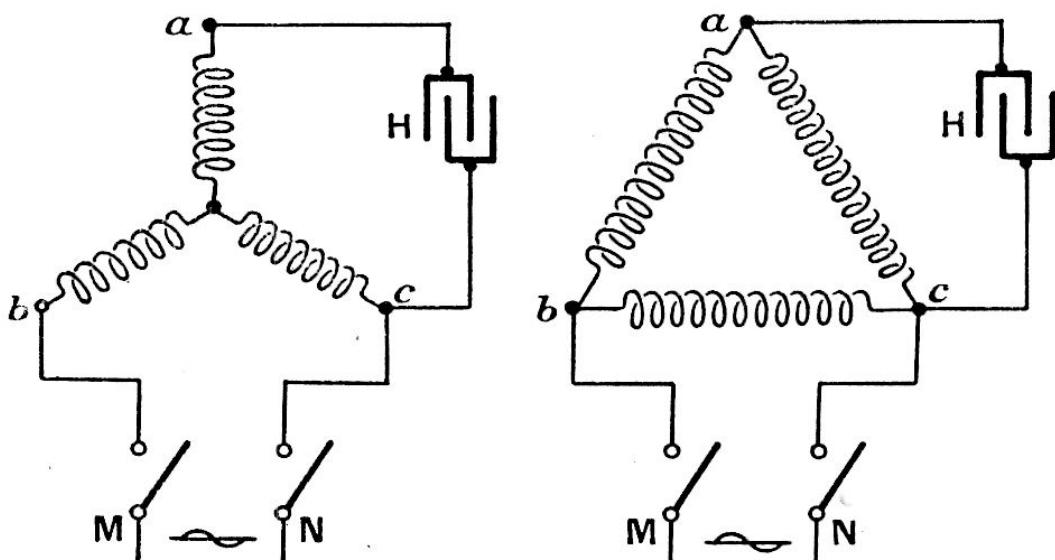


FIG. 91. — Schéma du montage permettant de faire fonctionner sur courant alternatif monophasé un moteur triphasé (étoile ou triangle) en utilisant un condensateur H.

Système de distribution mono-triphasé. —

Ce système, qui a été utilisé pour constituer de très puissantes locomotives (plus de 2 000 chevaux) en Amérique et qui est employé dans certains ateliers où l'on ne dispose que de courant alternatif simple ou monophasé, dérive très simplement du schéma du moteur précédent. Se basant sur ce que lorsque dans le circuit d'un des trois fils alimentant un moteur triphasé ordinaire un fusible vient à fondre, le moteur continue à tourner en monophasé et que, d'autre part, l'on retrouve, malgré la coupure existante dans un des

fils d'alimentation, des tensions décalées d'un tiers de période (comme avant la coupure) aux bornes du moteur, on a pu en reliant ce moteur ainsi lancé à d'autres moteurs triphasés mettre en marche ces derniers tout comme si les courants triphasés continuaient à alimenter la première de ces machines.

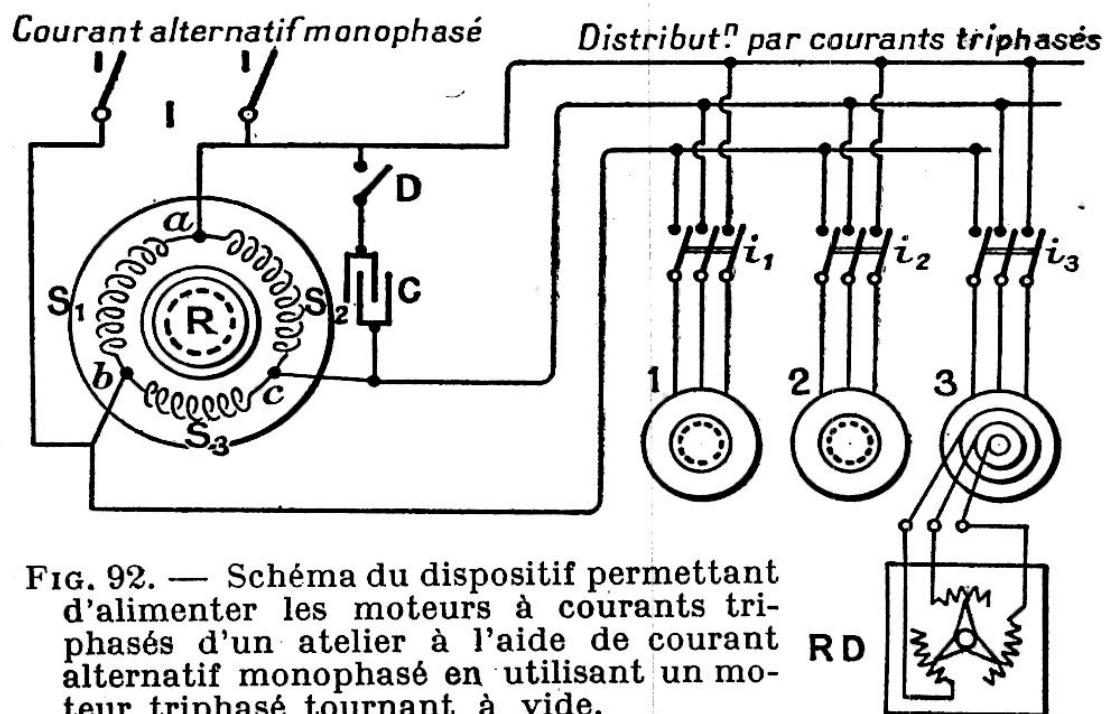


FIG. 92. — Schéma du dispositif permettant d'alimenter les moteurs à courants triphasés d'un atelier à l'aide de courant alternatif monophasé en utilisant un moteur triphasé tournant à vide.

Le schéma général d'un tel dispositif est très simple (fig. 92) : le courant alternatif simple ou monophasé d'une distribution d'énergie aboutit à l'interrupteur bipolaire I qui permet de lui relier les bornes *a* et *b* d'un moteur triphasé à rotor en cage d'écureuil, tandis que la troisième borne *c* est reliée à la borne *a* à travers un condensateur *C* à l'aide de l'interrupteur *D*. Le rotor se met en marche puisque nous avons réalisé le démarrage avec condensateur signalé précédemment, et aussitôt entre les bornes *a*, *b*, *c* on peut puiser des courants triphasés par une ligne à trois fils qui pourra

alimenter à son tour des moteurs triphasés ordinaires 1, 2, à cage par exemple, ou 3 à rotor bobiné.

Il est à remarquer que plus on met en marche de moteurs triphasés sur la ligne à trois fils et mieux on s'approche de la distribution par courants triphasés, parce que chaque moteur que l'on ajoute contribue à rétablir le léger déséquilibre provenant du manque d'alimentation directe du point *c* du moteur principal ou moteur « chef d'orchestre ». Pour cette raison aussi, ce moteur devra rester à vide, sans charge tout en n'étant prévu que pour une puissance inférieure à celle des autres moteurs de l'installation. Ce système a permis, en logeant le moteur R sur une locomotive, de l'alimenter à travers un transformateur par une ligne aérienne à 12 000 volts, le retour se faisant par les rails tandis que les moteurs actionnant les roues de la locomotive étaient du type triphasé et puisaient sur le moteur « chef d'orchestre » tournant à vide les courants triphasés dont ils avaient besoin. On avait ainsi l'avantage de n'avoir qu'un fil aérien d'alimentation tout en utilisant des moteurs nécessitant trois fils.

CHAPITRE IX

LES MOTEURS A COLLECTEUR A COURANT ALTERNATIF SIMPLE

Les moteurs asynchrones à cage d'écureuil ou à induit bobiné étudiés précédemment sont très précieux et particulièrement commodes pour l'utilisation de l'énergie électrique distribuée sur de vastes étendues, au moyen de courants alternatifs triphasés ou diphasés. Ces moteurs peuvent avoir leur stator bobiné pour n'importe quelle tension, en sorte qu'ils permettent l'emploi simple et économique de l'énergie électrique; ils sont de plus si faciles à manœuvrer que leur mise en marche peut être confiée au premier venu, c'est ce qui a fait leur succès.

Par contre, leur vitesse presque invariable, puisqu'elle reste toujours très voisine du synchronisme, les rend incommodes dans certaines applications, notamment pour la commande de certaines machines ou pour la traction électrique. On a cependant remédié un peu à cet état de choses, en particulier sur certains chemins de fer, en groupant en cascade plusieurs moteurs. Grâce à ce montage qui consiste à alimenter le stator d'un moteur par le courant triphasé à fréquence réduite provenant du rotor du moteur pré-

cédent, on arrive à réaliser deux vitesses, mais ce n'est pas suffisant et il ne faut pas perdre de vue, de plus, que le très faible entrefer que l'on est obligé de donner à ces moteurs pour leur conserver un bon rendement fait qu'ils sont fragiles et supportent mal les chocs continuels qu'ils doivent subir sur un train en marche.

Enfin il est à peine besoin d'insister sur la complication de fils qu'entraîne l'emploi de courants triphasés.

On comprend dès lors l'importance de plus en plus grande que prend le courant alternatif simple pour la traction électrique le long des lignes de chemin de fer; ce système, tout en permettant l'emploi de tensions élevées, ne nécessite plus qu'un fil aérien et un trolley, le retour se faisant par les rails. D'autre part, pour certaines applications domestiques, dans les appartements par exemple, on a intérêt à disposer de moteurs pouvant être alimentés par les deux fils d'une canalisation d'éclairage. Nous venons de voir que le moteur asynchrone avec condensateur permet d'arriver à ce résultat, mais il est à vitesse sensiblement constante et pour des applications qui réclament une vitesse variable on est conduit à employer d'autres machines. Les moteurs avec lesquels on a résolu le problème jusqu'ici sont des moteurs à *collecteur*; on peut les ramener à deux types principaux : le *moteur-série* et le *moteur à répulsion*.

Moteur-série à courant alternatif simple. — Si nous prenons un moteur à courant continu à excitation série et si nous le faisons traverser par un courant alternatif, il va se mettre à tourner. La chose

est facile à expliquer, puisque le courant changeant de sens en même temps dans l'inducteur et dans l'induit, les actions réciproques restent les mêmes. C'est en somme ce qui se passe lorsqu'on intervertit les attaches d'un moteur-série avec du courant continu, nous savons que le sens de rotation n'est pas changé. Il ne le sera que si l'on n'intervertit le sens du courant que dans un des organes seulement, soit dans l'induit, soit dans l'inducteur (fig. 19).

Grâce à sa simplicité, le moteur-série fut en effet le premier moteur à courant alternatif industriel; on l'utilisa il y a longtemps déjà pour actionner des ascenseurs, c'est celui qu'on emploie maintenant sous le nom de « *Moteur universel* ».

Le moteur shunt, lui, ne fonctionne pas du tout avec le courant alternatif, car au moment où le champ magnétique dû au courant traversant l'induit apparaît, le champ inducteur n'existe pas ou est très faible à cause du retard qu'introduit l'enroulement à fil fin, à forte self-induction; il ne se produit qu'un quart de période après, lorsque le champ induit est nul à son tour. Cependant l'auteur a pu arriver à réaliser de petits moteurs à caractéristique shunt en introduisant un condensateur de capacité appropriée dans l'enroulement en dérivation comme l'indique le schéma ci-dessous. Le condensateur, s'il

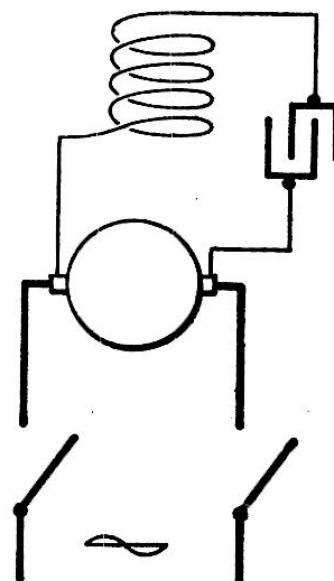


FIG. 93. — Fonctionnement d'un moteur shunt sur courant alternatif par l'introduction d'un condensateur dans l'inducteur.

est convenablement choisi, peut arriver à mettre « en phase » le flux magnétique alternatif sortant de l'inducteur avec celui de l'induit. On a alors un moteur qui ne s'emballe pas à vide et dont le facteur de puissance est meilleur que celui d'un moteur série. Malheureusement, la marche sur courant alternatif de ces moteurs, aussi bien série que shunt, est loin d'être aussi satisfaisante qu'avec le courant continu, les balais crachent constamment et on sait que les étin-

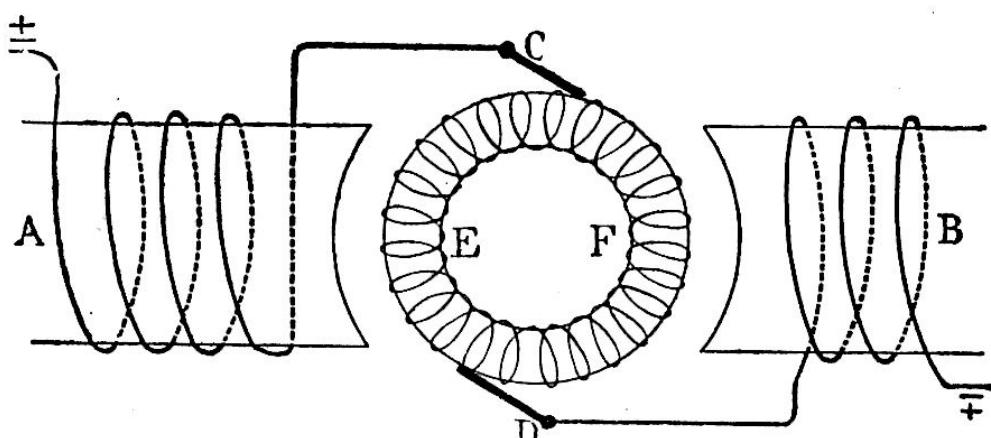


FIG. 94. — Moteur-série sur courant alternatif.

celles ainsi produites endommagent le collecteur. De plus, il devient nécessaire d'employer des inducteurs feuilletés, car le courant alternatif traversant les spires de l'enroulement-inducteur donne naissance dans les masses métalliques voisines à des courants alternatifs qu'on ne peut combattre que par un feuillettage soigné. L'amélioration de la commutation a du reste fait l'objet de longues études, et, en analysant les causes qui contribuent à la production d'étincelles, on est arrivé peu à peu à les atténuer et à rendre le moteur-série suffisamment pratique.

Examinons de près ce qui se passe dans un induit de moteur-série, un anneau Gramme, par exemple,

recevant du courant alternatif par ses balais CD (fig. 94 et fig. 95).

Ce courant se divise en deux parties égales circulant sur chaque moitié E et F de l'anneau. On peut comparer l'anneau à un double électro-aimant dont les pôles de même nom sont juxtaposés et se trouvent sous les balais.

Le courant alternatif amené par les balais va donc engendrer un champ magnétique, alternatif lui aussi, dont la direction des lignes de force sera telle que NM (fig. 95). C'est précisément ce champ alternatif qui rend la commutation mauvaise ; il développe dans les spires de l'anneau une force électromotrice de self-induction d'autant plus grande que la fréquence est plus élevée, le courant qui en résulte est décalé et la puissance du moteur diminuée. Il faut donc combattre ce champ, et le meilleur moyen est de l'annuler en produisant un champ magnétique identique et de sens opposé.

On y arrive de plusieurs manières, en particulier dans le moteur *Lamme* ; on dispose (fig. 96) un enroulement *abcdegh* autour des pôles inducteurs et on le fait traverser par le courant allant à l'induit. Il se produit un champ alternatif qui pourra être exactement de sens opposé à celui de l'anneau si les liaisons sont convenables et qui pourra le *compenser* exactement si les ampères-tours sont les mêmes.

Ce n'est pas tout, lorsqu'un balai réunit deux ou

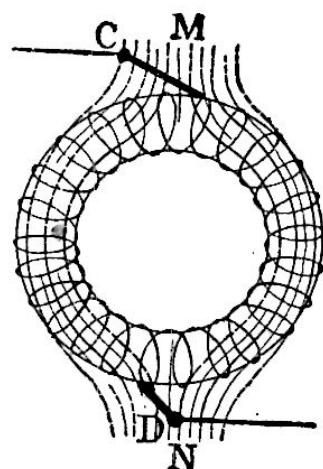


FIG. 95. — Réaction d'induit dans les moteurs.

plusieurs touches consécutives du collecteur, une ou plusieurs bobines de l'anneau sont ainsi mises en court-circuit, et comme elles se trouvent traversées par le champ magnétique alternatif des inducteurs, elles seront le siège d'un courant induit très intense.

Au moment où, par suite de la rotation, les touches abandonnent le balai qui les met en court-circuit, une étincelle de rupture se produira très forte et assez

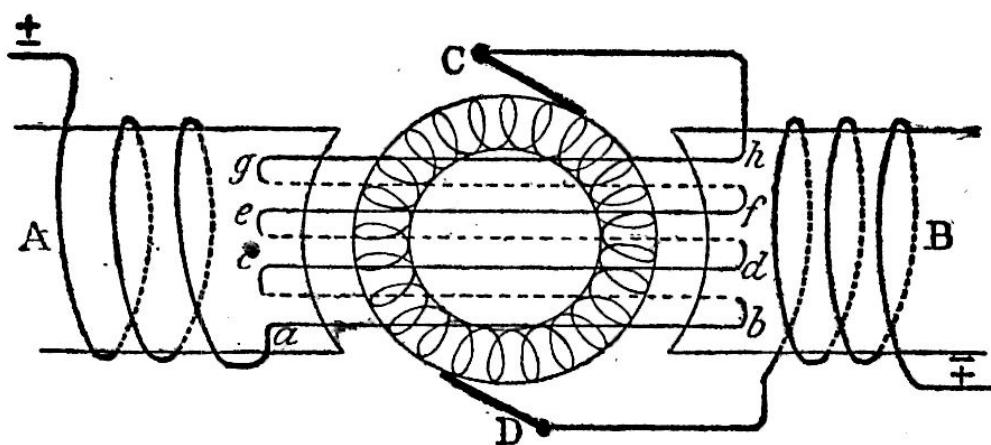


FIG. 96. — Moteur-série compensé.

destructive. On remédie à ce dernier inconvénient en reliant les bobines aux touches du collecteur par des connexions *résistantes* qui diminuent l'intensité des courants de court-circuit. Comme on emploie un grand nombre de bobines en général et qu'il n'y a jamais qu'une ou deux de ces connexions sur le trajet du courant principal, la perte n'est pas grande et se trouve en tout cas largement rachetée par un meilleur fonctionnement du collecteur.

Ces moteurs sont dits *moteurs-série compensés* à cause de la présence de l'enroulement auxiliaire dont le rôle est d'équilibrer ou de *compenser* la réaction d'induit. Les moteurs Lamme, tels que celui dont

nous venons d'exposer le principe, fonctionnent bien jusqu'à la fréquence de 25 périodes par seconde; or, en général, pour la traction électrique, on tend à employer des fréquences plus faibles encore.

Ces moteurs ont les mêmes qualités que celles du moteur-série à courant continu, leur démarrage se fait extrêmement facilement, en utilisant soit un rhéostat ou mieux un *auto-transformateur*¹ sur lequel on prend plus ou moins de spires suivant la vitesse à obtenir.

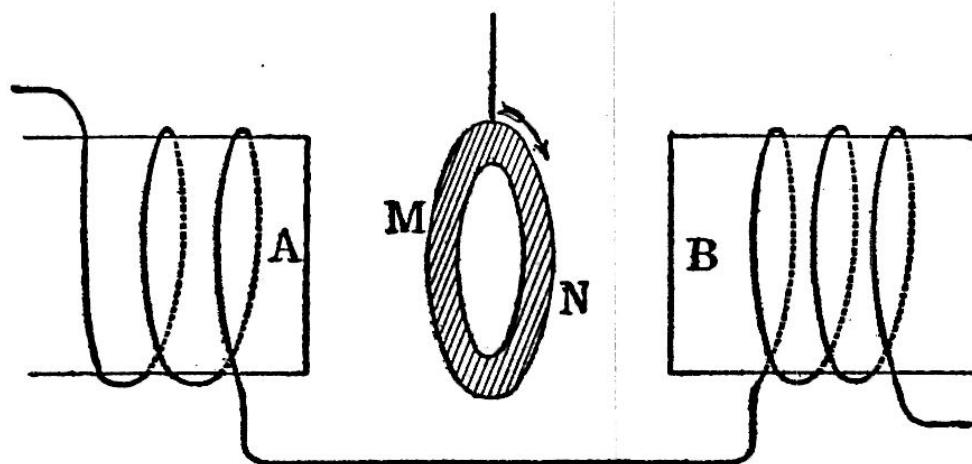


FIG. 97. — Fonctionnement du moteur à répulsion.

Moteur à répulsion. — Grâce à une expérience curieuse due à Elihu Thomson, on a pu réaliser d'autres moteurs à courant alternatif, dits à *récipulsion*, dont le fonctionnement est presque aussi bon que celui du moteur-série. Cette expérience, qui se rapproche de celle que nous avons indiquée figure 40, est la suivante. Si l'on place un anneau de *cuirre* MN, mobile autour de son diamètre, obliquement par rapport aux lignes de force d'un électro-aimant parcouru

1. Voir les *Installations électriques*, (13^e édition) par A. SOULIER, p. 235-236, Garnier frères, éditeurs.

par du courant alternatif, cet anneau tourne et *s'oriente* comme le ferait une aiguille aimantée. Le mécanisme de ce phénomène s'explique aisément : des courants induits, très intenses, prennent naissance dans cet anneau fonctionnant comme le secondaire d'un transformateur; ces courants produisent un champ alternatif qui réagit sur le premier en obligeant l'anneau à se redresser (fig. 97) de la même manière qu'était chassée la bague de la figure 40.

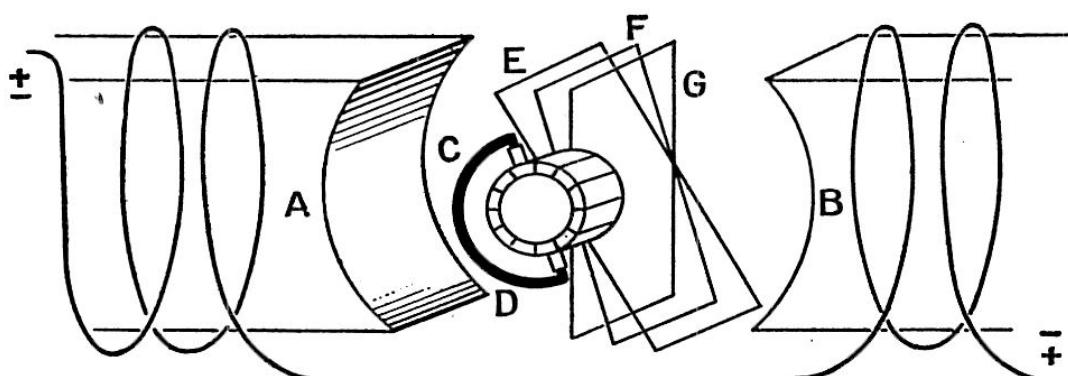


FIG. 98. — Schéma simplifié d'un moteur à répulsion.

Il devient facile de réaliser un moteur en utilisant ce phénomène ; disposons obliquement entre les pôles d'un électro-aimant, parcouru par du courant alternatif, plusieurs spires métalliques analogues à celles d'un induit à tambour et reliées aux touches d'un collecteur ; faisons appuyer deux balais sur ce collecteur que nous réunirons en court-circuit et l'induit tournera (fig. 98).

En effet, à mesure qu'elles sont mises en court-circuit, les spires tendent à se redresser comme l'anneau de cuivre précédent, et grâce à leur nombre, les impulsions successives ainsi obtenues finissent par produire un mouvement continu de rotation (fig. 98).

Ce moteur a sur le moteur-série compensé l'avant-

tage de ne pas nécessiter de connexions résistantes entre les bobines et le collecteur; il marche presque sans étincelles lorsqu'il atteint sa vitesse normale, mais il a comme principal inconvénient de donner un couple de démarrage plus faible que le moteur-série. Aux petites et aux grandes vitesses, il y a une mauvaise commutation et des étincelles au collecteur, en

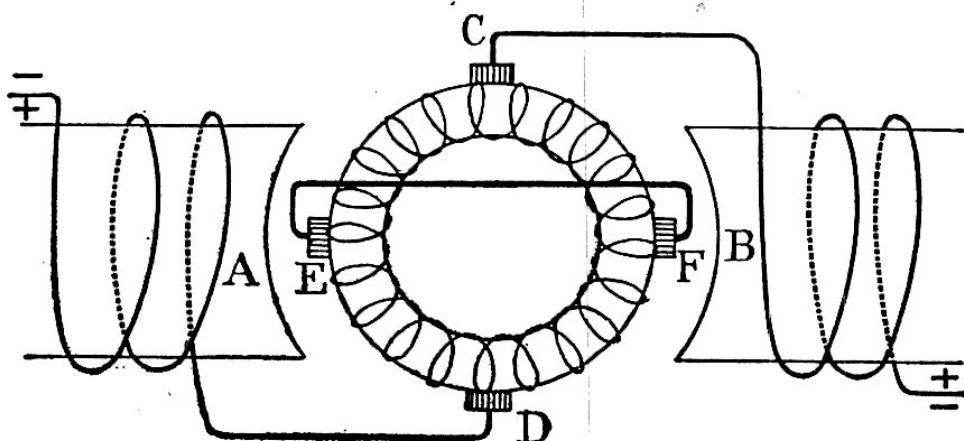


FIG. 99. — Schéma du moteur Latour.

sorte qu'il est rarement employé seul, sauf pour de petites puissances.

Moteur Latour. — Réunissons en un seul le moteur-série compensé et le moteur à répulsion, et nous aurons un excellent moteur à courant alternatif; c'est ce qu'a fait M. Marius Latour.

Le moteur Latour se compose d'un moteur-série ordinaire auquel on a ajouté sur le collecteur deux balais supplémentaires disposés entre les balais principaux et réunis en court-circuit.

Moteurs à coupleur. — Nous avons vu page 160 que le moteur asynchrone à courant alternatif simple

ou à courant monophasé démarre difficilement, à tel point qu'il faut utiliser un artifice spécial et en outre ne pas le charger avant qu'il ait pris sa vitesse. Cet inconvénient interdit son emploi dans certaines applications comme les ascenseurs, etc., ce qui a incité les constructeurs à améliorer ses conditions de démarrage.

Profitant de ce que le moteur à répulsion, c'est-à-dire le moteur à induit à collecteur avec balais en court-circuit, a un couple de démarrage plus élevé, on peut prendre pour certaines applications où il faut démarrer sous charge un moteur de ce genre, mais avec un dispositif utilisant la force centrifuge qui met intérieurement l'enroulement induit en court-circuit une fois la vitesse normale obtenue.

On obtient ainsi un moteur qui a l'avantage des deux systèmes sans en avoir les inconvénients, c'est-à-dire qu'il démarre sous charge en moteur à répulsion, puis au lieu de s'emballer comme ce dernier, il devient un moteur asynchrone à vitesse sensiblement constante par la mise en court-circuit intérieure de son enroulement induit. Cette manœuvre peut se faire avec un dispositif analogue à celui décrit page 153. Dans ce but, trois câbles (fig. 100) aboutissant à trois points équidistants sur le rotor ou induit traversent l'arbre et arrivent à un coupleur qui les met en court-circuit progressivement. Deux maslettes mobiles en laiton B, C, l'une C plus *lourde* que l'autre B sont enfilées sur une tige de guidage et peuvent se déplacer du centre vers l'extérieur sous l'effet de la force centrifuge. Elles portent chacune deux blocs en charbon reliés à l'aide de boudins en fil souple à la masse du coupleur qui communique avec un des câbles A venant de l'induit.

Ces blocs en charbon peuvent venir toucher à leur fin de course des pièces fixes également en charbon D et E en relation avec les deux autres câbles venant de l'induit.

Le fonctionnement se devine : au repos, chacune des masselottes est poussée vers le centre par un ressort enfilé sur une des tiges de guidage. Dès que le rotor commence à prendre de la vitesse, la masselotte la plus lourde C est projetée contre F et G où

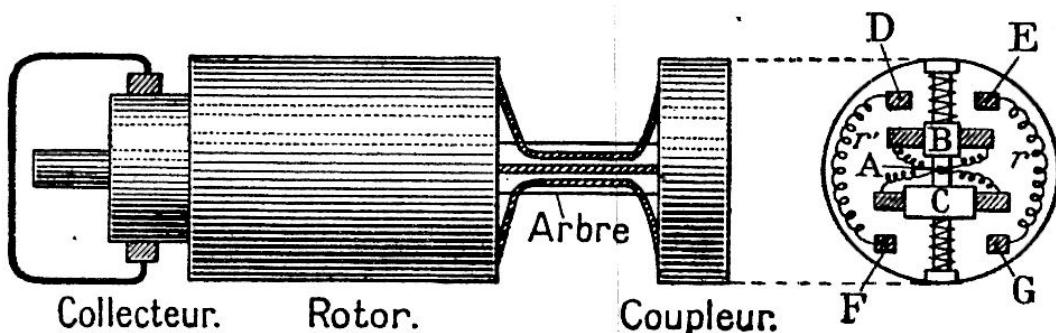


FIG. 100. — Moteur à répulsion et à coupleur.

elle vient réunir les trois câbles à travers une résistance rr' montée derrière le coupleur. Puis, quand la vitesse devient suffisante, la deuxième masselotte B, la plus légère, part à son tour et met cette fois en court-circuit franc à la masse en D et E les trois câbles venant du rotor. Le moteur se comporte alors comme un moteur asynchrone et sa vitesse ne peut dépasser le synchronisme. Si par hasard la vitesse vient à diminuer, au lieu de caler, le moteur continue à marcher en moteur à répulsion, les masselottes ayant au moment voulu supprimé la mise en court-circuit intérieure du rotor.

CHAPITRE X

APPLICATION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES A LA COMMANDE ÉLECTRIQUE DES MACHINES-OUTILS

De plus en plus, on tend aujourd’hui à adopter les moteurs électriques dans les ateliers, ce qui permet de supprimer les transmissions lourdes et encombrantes.

Les avantages d'une telle transformation sont les suivants :

A. — Centralisation de la production de la force motrice, d'où il résulte que :

1^o Il est possible d'acheter cette force motrice à l'extérieur, l'industriel étant ainsi dispensé d'une installation spéciale dont le souci est en dehors de sa fabrication ;

2^o Si l'industriel veut produire lui-même sa force motrice, il pourra avec les transmissions électriques placer ses machines génératrices à l'endroit le plus favorable au point de vue de l'approvisionnement en eau et en combustible, au besoin dans un bâtiment spécial indépendant. De plus, il pourra employer des machines motrices moins puissantes, ayant meilleur rendement et demandant un personnel moindre.

Enfin, dans les anciennes usines, les espaces laissés

libres par la suppression des machines motrices deviennent disponibles pour des extensions.

B. — L'unification du service d'éclairage et de celui de force motrice grâce à l'emploi d'une dynamo unique alimentant les deux circuits.

L'éclairage électrique présente lui aussi dans les ateliers de sérieux avantages : il est moins coûteux que le gaz et surtout moins dangereux ; il est plus hygiénique et permet l'usage de lampes portatives et mobiles.

C. — La commande électrique permet en outre de rendre les divers ateliers d'une même usine indépendants les uns des autres ; on peut ainsi en profiter pour isoler les ateliers dangereux.

Enfin, les transmissions sont simplifiées d'autant plus que la commande est plus subdivisée ; elles sont peu encombrantes, sans danger ; les moteurs peuvent être placés de la façon la plus profitable, suspendus aux murs, aux colonnes ; ils n'occasionnent aucune gêne pour la fabrication.

D. — Dans chaque atelier, les différentes sections deviennent indépendantes, avec comme conséquences que :

1^o La division du travail peut être poussée aussi loin qu'il convient ;

2^o Les machines sont facilement accessibles ;

3^o Il est possible d'employer des machines de transport spéciales, telles que : ponts-roulants, grues, chariots, monorails, locomotives, etc.

E. — Les machines sont indépendantes, ce qui permet :

1^o L'utilisation rationnelle et économique de l'outillage ;

2^o La suppression des transmissions, ce qui entraîne un relèvement du rendement, des dépenses d'entretien moindres, une réduction de prix et la disparition d'une source de dangers.

Augmentation du rendement. — Réglage de la vitesse. — Il a été démontré pratiquement que le rendement moyen d'une transmission mécanique ne dépasse 50 pour 100 qu'exceptionnellement dans de bonnes conditions de charge¹.

La commande par moteurs électriques individuels permet d'atteindre un rendement de 70 pour 100; de plus, à l'inverse de ce qui arrive avec les transmissions par courroie où les pertes sont constantes, on obtient avec l'organisation électrique une diminution des pertes avec la charge, par suite de l'arrêt des moteurs correspondants, en sorte que le rendement reste toujours aussi bon.

Les exemples cités à l'appui de ces chiffres sont trop nombreux et trop longs pour être mentionnés ici.

La question du réglage de la vitesse est extrêmement importante, car d'elle dépend fréquemment le choix du mode de commande : par groupe ou moteurs individuels.

On peut dire que, d'une façon générale, la commande électrique individuelle s'impose lorsqu'on veut obtenir de grands variations de vitesse.

C'est du reste à ce mode d'actionnement que correspondent les avantages énumérés ci-dessus ; il serait d'un usage exclusif si ce n'était le prix d'achat.

1. *L'Industrie électrique*, n° 412 du 25 février 1909.

On ne peut cependant jamais dire que ce système revienne plus cher que la commande par groupe ; il y a lieu en effet de tenir compte des grandes économies d'emplacement et des grandes facilités d'utilisation que procure la suppression des arbres et des courroies, au point de vue des frais d'installation, et sous le rapport des dépenses d'exploitation de l'accroissement de production qui en résulte.

Chaque cas doit en somme faire l'objet d'un examen spécial en tenant compte des coefficients de vitesse et d'activité des machines.

A ce sujet, il y a lieu de distinguer trois catégories de machines-outils :

1^o Celles où la puissance reste constante, mais où il y a de grandes variations de vitesse : *tours, alésoirs, fraiseuses, machines à percer* ;

2^o Celles dont la vitesse est sensiblement constante, mais qui sont soumises à de grandes fluctuations de charge ou à des démarriages fréquents : *poinçonneuses, cisailles, machines à cintrer, pilons* ;

3^o Machines qui exigent un renversement du sens de marche d'une masse assez grande, telles que les *raboteuses, mortaiseuses*, etc.

La commande électrique par moteurs individuels permet d'améliorer le fonctionnement des machines-outils et correspond à une augmentation de production, parce qu'elle assure une grande amplitude de variation de vitesse et un arrêt plus rapide sans danger d'accident.

Choix du courant. Choix des moteurs. — Les courants alternatifs, triphasés surtout, étant ceux

- que l'on choisit le plus souvent actuellement pour la distribution de l'énergie, c'est généralement sous cette forme qu'on emploie le courant électrique dans la plupart des ateliers.

Les moteurs triphasés ont pour eux l'avantage de la simplicité; on les construit sans bagues jusqu'à 1 ou 2 chevaux mais, dans ce dernier cas, on ne peut les employer que lorsque les démarrages se font à vide ou à faible charge. On emploie des moteurs à rotor bobiné et à bagues pour des puissances supérieures à 2 chevaux, le seul inconvénient des moteurs asynchrones est la faible variation de vitesse que l'on peut obtenir d'eux, ce qui oblige pour certaines applications à utiliser des moteurs de ce genre à nombre de pôles variables ou à grouper les moteurs en cascade comme on l'a fait sur certaines locomotives à courant triphasé.

Pour cette raison, les moteurs à courant continu sont souvent préférables, ce qui conduit quelquefois à transformer une partie du courant alternatif en continu pour obtenir plus de souplesse.

Si on veut tirer du moteur shunt à courant continu tous les avantages que procure la variation de vitesse par introduction d'un rhéostat dans le circuit d'excitation (voir p. 32), on est conduit à employer des moteurs avec pôles auxiliaires qui fonctionnent alors sans étincelles aux balais, quelle que soit la variation de vitesse introduite par le rhéostat d'excitation.

L'apparition des étincelles tient en effet à ce que lorsqu'on affaiblit le champ inducteur pour provoquer une augmentation de la vitesse de l'induit, on déplace la région neutre, et comme on ne peut pas

pratiquement déplacer les balais chaque fois, il se produit des étincelles¹.

Les moteurs à pôles auxiliaires se construisent pour des tensions de 110 à 500 volts; ils permettent une variation de vitesse de 4 à 1, en agissant sur l'excitation seule avec un très bon rendement; ils conviennent donc très bien à la commande individuelle et permettent d'obtenir toutes les vitesses que réclame la machine-outil, mais ils demandent à être bien montés (voir p. 23).

Si la variation doit être supérieure au rapport de 1 à 4, il est généralement préférable d'adopter un changement de vitesse mécanique quoique, à la rigueur, on puisse obtenir avec le moteur des vitesses variant de 1 jusqu'à 6.

Dans quelques installations importantes, on a adopté, mais cet exemple ne paraît pas devoir être suivi, des distributions à 3 ou 4 fils dans le but de permettre une meilleure variation de vitesse; le réglage par variation du nombre de pôles ne donne qu'un rendement plutôt faible, les appareils sont en outre assez coûteux.

Installation. — Le moteur électrique tournant en général à une vitesse relativement grande, il devient nécessaire d'interposer une transmission mécanique

1. Le déplacement de la ligne neutre se produit parce que le courant circulant à cet instant dans l'induit a une tendance à augmenter; comme cet induit se comporte comme un vrai électro-aimant, ses lignes de force magnétique se composent avec celles de l'inducteur et comme ces dernières sont affaiblies c'est l'induit qui l'emporte et déplace la région neutre; l'emploi des pôles intermédiaires excités par le courant total contre-balance la réaction de l'induit et fait que le calage ne change plus.

entre le moteur et la machine-outil en vue de réduire la vitesse de l'outil à sa valeur la plus convenable.

De plus, dans une grande usine, on a intérêt à avoir des moteurs à grande vitesse normale, de façon à employer un même modèle pour les diverses machines, le rendement reste en somme assez bon, et l'on n'a pas besoin d'avoir en réserve une multitude de pièces de rechange.

Quatre genres de transmission sont généralement utilisés : la courroie, éventuellement avec galet enrouleur système Lénix ; l'engrenage, pour des rapports de vitesse allant à 5,6 ou même à 8 ; la chaîne Morse, dite silencieuse, et la transmission Evans.

La transmission par vis sans fin, encore peu employée, peut être utilisée dans certaines applications.

La puissance absorbée par la plupart des machines-outils de la première catégorie (voir p. 189) varie à peu près proportionnellement à la quantité de métal enlevée : d'après M. Campbell, on peut compter : Puissance du moteur en chevaux = $k \times$ poids du métal enlevé en demi-kilogramme par minute, k étant un coefficient qui dépend de la nature du métal travaillé, et qui est de 2,5 pour l'acier dur; 2 pour le fer forgé, 1,8 pour l'acier doux, 1,4 pour la fonte.

C'est ainsi qu'un tour ou une machine à percer qui aura à travailler de l'acier, en enlevant par exemple un kilogramme de métal par minute, devra être pourvu d'un moteur dont la puissance en chevaux sera :

$$P = 2,5 \times 2 = 5 \text{ chevaux},$$

le poids du métal enlevé, un kilogramme, représente en effet deux fois un demi-kilogramme.

Cette formule n'est évidemment qu'approximative; appliquée à l'étude de l'organisation des ateliers américains de la *Pittsburg and Lake Erie Railroad Co.*, chez M. *Mc. Kees Rock*, etc., pour plus de quatre-vingts machines, elle a donné des résultats complètement satisfaisants en pratique.

La puissance du moteur nécessaire dépend de la construction de la machine, du rapport des vitesses, des organes de transmission, etc., mais comme ce n'est qu'aux grandes vitesses que les pertes sont les plus grandes, et qu'elles ne sont pas employées en général pour le travail indiqué plus haut, on peut pour les tours, machines à percer, alésoirs, etc., se contenter de la formule ci-dessus pour choisir la puissance du moteur à employer.

Pour les machines des deuxième et troisième catégories, la puissance absorbée ne dépend pas directement de la quantité de métal enlevé; il en est surtout ainsi pour les machines réversibles où le changement de sens de marche se produit par l'intermédiaire de la courroie (raboteuses, etc.).

L'observation de ces machines montre que ce n'est pas tant le poids des tables qui entre en jeu dans l'inertie au moment du renversement de la marche, mais plutôt celui des poulies que l'on devra prendre aussi minces et aussi légères que possible à la périphérie. De plus, l'un des axes intermédiaires, parmi ceux qui tournent toujours dans le même sens ou, de préférence, l'axe du moteur, doit être pourvu d'un volant de grand diamètre et à jante lourde pour uniformiser le mouvement.

D'après des expériences répétées, sur une raboteuse actionnée par un moteur de 20 chevaux, la

puissance demandée pour la marche en avant était de 3,9 chevaux, au moment du renversement; elle s'élevait à 19; pendant le retour rapide, elle atteignait 6,3 et au renversement 27; le volant était trop faible.

Au point de vue de l'installation, c'est-à-dire de la position à donner au moteur, dans le cas de la commande individuelle, on est d'accord pour ne pas le placer à une trop grande hauteur; il convient de conserver aux machines toute leur stabilité et d'éviter les *vibrations* très nuisibles pour un travail tant soit peu précis.

Il est bon toutefois que les moteurs soient mis assez haut pour ne pas être dans le chemin des ouvriers et en même temps facilement accessibles pour l'entretien.

Pose des fils. — Pour amener le courant aux moteurs disposés sur les machines-outils et aux appareils de manœuvre, il est bon de ne pas perdre de vue que l'on devra prendre des précautions toutes spéciales pour l'isolation et la protection mécanique de ces fils¹.

Comme on est conduit à faire suivre aux conducteurs les contours du bâti métallique de la machine-outil (fig. 101), on devra prendre des fils à isolation fort (1 200 mégohms par kilomètre) que l'on passera dans des tubes d'acier coudés à la demande, ou mieux on emploiera des câbles armés, ou même du type PFT (c'est-à-dire sous tube étanche en plomb

1. Voir les *Installations électriques*, 13^e édition, par A. SOULIER, p. 123-128, Garnier frères, éditeurs.

recouvert d'une spirale en acier ou feuillard, le tout recouvert d'une tresse goudronnée).

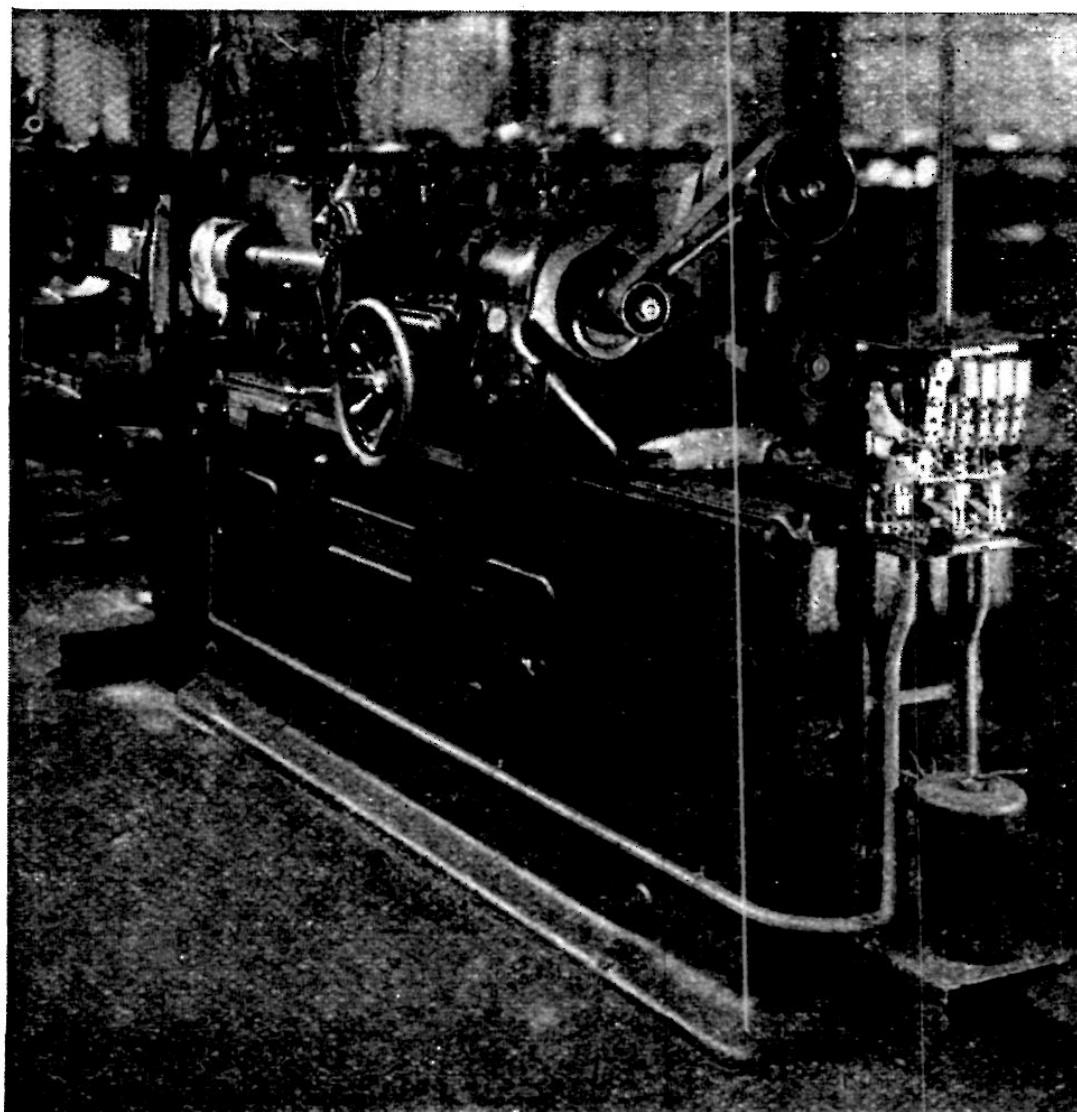


FIG. 101. — Machine-outil à commande électrique par boutons.

Au premier plan à droite, la boîte des contacteurs ouverte. Près du chariot, à gauche, les boutons de commande reliés à la boîte des contacteurs par des canalisations suivant le bâti sous tubes d'acier.

En somme, si l'on veut faire l'installation en règle d'une machine-outil mue électriquement, on devra

tout d'abord choisir l'emplacement du moteur et de l'appareil de mise en marche; une fois les appareils installés, on déterminera l'endroit exact du passage des fils et on coudera les tubes suivant le parcours choisi. Ces tubes seront pris d'un diamètre intérieur tel que les fils puissent être passés librement après la pose du tube.

Pour obtenir des coudes bien ronds et pour ne pas aplatis le tube dans les angles, on devra utiliser des appareils à cintrer les tubes (*voir Installations électriques*, 13^e édition, par A. SOULIER, p. 113).

Les tubes sont maintenus en place par de petites brides vissées sur le bâti de la machine; cette façon de procéder permet d'obtenir des installations robustes et avec lesquelles aucun court-circuit n'est à craindre, à condition toutefois que les fils soient eux-mêmes très bien isolés.

Pour introduire les fils dans les tubes, on passe d'abord un ruban ou un fil d'acier auquel on attache les fils et que l'on tire ensuite, les fils sont ainsi posés assez facilement.

On peut aussi employer des tubes Bergmann en carton isolant recouvert d'une armure de cuivre ou de tôle; les installations ainsi faites sont bonnes mais plus fragiles que celles sous tubes d'acier ou en câble armé.

Chaque machine a son circuit protégé par un coupe-circuit, ou mieux un disjoncteur automatique (servant le plus souvent en même temps de contacteur pour être commandé à distance)¹. La pratique

1. Voir *les Installations électriques*, par A. SOULIER, p. 41 à 47, Garnier frères, éditeurs.

montre que ce dernier appareil est préférable; en effet, si les démarriages sont un peu brusques, l'afflux subit de courant fait sauter le plomb fusible et son remplacement demande un certain temps, ce qui immobilise la machine.

Avec le disjoncteur automatique, au contraire, la remise en place se fait très rapidement et sans difficulté, par l'ouvrier lui-même en appuyant sur un bouton.

Il est d'usage de placer sur la dérivation de courant alimentant plusieurs machines et à l'entrée de la canalisation dans les tubes ou à tout autre endroit d'accès facile, un disjoncteur-automatique réglé pour déclencher avec une intensité égale au double ou au triple du courant normal par exemple. De cette façon, les machines sont protégées, et si le disjoncteur saute, l'ouvrier prévenu modérera sa manœuvre et en tout cas le remettra en place très facilement. On devra simplement veiller à ce qu'on ne *cale* pas le disjoncteur, ce qui serait aussi grave en somme que de caler les soupapes de sûreté d'une machine à vapeur.

On se rappellera que, de même que les dynamos, les moteurs électriques doivent toujours être à l'abri de l'humidité ainsi que des poussières et de la fumée; on choisira de préférence les moteurs blindés ou enfermés pour le montage sur les machines-outils.

Le graissage doit être automatique; en général, il est assuré par des bagues; les balais en charbon doivent être choisis de bonne qualité, de façon à ne pas s'échauffer et calés de façon à ne pas donner lieu à des étincelles.

Enfin, les appareils de démarrage doivent être

placés à la portée de l'ouvrier chargé de les manœuvrer (fig. 102); ils devront être entretenus en bon

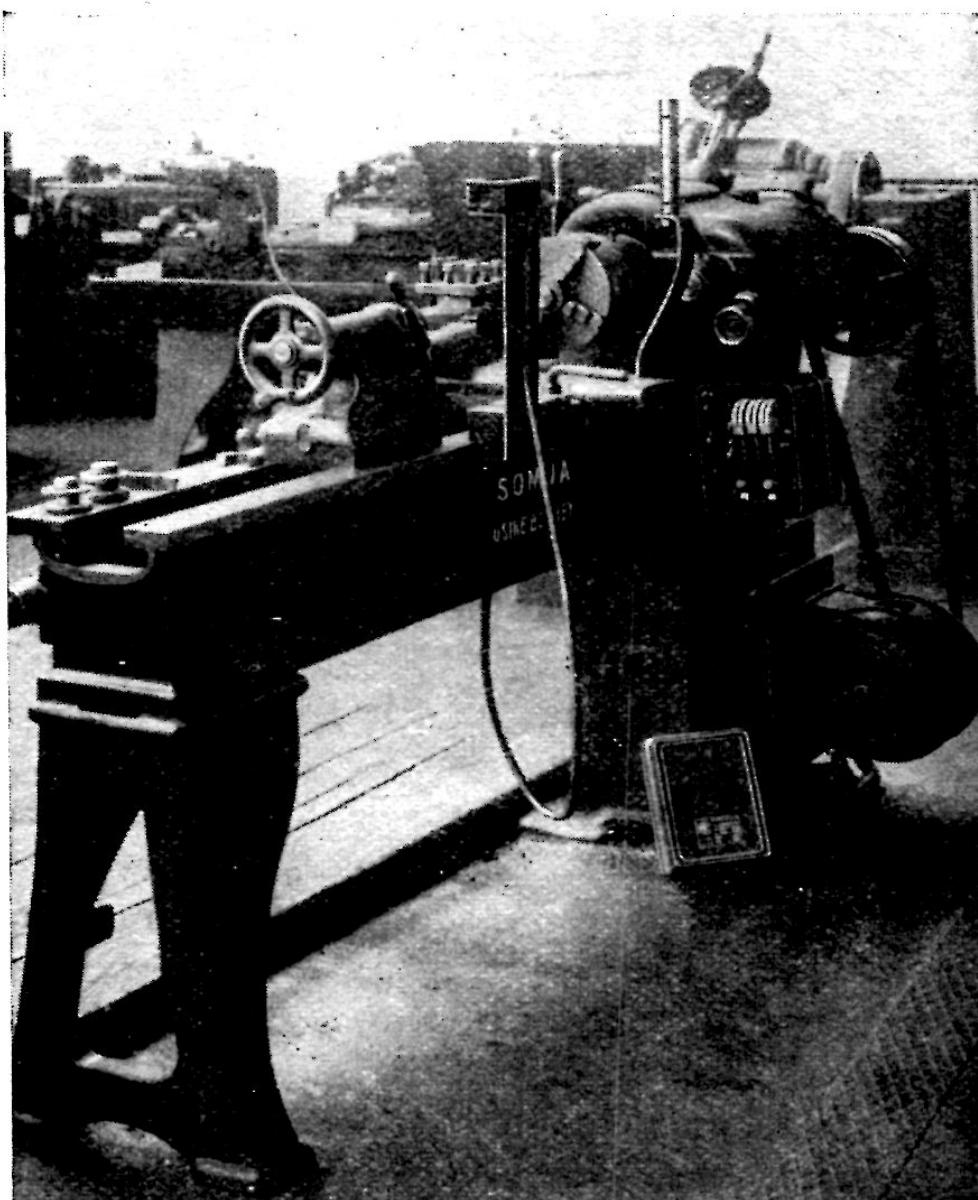


Photo "Télémechanique électrique"

FIG. 102. — Commande électrique d'un tour moyen, à l'aide de boutons se déplaçant avec le chariot et reliés par un câble souple à la boîte des contacteurs figurée ouverte au-dessus du moteur.

état; on devra veiller, en particulier, à ce que les contacts restent toujours en bon état.

Périodiquement, en moyenne tous les mois, on devra visiter les moteurs, enlever la poussière, nettoyer le collecteur et les porte-balais, s'assurer que les fils sont bien serrés sous les bornes et que l'huile est toujours propre et au niveau voulu dans les paliers.

Combinaison des moteurs avec les machines-outils. — Dans les premières installations de commande électrique des machines-outils, on s'est contenté de prendre les machines-outils telles qu'elles existaient pour la commande par courroie et de leur adapter un moteur électrique.

La tendance actuelle est de combiner la construction de la machine-outil de telle façon qu'elle soit faite pour le moteur qu'elle doit recevoir; on obtient ainsi un ensemble plus compact et de fonctionnement plus satisfaisant.

Parmi toutes les machines-outils actionnées électriquement, les machines à percer méritent une mention spéciale, car le moteur électrique a donné lieu, dans ce cas, aux solutions les plus élégantes et les plus nombreuses.

Les machines à percer sont en général peu compliquées et, pour cette raison, on a pu les combiner avec le moteur électrique d'une façon simple et fort rationnelle.

Ce dernier par sa légèreté et sa robustesse convient parfaitement à ces machines, ce qui permet d'avoir un ensemble dont la manœuvre est commode et rapide, susceptible d'utiliser tous les avantages du moteur électrique.

Dans les perceuses à colonne qui sont, on peut le

dire, le modèle le plus courant, le moteur électrique est placé en général sur le socle de la machine d'où il transmet son effort à une série de cônes par un train d'engrenage réduisant sa vitesse (fig. 103).

Dans d'autres machines à percer, de construction plus moderne, le moteur est monté sur la colonne avec laquelle il fait corps ; il communique son mouvement au porte-foret par l'intermédiaire d'une boîte de changement de vitesse par engrenages ; un petit levier placé à la portée de l'ouvrier permet d'obtenir instantanément, pendant le perçage du trou, six vitesses différentes qui correspondent à un avancement différent du foret.

La puissance nécessaire des moteurs varie de 1,5 à 3 chevaux suivant la grandeur de la perceuse.

Dans bien des cas, on emploie des perceuses *suspendues*, leurs avantages sont évidents. Ainsi, par exemple, dans les chantiers maritimes, dans les ateliers de construction de wagons, où l'on a à travailler des pièces lourdes et difficilement transportables, et où l'on doit percer des trous en très grand nombre et dans toutes les directions, on ne peut se passer de perceuses suspendues.

Dans les ateliers de ponts en fer ou de constructions métalliques, ces appareils sont également très précieux, car ils permettent de simplifier le travail et d'aller vite.

Ces machines sont portées par un chariot qui se déplace sur les poutres maîtresses d'un pont-roulant ; elles sont commandées par un électromoteur logé à la partie supérieure et dont le mouvement est transmis au foret à l'aide d'une tige tournant dans une colonne verticale. Le mouvement transversal du cha-

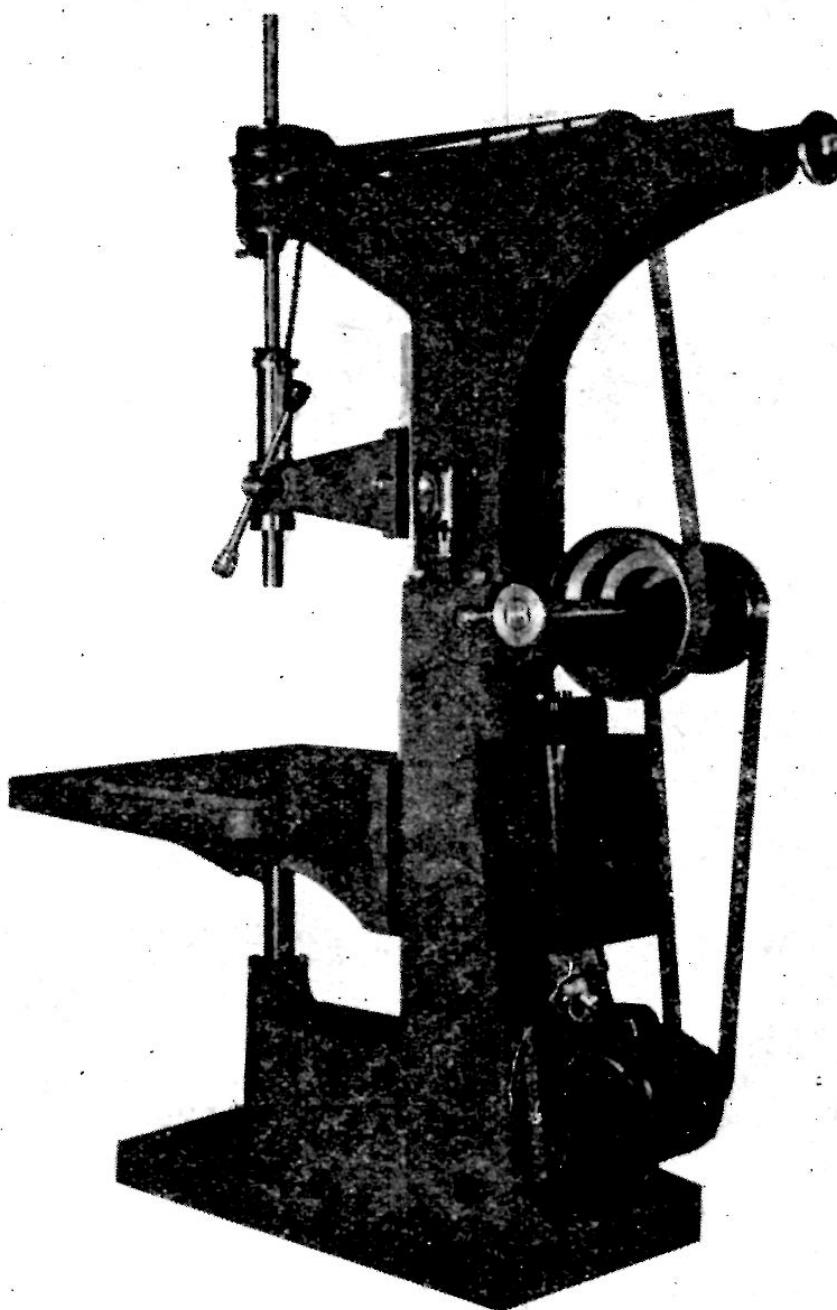


Photo V.H.B.

FIG. 103. — Machine à percer.

On voit le moteur dans le bas actionnant un cône pour changements de vitesse. Au-dessus du moteur le contacteur de mise en marche et sur le bâti à portée de la main, les boutons de commande.

riot est obtenu à l'aide d'une chaîne que l'on manœuvre du sol, le mouvement longitudinal du pont roulant étant le plus souvent donné par le moteur au

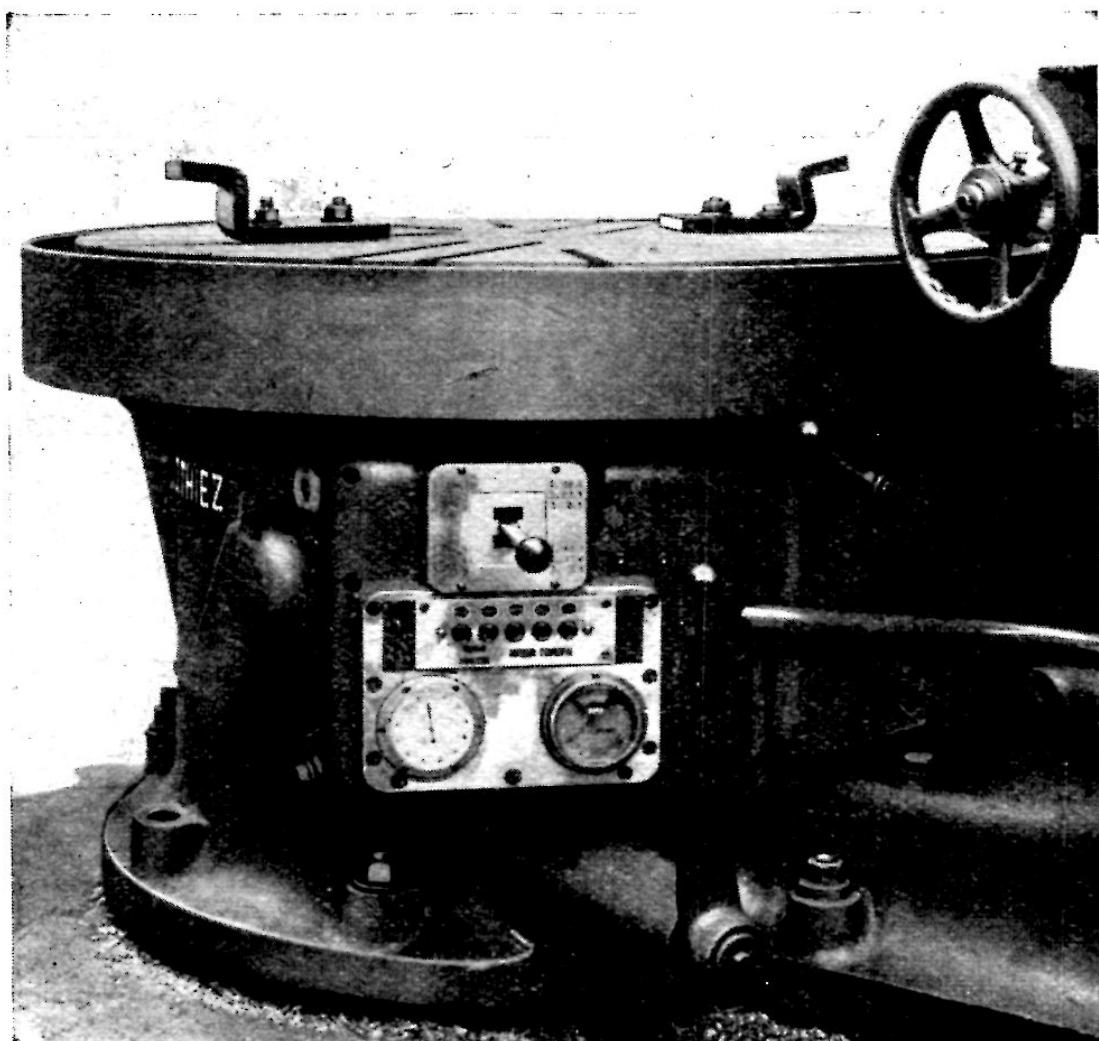


Photo "Télémechanique électrique"

FIG. 104. — Tour vertical.

Sur le bâti, le tableau de commande électrique des contacteurs par boutons ; au-dessous, un tachymètre et un ampèremètre.

moyen d'un dispositif très simple d'embrayage et de débrayage.

Nous pourrions passer en revue les diverses machines-outils pour lesquelles la commande électrique

a permis d'introduire de sérieuses simplifications (fig. 104 et 105) et avec lesquelles la production

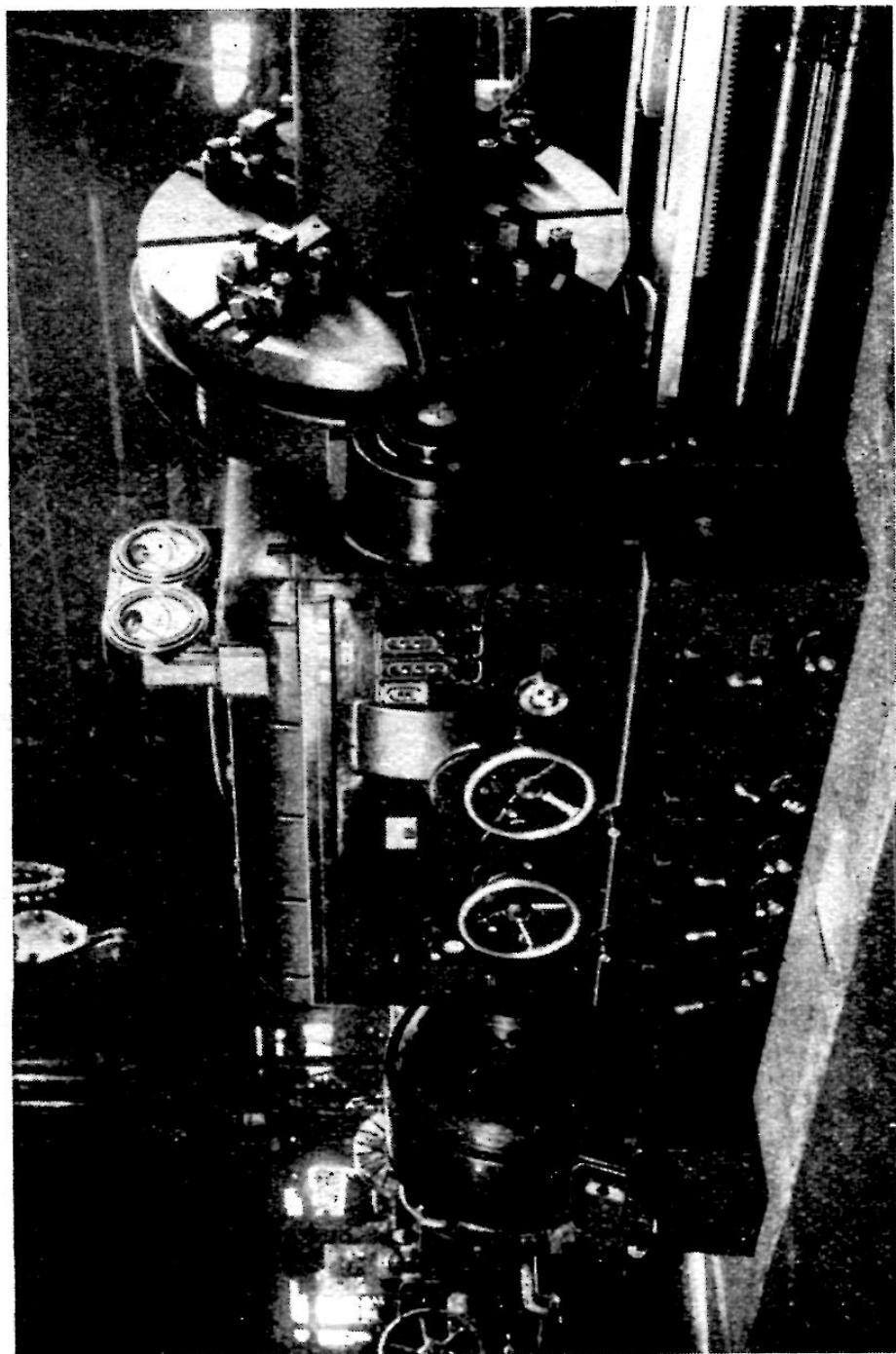


FIG. 105. — Gros tour à commande électrique par boutons.
A gauche, le moteur; au centre, les boutons de commande. Au-dessus des appareils de mesure permettant de se rendre compte des courants absorbés suivant le travail demandé.

s'est trouvée considérablement augmentée, mais nous serions entraînés dans des développements trop

considérables et un volume n'y suffirait pas. En général, toutes les industries tendent à employer aujourd'hui le moteur électrique dont les qualités de simplicité, de robustesse et de commodité ne sont plus mises en doute par personne.

Commande par boutons et contacteurs. —

Signalons la commande par boutons-poussoirs qui se généralise de plus en plus. Afin de laisser à l'ouvrier ses mains libres et de ne pas l'astreindre à manipuler des manettes de rhéostats pour mettre en marche sa machine ou pour l'arrêter, on a fait pour les machines-outils ce que l'on a fait pour les ascenseurs, c'est à l'aide de deux ou trois boutons tenant très peu de place sur la machine-outil et à portée de la main de l'ouvrier que l'on provoque la « marche », l'« arrêt » ou dans certains cas l'inversion de marche du moteur. Ce résultat est obtenu à l'aide d'électro-aimants appelés « contacteurs » (fig. 106) dans lesquels on envoie un courant en appuyant sur un bouton. L'électro-aimant attire son armature qui entraîne les pièces mobiles d'un interrupteur qui peut être unipolaire, bipolaire, tripolaire, etc. Sous la pression de l'attraction ces pièces mobiles viennent appuyer fortement contre des pièces fixes créant ainsi un bon contact qui permet le passage de courants intenses comme ceux qui circulent au moment d'un démarrage. Pour arrêter le moteur il suffit de couper le courant dans l'électro-aimant en appuyant sur un autre bouton, l'armature n'étant plus attirée retombe en entraînant les contacts mobiles entre lesquels le courant se rompt. Pour faciliter cette coupure on prévoit un *soufflage magnétique* obtenu en faisant passer le

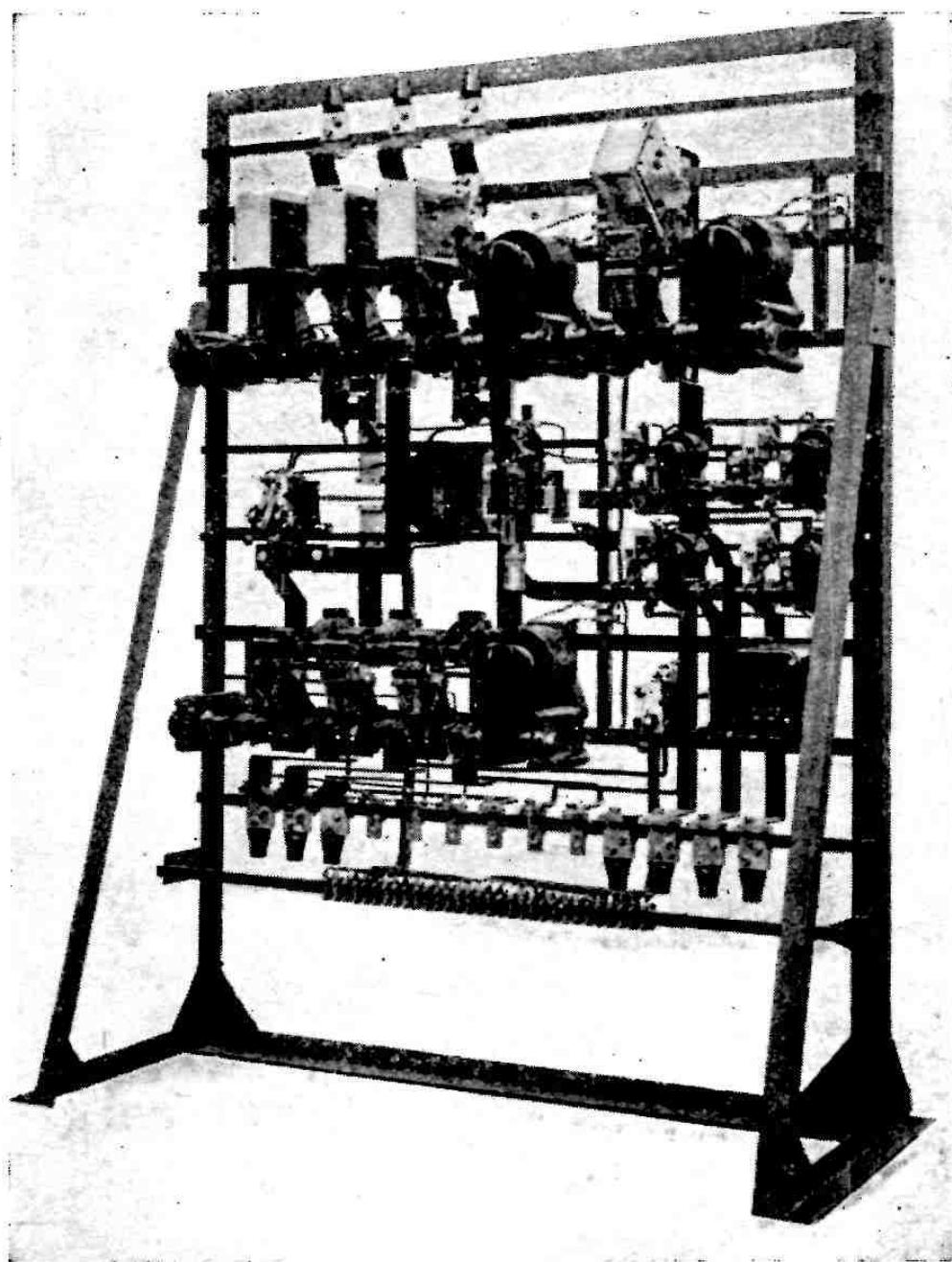


FIG. 106. — Panneau métallique supportant des contacteurs.

On voit pour chacun d'eux les bobines d'attraction, et dans le haut, au-dessus des bras de contacts les boîtes dans lesquelles se produit le soufflage magnétique des arcs à la rupture. En marche normale ces contacteurs sont enfermés dans une armoire métallique qui protège les appareils.

courant que l'on veut couper dans une bobine disposée juste en face de l'endroit où les contacts se séparent. L'étincelle ou arc qui tend à se produire

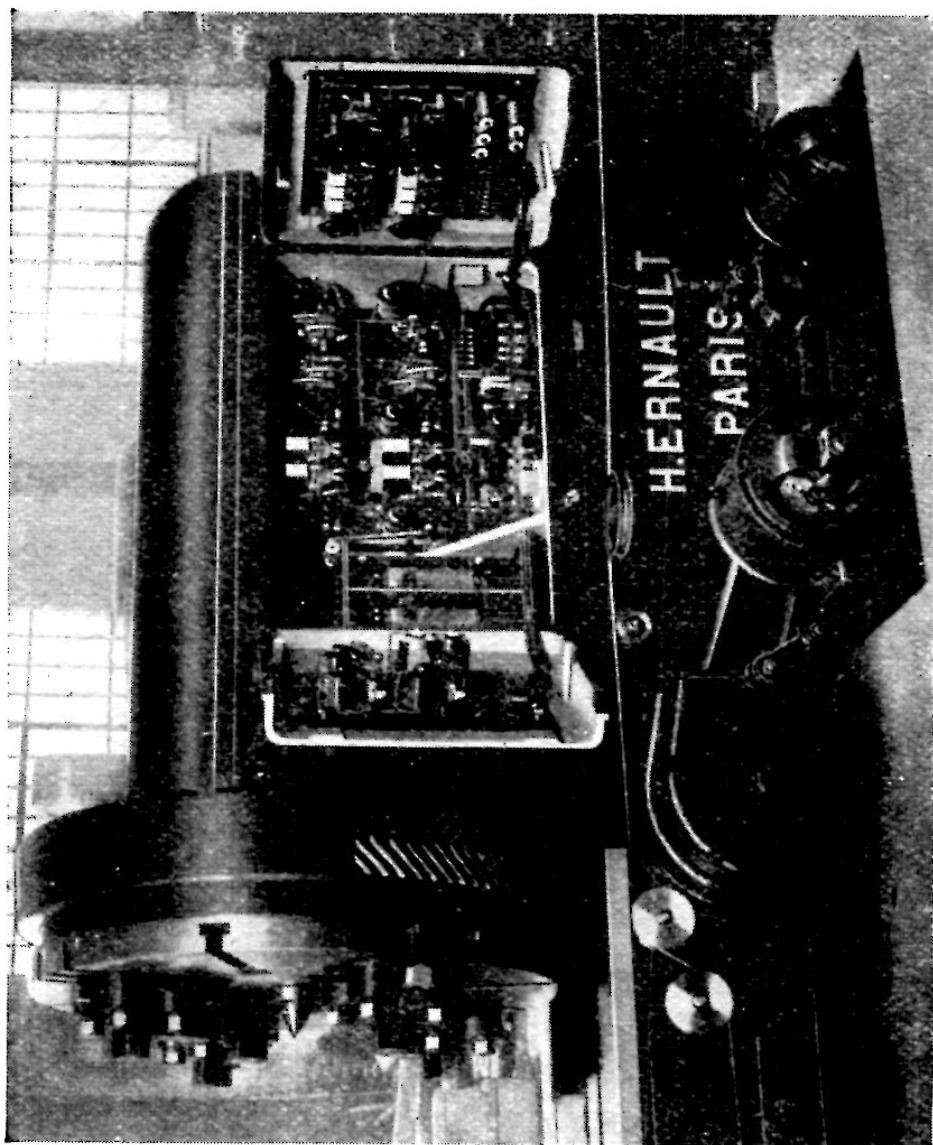


FIG. 107. — Tour parallèle de 0,8 m de hauteur de pointes et de 22 mètres de long actionnée par un moteur de 45 Ch à courant continu et un moteur de 9 Ch pour retour rapide de la poupée mobile et des chariots. Vue de l'armoire des contacteurs ouverte, les postes de commande par boutons étant sur les chariots.

entre les contacts est aussitôt supprimée (voir p. 57).

Les contacteurs permettent de réaliser toutes sortes de combinaisons, en particulier en utilisant des dispositifs à retardement ou « temporisés » on peut faire démarrer un moteur dans un temps bien déterminé

ou inverser sa marche sans que l'intensité du courant dépasse une valeur donnée (fig. 107). Nous avons indiqué dans notre ouvrage *Plans de pose et Schémas d'électricité industrielle*, notamment dans les pages 218 à 229, quelques schémas de démarrage par contacteurs de moteurs à courant continu ou à courants triphasés ainsi que le moyen d'obtenir l'inversion de marche à distance des mêmes moteurs sans craindre de fausses manœuvres ; il est facile, lorsqu'on connaît ce matériel, de résoudre ensuite tous les cas qui peuvent se présenter dans la pratique. Nous nous contenterons de signaler ici plusieurs applications de ces commandes à distance par contacteurs.

Commandes automatiques des moteurs. — Ceci nous amène à signaler quelques montages applicables à tous les moteurs permettant d'obtenir leur mise en marche soit à la main, soit par contacteurs, l'arrêt se faisant ensuite automatiquement une fois le travail demandé au moteur accompli.

Citons tout d'abord le remplissage automatique d'un réservoir d'eau (fig. 108). Un réservoir A du genre de ceux que l'on trouve dans les campagnes doit toujours contenir une certaine réserve d'eau, pour l'arrosage par exemple, ou pour d'autres usages. On installera un flotteur B soutenu par une corde passant sur une poulie C et portant de l'autre côté du réservoir deux contrepoids D et E placés à une certaine distance. Un moteur M placé en dessous, du type série par exemple, est manchonné à une pompe servant à alimenter le réservoir, il reçoit le courant qui lui est nécessaire par deux fils, et ce courant ne peut passer que si l'interrupteur I le lui permet.

Cet interrupteur, du type dit « sauterelle »¹, est sous la dépendance des contrepoids D et E. Quand le niveau de l'eau baisse dans le réservoir A le flotteur B descend et le contrepoids E monte. Dans sa course il pousse la manette de l'interrupteur qui met le moteur en marche et l'eau puisée par la pompe gagne le réservoir.

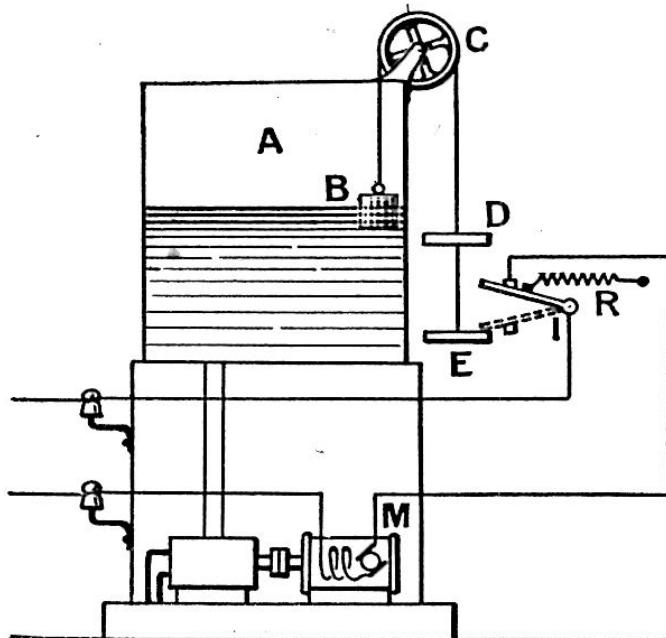


FIG. 108. — Réservoir d'eau à remplissage automatique.

Le niveau remonte alors et le flotteur B s'élève tandis que les contrepoids descendent. A un certain moment le contrepoids D arrivera à pousser la manette de l'interrupteur I, laquelle sollicitée par le ressort R interrompra le courant, le moteur s'arrêtera et repartira ensuite lorsque la manette de l'interrup-

1. Le fonctionnement de l'interrupteur dit « sauterelle » se devine en regardant la figure 108, c'est un interrupteur unipolaire dont la manette est constamment sollicitée par un ressort qui tend à l'incliner vers le haut ou vers le bas sans qu'elle puisse rester dans une position intermédiaire. En haut le contact s'établit, en bas elle bute sur un plot mort.

teur chassée par le contrepoids E rétablira le contact.

Très analogue est le cas du mouvement de commande à distance d'une porte, d'un rideau de théâtre, d'un signal de chemin de fer, etc. On se propose de mettre un moteur en marche à distance et ce moteur doit s'arrêter dès que la commande qu'on lui confie a été exécutée.

Le schéma de la figure 109 donne le principe du

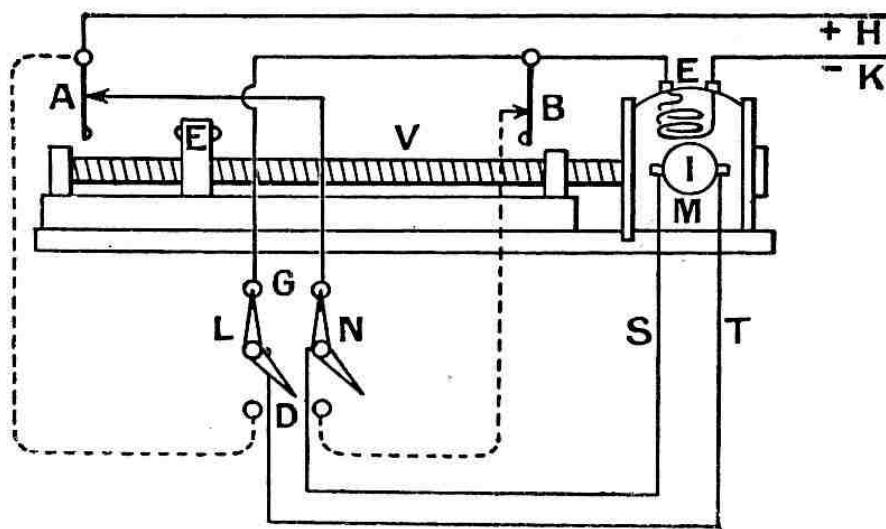


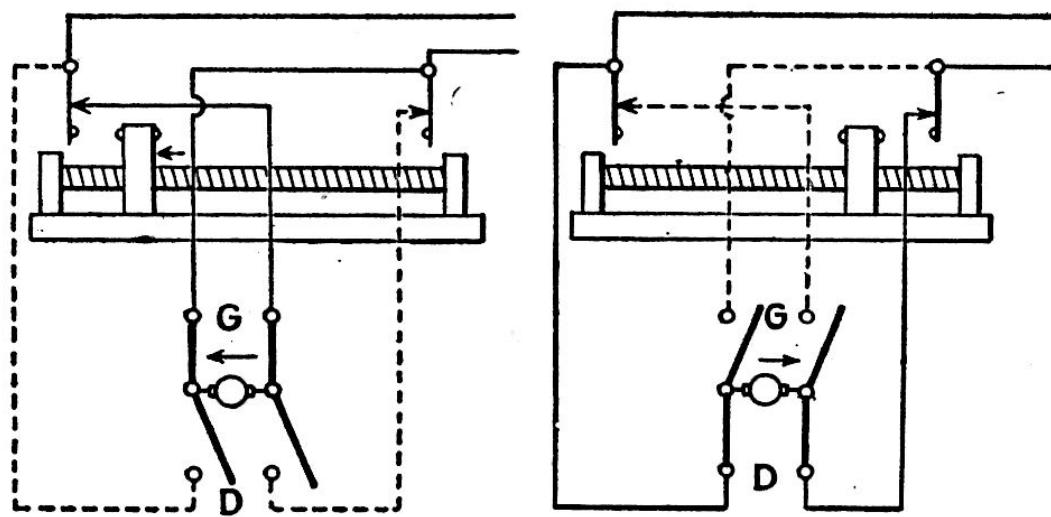
FIG. 109. — Montage d'un dispositif automatique de va-et-vient avec arrêt aux fins de course.

montage à réaliser. Le moteur **M**, du type série par exemple, ou universel, actionne directement ou par l'intermédiaire d'une démultiplication une vis sans fin **V** sur laquelle taraude un écrou **E**.

Deux lames de contact **A** et **B** placées aux extrémités de la course de l'écrou permettent de couper le courant alimentant le moteur lorsque l'écrou arrivant au bout vient à pousser l'une d'elles.

Dans ce but le courant arrivant par les fils **H** et **K** alimente d'abord l'inducteur **E** du moteur et aboutit aux deux lames **A** et **B**. L'induit **H** du moteur étant relié par deux fils **S** et **T** aux couteaux **L** et **N** d'un

inverseur peut communiquer avec les lames de contact A ou B et recevoir le courant par elles dans un sens ou dans l'autre, suivant la position des couteaux de l'inverseur. Les deux schémas simplifiés des figures 111-*a*_e et 111-*b* indiquent en gros traits la marche du courant, suivant que l'on veut amener à droite ou à gauche l'écrou qui représentera par exemple un rideau. Pour ne pas compliquer le des-



a, déplacement à gauche; *b*, déplacement à droite.

FIG. 110. — Schéma simplifié pour la réalisation d'un mouvement de va-et-vient.

sin, le moteur est représenté figure 110-*a* et figure 110-*b* entre les couteaux de l'inverseur.

On voit que chaque fois que l'écrou arrive à une extrémité il coupe le courant sur la lame qu'il vient de pousser tandis que le courant est rétabli sur la lame opposée. Il suffira donc de mettre les couteaux de l'inverseur sur la position D ou G pour qu'aussitôt l'écrou aille à droite ou à gauche et s'arrête en fin de course. Bien entendu, l'inverseur peut être actionné à distance en utilisant des contacteurs, la commande se fait alors par boutons.

CHAPITRE XI

RÉPARATION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Si l'on veut éviter les réparations longues et coûteuses nécessitant le plus souvent le renvoi de la machine chez le constructeur, on devra entretenir périodiquement et régulièrement les moteurs d'une installation, surtout s'ils sont à courant continu.

Les soins à donner sont en général minimes; nous allons les énumérer en prenant pour type le moteur de tramway qui travaille dans de bien plus mauvaises conditions que le moteur d'atelier.

Toutes les indications que nous donnerons pour l'entretien de ces moteurs pourront être considérées comme correspondant à une marche intensive.

Tous les mois ou tous les deux mois, les moteurs électriques devront être visités avec soin; on enlèvera avec un chiffon et de l'essence l'huile qui pourrait avoir atteint les enroulements, ainsi que la limaille ou la poussière de charbon provenant du fonctionnement du collecteur.

Les inducteurs et l'induit seront essayés rapidement au point de vue électrique après avoir été débranchés; on s'assurera, en s'aidant d'un ohmmètre ou simplement d'une lampe à incandescence en cir-

cuit avec la canalisation, qu'il n'y a aucune communication entre la masse et les circuits électriques. Le moteur sera remis en circuit et de l'huile neuve sera introduite dans les coussinets; on s'assurera que les câbles qui passent à l'intérieur ne sont pas dénudés, principalement dans les parties *coudées* et ne risquent pas de venir frotter soit contre l'induit, soit sur le bâti.

Les avaries les plus fréquentes, et en même temps les plus graves, proviennent de *mises à la terre* ou à la masse par suite de contacts entre les parties devant être isolées électriquement.

Les poussières métalliques ou de charbon, celles provenant du collecteur notamment, viennent souvent se coller sur les porte-balais grâce à la présence accidentelle de l'huile sur ces organes et recouvrent les rondelles isolantes en fibre ou en mica des tiges des porte-balais.

Dans ces conditions, la mise à la masse de deux porte-balais peut provoquer des courts-circuits qu'il importe d'éviter. Cette cause d'avarie est assez fréquente; aussi appelons-nous l'attention sur l'avantage qu'il y a à visiter périodiquement les moteurs, de façon à éviter par un bon nettoyage l'accumulation d'huile et de limailles.

D'autres fois, ce sont des bavures produites par le tournage du collecteur qui viennent mettre des sections de l'induit en court-circuit. Ce défaut très peu apparent se manifeste en marche par l'échauffement exagéré de la section intéressée, il convient d'y porter remède le plus tôt possible.

L'*humidité* est une autre cause d'accident; les câbles, fils, etc., des canalisations et du moteur lui-

même doivent être fréquemment examinés sous ce rapport; si un enroulement quelconque a reçu de l'eau, on devra aussitôt interrompre le courant et faire sécher la bobine défectueuse au plus vite. Si on laissait le courant sur une bobine imbibée d'eau, il circulerait d'une spire à l'autre, grâce à l'humidité dont le coton des fils est imbibé et un arc électrique ne tarderait pas à jaillir entre les fils mettant l'enroulement hors de service, il peut se produire aussi des ruptures de fil par électrolyse.

Le jeu entre l'induit et les masses polaires doit toujours être faible et uniformément réparti; on devra le vérifier assez fréquemment de façon à ce qu'il ne puisse jamais se produire un contact entre l'induit en mouvement et les pièces polaires entre lesquelles il tourne.

Il peut arriver à la longue que, par suite de l'usure des coussinets, l'induit vienne frotter contre les inducteurs; dans ce cas, si l'on a un induit lisse (anneau Gramme ou tambour), l'enroulement est mis hors de service et doit être refait; si l'on a un induit denté, et c'est là un nouvel avantage en leur faveur, les flettes seules sautent et sont à changer.

On évite cet inconvénient en remplaçant les coussinets avant qu'ils ne soient suffisamment usés ou en se contentant de rattraper le jeu à l'aide de cales formées de feuilles de clinquant que l'on glisse sous les paliers.

C'est pour éviter des accidents de ce genre, qu'après avoir visité un moteur, on devra s'assurer en faisant tourner l'induit à la main qu'il ne s'est introduit aucun corps étranger entre l'induit et les inducteurs. En dénudant des fils au-dessus d'un moteur

ou même simplement en perçant un mur il est arrivé que des parcelles de corps durs, telles que bouts de fil, morceaux de plâtre, se sont introduits dans l'entrefer d'un moteur en marche et ont amené la destruction immédiate de l'induit.

De même, on évitera de laisser des objets en fer, outils, boulons, etc., trop près des pièces polaires; en envoyant le courant dans le moteur, si ce dernier a ses pièces polaires apparentes, il peut arriver que, par suite de l'aimantation des inducteurs, ces pièces soient happées et viennent frotter ensuite sur l'induit en mouvement.

Réparation des moteurs à courant continu. — Dans bien des usines, on peut confier à un ouvrier adroit et intelligent les menues réparations que nécessite un moteur électrique.

Très souvent, par exemple, le fil d'entrée des bobines inductrices se casse au niveau des bobines (principalement sur les moteurs shunt).

Pour rétablir le courant, on est conduit à dérouler complètement la bobine, opération qui se fait sur le tour, et à l'enrouler à nouveau après avoir soudé un *fil souple*, moins sujet à se casser, à l'extrême détériorée.

L'enroulement doit être refait régulièrement en tendant convenablement le fil et en tassant les spires, en s'aidant d'un bout de bois ou d'un maillet. Chaque couche sera badigeonnée de vernis épais isolant, et l'on aura finalement une bobine exactement semblable à la bobine primitive.

Avant de la mettre en service, il est prudent de bien dessécher les enroulements; c'est une opération

courante chez les constructeurs de dynamos qui possèdent pour cela des étuves spéciales; cela devient long et délicat pour l'industriel qui n'est pas outillé pour ce genre d'opérations et qui peut rester privé assez longtemps de son moteur.

A part le procédé que nous avons indiqué, page 72, nous donnerons un autre moyen de séchage rapide qui peut donner de bons résultats, s'il est fait avec soin.

On obtiendra le séchage en faisant simplement passer un courant un peu intense et à basse tension dans les bobines. Cette opération, qui ne pourrait être faite sur un enroulement imbibé d'eau, peut être appliquée lorsqu'il s'agit d'évaporer un liquide isolant tel que l'alcool ou la benzine formant la base des vernis isolants que l'on applique sur les enroulements.

On utilisera pour cela soit le courant de la canalisation, soit une batterie d'accumulateurs, mais on aura bien soin d'intercaler dans chaque cas un rhéostat et un ampèremètre, de façon à ne laisser passer que juste le courant nécessaire pour provoquer l'échauffement.

On réglera le courant à l'aide du rhéostat, de façon à maintenir une intensité correspondant à 5 ou 6 ampères par millimètre carré. On interrompra de temps en temps ce courant si l'on voit que la température s'élève trop, et en quelques heures l'enroulement sera suffisamment sec pour être mis en service. Ce procédé est fréquemment employé dans les ateliers de réparation des diverses compagnies de tramways où il donne d'excellents résultats.

La vérification et le séchage des induits réparés peut encore être fait de la façon suivante : les bobines

de l'induit étant prêtes à être soudées au collecteur, on relie avec un petit fil toutes les extrémités des bobines, puis avec une magnéto ou un ohmmètre, on essaye l'isolement entre les bobines et la masse; s'il laisse à désirer, on détache le petit fil de connexion réunissant les bobines et on essaye séparément toutes les sections; on marque les enroulements qui présentent un défaut d'isolement que l'on desséchera ensuite.

Pour cela, à l'aide d'un transformateur abaissant la tension du réseau ou simplement en utilisant le courant de la canalisation, que l'on modérera à l'aide de résistances comme nous l'indiquions plus haut, on fait passer un courant correspondant à une densité de 5 ou 6 ampères par millimètre carré; au bout de 4 heures de ce traitement, les bobines sont à peu près sèches et sont essayées de nouveau; l'isolement devra être meilleur.

Si, dans un moteur, une ou plusieurs sections de l'induit sont hors de service (isolant carbonisé), on pourra les refaire sur place en ayant soin de prendre du fil de cuivre recouvert de deux couches de coton du même diamètre que celui qui s'y trouvait auparavant et l'on introduira le même nombre de spires qu'en comportait la bobine avariée. Pour bien utiliser la place, il convient de disposer les fils aussi droits que possible, en les tassant ou en les redressant à l'aide d'un morceau de bois arrondi dans le bout ou en s'aidant d'un maillet en bois.

Une fois l'enroulement terminé, on l'enduira de plusieurs couches de vernis isolant que l'on prendra très épais de façon à obtenir tout de suite une couche importante.

Réparation des moteurs à courant alternatif.—

Il arrive fréquemment dans les moteurs à cage d'écureuil que les barres constituant la cage se dessoudent et cessent de toucher au cercle qui les réunit normalement; le moteur cesse alors de fonctionner. Ce fait se produit lorsque l'on maintient le courant dans l'enroulement du stator tandis que l'induit reste calé pour une cause quelconque; l'appareil fonctionne alors comme un transformateur dont les barres de la cage d'écureuil constituent l'enroulement secondaire; il circule un courant de plusieurs milliers d'ampères dans ce secondaire, et les soudures fondent comme de vulgaires coupe-circuits.

Si cet accident se produit, on devra refaire les soudures et veiller à ce qu'aucun grain ou limaille ne s'introduise dans l'entrefer. Comme dans ce genre de moteurs l'entrefer n'est que de quelques dixièmes de millimètre, on devine que le moindre corps étranger puisse empêcher l'induit de tourner librement.

Il arrive aussi que, par suite d'un jeu trop grand dans les coussinets, le rotor frotte contre le stator, auquel cas un fort grognement se fait entendre. Il faut bien se garder alors de mettre le rotor sur le tour pour lui donner du jeu et augmenter l'entrefer, comme l'ont fait certains réparateurs mal informés; une telle pratique est très mauvaise, car elle a pour effet de diminuer le rendement du moteur ainsi que son facteur de puissance. Le seul remède est de changer les coussinets ou les roulements, mais on ne doit jamais toucher à l'entrefer.

Beaucoup de constructeurs, pour éviter la fusion des soudures, suppriment ces dernières et remplacent

la cage d'écureuil par un enroulement quelconque en fil nu d'un seul bout dans lequel les courants induits circulent librement si qu'ils ne peuvent arriver à faire fondre, étant donné le point de fusion assez élevé du cuivre. Dans d'autres moteurs on trouve des cages d'écureuil entièrement en aluminium fondu sans aucune soudure.

Dans les moteurs à bague, il peut arriver qu'un des fils de l'une des phases de l'induit se trouve coupé (bien souvent près de la bague); s'il est en marche, le moteur peut encore continuer à tourner, mais s'il est à l'arrêt on ne peut le faire démarrer.

Le même accident se produit si un des balais cesse de frotter sur les bagues. On trouve facilement sur quelle phase se trouve la coupure en soulevant les balais et en appliquant le courant sur le stator, comme si l'on voulait faire fonctionner le moteur. Prenant ensuite une lampe à incandescence terminée par deux fils, on tâtera successivement entre chaque bague pour vérifier si la lampe s'allume régulièrement.

Si la lampe cesse de s'allumer entre deux bagues, c'est que le circuit est interrompu entre elles¹.

Un autre accident qui peut se produire dans le remontage d'un moteur triphasé est le suivant : il peut arriver que les trois circuits du stator ou du rotor qui doivent constituer l'étoile ou le triangle soient mal branchés; si l'un d'eux est inversé, on

1. La lampe s'allume parce que le moteur joue le rôle d'un vrai transformateur (le primaire étant le stator et le secondaire étant constitué par l'induit); on comprend dès lors que si un circuit est interrompu dans l'induit, la lampe reliée aux bagues correspondantes ne s'allumera pas

obtient un résultat curieux. Le moteur n'est plus un moteur triphasé, car le champ ne tourne plus régulièrement; il absorbe un courant intense, s'échauffe rapidement et vibre fortement.

Si le moteur a un induit à bagues, il est facile de se rendre compte si les trois circuits sont bien montés; pour cela, on relèvera les balais et on vérifiera les enroulements avec une lampe branchée entre les bagues, tandis que le stator sera soumis au courant du réseau. La lampe brillera d'un éclat différent suivant qu'on la branchera entre telle ou telle bague si les circuits sont mal montés. Au contraire, son éclat restera chaque fois le même si les connexions sont bonnes.

Remise en état de moteurs inondés par l'eau.

— Les moteurs électriques ayant subi longtemps le contact de l'eau, soit qu'ils aient été immersés, soit qu'ils aient été soumis à la pluie, ne doivent jamais être mis en circuit sans avoir été *séchés* d'une façon complète.

On commencera par les débarrasser de la boue et des corps étrangers en les arrosant au besoin avec une lance, puis on les introduira dans une étuve maintenue à la température de 80 à 90° et on les y laissera jusqu'à ce qu'ils soient secs; on mesurera l'isolement entre les enroulements et la masse et ce n'est que lorsqu'il atteindra plus de 300 à 400 000 ohms qu'on pourra mettre le moteur en service. Dans certains cas, on a obtenu un séchage rapide, en 5 à 6 heures, rien qu'en insufflant de l'air chaud sur le moteur, mais tout dépend de l'épaisseur des enroulements.

Refroidissement des moteurs. — Les moteurs, quel que soit leur système, sont le siège de pertes d'énergie se traduisant par un échauffement que l'on doit combattre par différents moyens. Dans les moteurs à explosion on sait que l'on utilise dans ce but une circulation d'eau, dans les moteurs électriques on fait appel à une ventilation, soit forcée, soit naturelle.

L'échauffement des moteurs électriques provient de plusieurs causes, d'abord le passage du courant dans les enroulements entraîne une perte d'énergie (RI^2t) par effet Joule¹, cet échauffement croît très vite avec la puissance absorbée puisqu'il augmente comme le carré de l'intensité du courant. Il y a ensuite les pertes magnétiques par échauffement des tôles de l'induit dans les moteurs à courant continu et des tôles du stator dans les moteurs à courants alternatifs sous l'effet des courants de Foucault et l'hystérésis²; enfin, comme dans tout moteur, il y a aussi les pertes par frottement dans les paliers sur les collecteurs, etc.

Dans les anciennes machines, pour éviter une élévation trop grande de la température, on se contentait de les prévoir *très largement*, les fils étaient de forte section et l'induction magnétique dans les tôles n'était pas très poussée; or, comme les pertes les plus importantes sont proportionnelles au produit du carré de l'intensité du courant par la résistance ainsi qu'au carré de l'induction magnétique,

1. A. SOULIER, *Leçons d'électricité industrielle*, Courant continu, p. 59 et *l'Electricité sans algèbre*, p. 24.

2. A. SOULIER : *Leçons d'électricité industrielle*, Courant continu, p. 258, 275, et *l'Electricité sans algèbre*, p. 146, 230.

il suffisait de réduire ces sources de perte pour que le moteur chauffe peu, même en pleine puissance, ce qui permettait du reste de surcharger les machines.

Aujourd'hui, pour économiser le cuivre et les tôles, on admet dans les enroulements de fortes densités de courant et dans les tôles de grandes inductions. On est alors obligé d'évacuer la chaleur dégagée et dans ce but on a disposé des ailettes sur les induits ou les rotors dans le but de créer un courant d'air à travers l'entrefer ainsi qu'autour des bobinages inducteurs. Parfois ce n'est pas suffisant et l'on cale sur l'arbre un vrai ventilateur qui chasse l'air autour des pièces vitales du moteur. Qu'il nous soit permis, à ce propos, d'appeler l'attention sur le danger que présentent de tels dispositifs. Quand l'induit tourne à 1 500, 2 000 ou 3 000 tours par minute on ne voit pas le ventilateur, et il est arrivé qu'en passant la main dans le carter enveloppant le moteur des personnes ont eu les doigts coupés net par les ailettes. Il faut donc être très prudent avec les moteurs actuels.

Dans certains cas (mines, navires, etc.), on est conduit à employer des moteurs du type « blindé » ou hermétiques pour éviter soit l'inflammation de gaz, tel que le grisou par les étincelles du collecteur, soit l'arrivée de l'eau sur les enroulements si le moteur est appelé à fonctionner dans des endroits particulièrement humides.

Ne pouvant faire circuler l'air à l'intérieur puisque le carter est hermétiquement clos, on le double d'une chemise métallique, comme dans les moteurs à explosion, chemise dans laquelle on fait passer de l'air frais. La figure 111 représente une coupe d'un

moteur asynchrone de ce genre, les flèches indiquent comment se fait la circulation de l'air. La coupe de ce moteur en long correspond à la coupe en travers

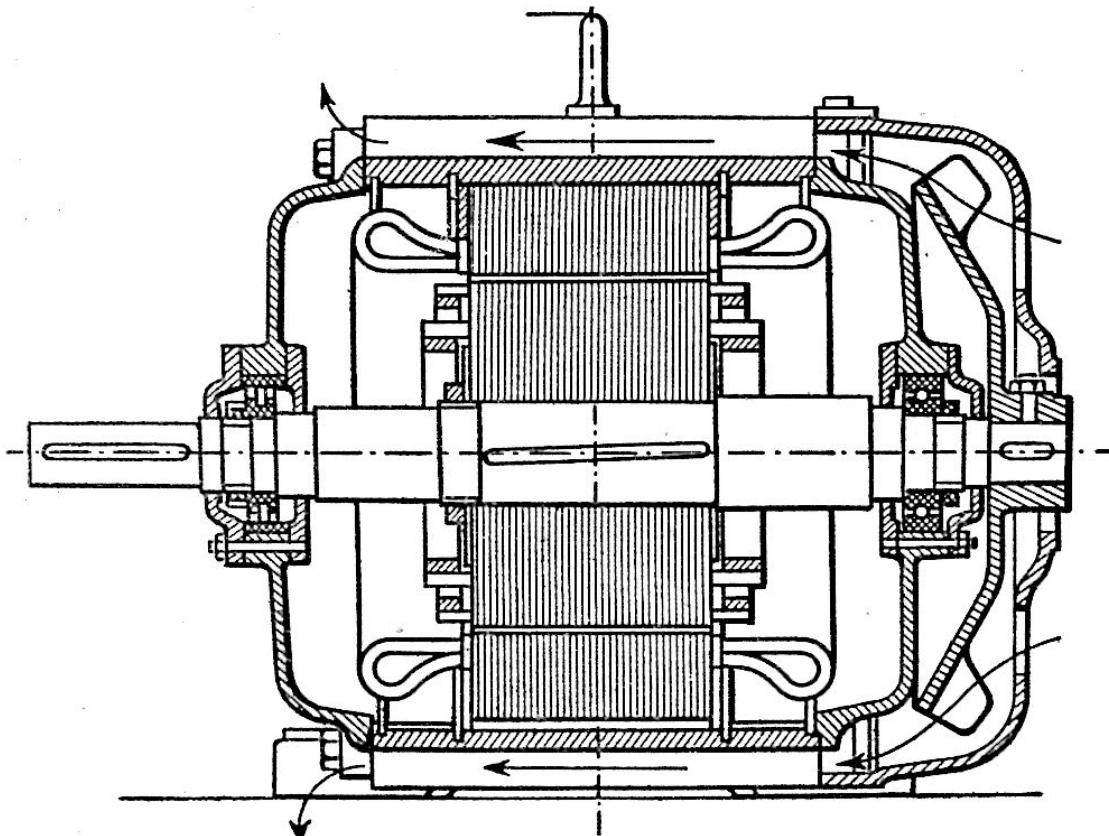


FIG. 111. — Moteur asynchrone à double cage, blindé, avec circulation d'air par ventilateur autour du moteur.

du même moteur que nous avons donné (fig. 85) pour montrer la réalisation d'une double cage d'écurail.

CHAPITRE XII

APPLICATION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES A LA TRACTION

Une des plus belles applications du moteur électrique est certainement celle qu'on en a fait à la traction des véhicules sur voie ferrée. Que ce soit pour la propulsion des tramways électriques ou des trains sur les lignes de chemins de fer, nous retrouvons partout le moteur électrique dont les qualités de souplesse et de commodité le font préférer à tout autre.

Sans vouloir étudier en détail la traction électrique, nous examinerons les divers systèmes employés à l'heure actuelle.

I. Traction par courant continu. — Ce système, le premier en date, est le plus simple. C'est celui qu'ont adopté la plupart des réseaux de tramways des grandes villes.

Le courant continu produit à 500 ou 600 volts dans une usine, le plus souvent située hors de la ville, se trouve transmis par deux fils aux véhicules qui doivent l'utiliser. Généralement, un des fils est suspendu au-dessus de la voie par des isolateurs,

tandis que l'autre fait corps avec les rails de roulement; les voitures captent le courant sur le fil aérien à l'aide d'une perche ou *trolley*, ce courant retourne à l'usine par les rails après avoir agi sur les moteurs.

Lorsque, par suite de soucis d'esthétique, on est obligé de supprimer le fil aérien, on établit le long de la voie un caniveau souterrain dans lequel on pose une vraie ligne aérienne constituée par deux rails isolés placés côté à côté. Un frotteur spécial porté par la voiture descend dans le caniveau en passant par une rainure pratiquée dans la chaussée et vient capter le courant sur les conducteurs isolés placés dans le caniveau.

Ce procédé, très cher comme établissement, a été employé dans beaucoup de grandes villes, comme Paris, Lille, Lyon, etc. mais il tend à être abandonné.

Nous ne parlerons que pour mémoire du système à plots qui a dû être supprimé partout à cause des dangers qu'il présente pour ceux qui circulent sur la voie publique.

Enfin les chemins de fer, dont la voie est en général interdite à la circulation du public, peuvent se permettre d'établir un troisième rail isolé placé à côté des rails de roulement et sur lequel des frotteurs captent le courant comme le fait le trolley sur un fil aérien.

Quel que soit le mode d'alimentation, les véhicules à moteurs à courant continu comportent généralement deux moteurs dont la puissance dépend du poids à remorquer et de la vitesse à atteindre. On prend pour beaucoup de tramways de grandes villes deux moteurs de 25 chevaux, quelquefois même 50 et 250 chevaux à 500 pour des locomotives de chemins de fer électriques.

Le courant à la tension de 500 à 600 volts n'est jamais admis brusquement dans ces moteurs; on se sert pour la mise en marche de combinateurs analogues à ceux décrits pages 52 et 53, dont le but est de grouper d'abord les deux moteurs en tension à travers des résistances dites de *démarrage* (voir fig. 33) [positions 1 et 2], puis de supprimer peu à peu ces résistances en laissant finalement les deux moteurs en tension ou *série*, directement reliés aux fils d'alimentation (position 3).

Pour accroître la vitesse, on passe au montage en *parallèle* en ayant soin d'interposer les résistances (position 5) pour éviter un afflux de courant trop considérable; quand le conducteur sent que la vitesse n'augmente plus, il passe à la position 6 qui correspond à la marche en parallèle.

Enfin, dans certains cas exceptionnels, si on veut augmenter encore la vitesse, on réalise le montage 7 qui a pour effet de diminuer le champ inducteur par la mise en court-circuit de quelques spires de l'excitation-série.

Ces manœuvres se font très simplement, rien qu'en tournant la manette du combinateur; c'est ainsi que l'on procède sur presque tous les tramways électriques.

Sur les chemins de fer électriques, sur les métropolitains en particulier, il est nécessaire, pour gagner du temps, d'avoir une mise en marche aussi rapide que possible.

On pourrait se contenter, comme on le fait sur les chemins de fer, d'employer une puissante locomotive, mais dans bien des cas, au moment de la mise en marche, il se produirait des patinages des roues

motrices tenant à l'insuffisance de poids adhérent, à l'humidité des rails, etc. Les Américains ont remédié les premiers, d'une façon très élégante, à cet inconvenient, en rendant motrices presque *toutes* les voitures. De cette façon, au lieu d'être le véhicule de tête qui tire tous les autres, ce sont les diverses voitures qui se mettent en marche en même temps; il n'y a plus de patinage et le train prend très rapidement sa vitesse.

Il faut, pour réaliser ce dispositif, mettre la commande de tous les divers moteurs du train sous la main du conducteur.

On pourrait se servir pour cela de câbles d'alimentation, reliés à la voiture de tête, mais à part l'ennui d'avoir à installer de gros câbles allant d'un bout du train à l'autre, les accouplements de voiture à voiture deviendraient compliqués et rendraient peu pratique l'augmentation ou la diminution du nombre de voitures d'un train donné.

On a été conduit alors à organiser chaque véhicule-moteur comme un tramway électrique, en le munissant d'un combinateur qui commande ses moteurs.

Pour pouvoir mettre en marche un train, il a fallu *asservir* ces combinateurs, c'est-à-dire les rendre tous solidaires de telle façon que si l'on en manœuvre un quelconque, tous les autres suivent le mouvement.

Cet asservissement a été réalisé de plusieurs manières différentes; c'est ainsi que sur le chemin de fer électrique de Chamonix on a utilisé l'air comprimé servant à la manœuvre des freins. Un tuyau spécial a été établi tout le long du train; il est relié sur

chaque voiture motrice à un cylindre muni d'un piston ; le piston actionne la manivelle du combinateur, en sorte qu'en envoyant de l'air dans la canalisation on peut manœuvrer à la fois tous les combinateurs. En graduant la pression, on fait avancer plus ou moins le piston (retenu pour cela par d'autres pistons formant ressort) et on réalise les divers couplages correspondant aux différentes vitesses.

Sur le chemin de fer métropolitain de Paris et sur beaucoup de lignes analogues, les divers combinateurs sont asservis électriquement, mais alors il devient plus commode de faire usage de contacteurs (voir page 35).

La figure 112 représente un ensemble simplifié de contacteurs de ce genre montés sur chaque voiture automotrice d'un train dit à « unités multiples ». On n'a représenté pour chaque voiture qu'un seul moteur M avec ses résistances de démarrage R pour ne pas compliquer le schéma, mais le fonctionnement serait le même avec deux moteurs ; on réalisera alors dans chaque voiture les couplages que l'on obtient avec le schéma de la figure 33.

Dans le système représenté ci-contre, le courant arrivant par le frotteur ne peut être admis sur chaque moteur que si les contacteurs de 1, 2 et 3 de chaque voiture le permettent.

Pour cela il faut que le conducteur-machiniste placé dans *n'importe quelle voiture* puisse envoyer successivement le courant dans les bobines 1, 2 et 3 des contacteurs de chaque voiture.

Si, par exemple, il agit sur le combinateur de la voiture où il se trouve en avançant la manette sur le cran n° 1, un courant dérivé venant du frotteur

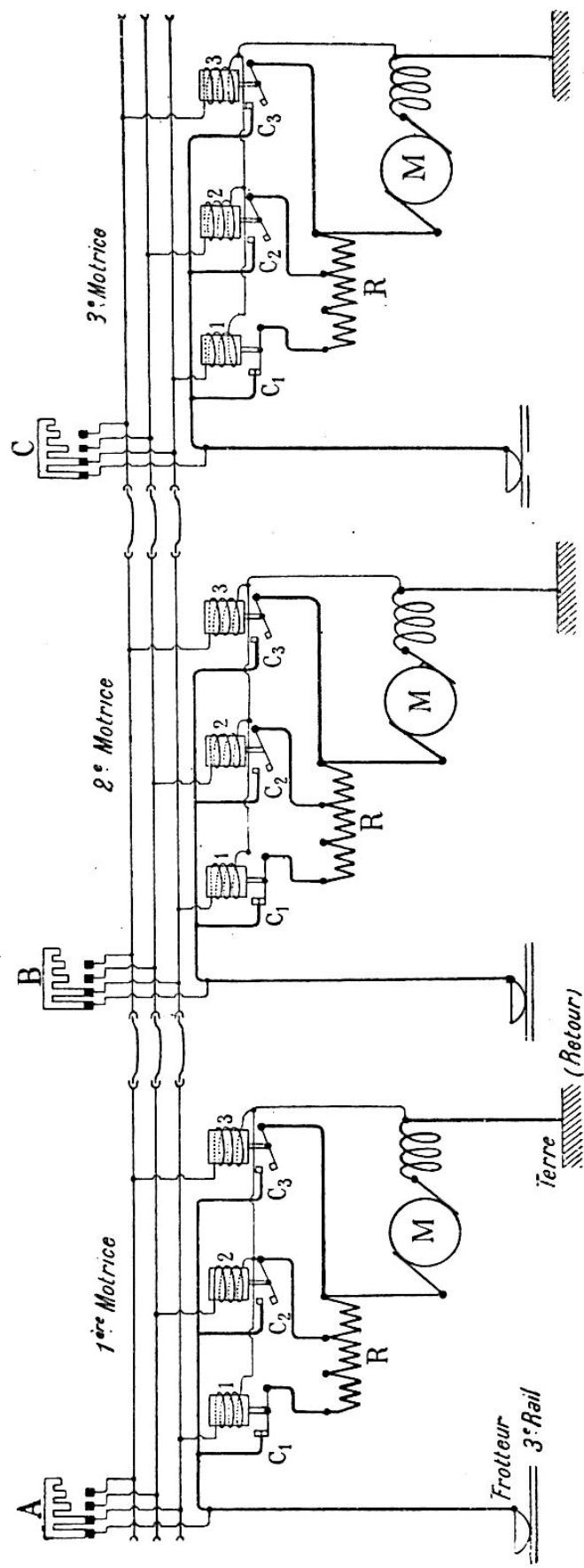


FIG. 112. — Schéma du système à unités multiples employé sur les chemins de fer électriques.

sera dirigé par ce combinateur sur les bobines 1 de chaque voiture et retournera de là à la terre (rail de roulement). Chaque bobine 1 attirera aussitôt son armature, ce qui aura pour effet de relier chaque moteur M au frotteur à travers les résistances. Le train, dont chaque voiture reçoit au même instant l'impulsion de son moteur, se mettra en marche.

Si on pousse le manette du combinateur sur les touches 2, 3, etc., les résistances R seront progressivement supprimées en même temps dans le circuit de chaque moteur et la vitesse augmentera.

Le fonctionnement est très simple, comme on le voit, il se répète en même temps sur toutes les voitures grâce aux câbles qui relient entre eux tous les combinateurs.

Si le combinateur est manœuvré trop rapidement, par une personne inexpérimentée par exemple, les résistances seront trop rapidement retirées et le courant arrivant brusquement dans les moteurs provoquera des à-coups fort désagréables à la fois pour les voyageurs et le matériel.

On a prévu dans ce but des électro-aimants supplémentaires qui ne sont pas figurés ici et dont le rôle est d'éviter que le courant atteigne une valeur trop importante; ces électro-aimants sont à deux paires de bobines, l'une à fil fin, l'autre à gros fil.

La bobine à fil fin parcourue par le courant des contacteurs n'est pas suffisante pour soulever l'armature, mais presque. La bobine à gros fil, qui est parcourue par le courant du moteur, ajoute son action à celle de la première et le tout est calculé pour que l'armature se soulève dès que le courant dépasse dans le circuit du moteur une valeur trop forte pour

ce dernier; en s'élevant, l'armature coupe le courant sur le dernier contacteur dont la manœuvre a provoqué une augmentation trop brusque de courant; ce contacteur ne peut agir qu'autant que l'intensité du courant est revenue à une valeur admissible.

Ainsi donc, on pourra pousser brusquement le combinateur sur la dernière touche, le moteur n'en démarera pas moins convenablement, car le courant ne sera admis d'un contacteur à l'autre que pour une intensité réglée par le fonctionnement des électro-aimants limiteurs d'intensité.

On pourra donc confier la manœuvre au premier venu; les démarrages se produiront toujours avec une régularité merveilleuse, chose précieuse pour un train électrique métropolitain s'arrêtant et repartant fréquemment.

Ces dispositifs sont d'ailleurs aussi bien applicables aux courants alternatifs comme nous le verrons plus loin.

II. Traction par courants alternatifs triphasés. — Tant que l'on n'a eu à installer la traction électrique que dans des villes de peu d'étendue, on a pu se contenter de courant continu aux tensions habituelles, mais il en a été autrement lorsqu'on s'est proposé d'alimenter des lignes de chemin de fer un peu longues.

On a eu le plus souvent recours à une solution mixte qui consiste à établir des sous-stations convenablement réparties le long de la ligne, transformant en courant continu à 1 500 volts des courants alternatifs triphasés transmis à très haute tension (90 000

à 120 000 volts) d'une usine lointaine. C'est ce que l'on a fait sur les chemins de fer français.

On s'est alors demandé s'il ne serait pas moins coûteux d'alimenter les trains eux-mêmes en courants triphasés à 12 000 volts, et c'est ce qui a donné naissance à des essais très intéressants, notamment en Italie.

Le principal inconvénient résultant de l'application d'un système triphasé à la traction électrique provient de l'emploi des trois fils.

On en supprime bien un, en le constituant par la voie de roulement, mais il n'en reste pas moins les deux autres que l'on ne peut plus réaliser à l'aide de rails, étant donnée la tension élevée (12 000 volts) auxquels ils sont portés. Force est donc de les laisser aériens ; d'où double trolley et complications aux aiguillages, etc.

Ce courant triphasé à 12 000 volts aboutit à un transformateur porté par la locomotive qui abaisse la tension à 300 ou 400 volts ; c'est ce courant qui est transmis aux moteurs, en passant par un combinateur chargé de régler la marche.

Les moteurs triphasés sont très simples comme construction ; malheureusement, ils ne permettent pas les variations de vitesse si utiles en traction. On a tourné la difficulté, d'abord en accouplant ces moteurs en cascade pour le démarrage, c'est-à-dire que le rotor de l'un alimente le stator de l'autre ; mais pour la traversée du Simplon, par exemple, où l'humidité provoquait fréquemment des courts-circuits sur les bagues, on a été conduit à prendre un autre système.

Les locomotives du Simplon ont utilisé des moteurs

triphasés à induit à cage d'écureuil, en court-circuit sur les rotors desquels l'humidité n'a plus d'action.

Pour obtenir les variations de vitesse nécessaires, le stator est bobiné de façon à pouvoir présenter 6, 8, 12 ou 16 pôles.

Comme la vitesse des moteurs asynchrones est intimement liée à la fréquence du courant alternatif et au nombre de pôles, on voit que si l'on ne peut faire varier la fréquence on obtiendra plusieurs vitesses rien qu'en changeant le nombre de pôles; c'est le moyen le plus commode actuellement en usage pour faire varier la vitesse de moteurs à cage d'écureuil. Ce changement du nombre de pôles s'opère par la manœuvre du combinateur ou à l'aide de contacteurs sur la locomotive elle-même. De cette façon, les circuits des stators exposés à l'humidité peuvent être soigneusement protégés, les couplages se faisant dans un endroit où l'entretien et la surveillance sont faciles, et il est de fait que ce système a pu donner entière satisfaction.

III. Traction par courant alternatif simple.

— Au lieu de courants triphasés il était tout indiqué d'employer du courant alternatif simple dont le passage de la haute à la basse tension est aussi facile, à l'aide de transformateurs placés sur la locomotive même et qui ne nécessitent qu'un fil aérien, le retour se faisant par les rails. Il n'y a eu à cela au début qu'un seul inconvénient, c'était le moteur. Les moteurs à courant alternatif simple monophasés à cage d'écureuil ne peuvent être employés, car ils ne peuvent démarrer qu'à vide ou à peu près, chose inadmissible sur une locomotive.

On a tourné la difficulté en utilisant le système mono-triphasé signalé page 172. On installe dans ce but sur la locomotive un moteur asynchrone triphasé que nous supposerons à cage d'écureuil, pour simplifier, et on le lance à vide en utilisant le procédé de la bobine de self-induction, par exemple, avec le courant alternatif monophasé pris sur la ligne, courant dont la tension a été convenablement abaissée par un transformateur. Puis lorsque la cage d'écureuil atteint sa vitesse normale on sait qu'elle détermine l'apparition de courants triphasés aux trois bornes du moteur dont une des phases est alimentée déjà en courant alternatif. Ce courant triphasé est alors envoyé à des moteurs triphasés calés sur les essieux, et la locomotive démarre. Mais ce n'est pas tout, il y a aussi les moteurs à collecteur; ces machines comparables, en somme, aux moteurs à courant continu ont été l'objet de perfectionnements intéressants, comme nous l'avons vu, dans le but de les adapter au courant alternatif, mais ils n'en restent pas moins lourds et encombrants, en sorte que comme la place est limitée par l'écartement des rails, on ne peut loger sur un essieu qu'un moteur à courant alternatif de puissance plus faible qu'avec le courant continu.

Malgré ce, bien des locomotives électriques étrangères ont été équipées avec des moteurs à courant alternatif dérivant soit du système Lamme, soit du système Latour. Ces moteurs peuvent démarrer sous d'assez fortes charges, mais on n'emploie pas de rhéostat pour cela; on préfère se servir d'un transformateur à rapport de transformation variable qui permet d'appliquer aux moteurs progressivement la

tension normale. Ce procédé est plus économique que celui avec résistances, c'est encore un avantage en faveur de la traction par courant alternatif.

D'ici peu, il n'est pas douteux que ces installations se multiplieront surtout aux environs des pays de montagne où la traction électrique peut procurer de sérieux avantages de souplesse et de commodité.

Pour ce qui est de la traction sur de longs parcours et loin des chutes d'eau, nous n'hésitons pas à dire qu'il vaudra mieux, pendant longtemps encore, transporter le charbon dans le tender d'une locomotive à vapeur plutôt que de l'utiliser dans des usines alimentant la voie par des lignes toujours très coûteuses ; le transport de ce charbon le long de la voie ferrée n'est rien vis-à-vis des frais d'établissement et d'entretien des canalisations électriques.

La traction électrique n'en est pas moins intéressante et supérieure à la traction à vapeur dans beaucoup de cas, surtout près des grandes villes lorsqu'il s'agit d'assurer un service intensif.

Montage sur les moteurs de dispositifs anti-parasites. — Tout le monde sait aujourd'hui que les appareils récepteurs de T. S. F. enregistrent non seulement les ondes modulées qu'ils reçoivent grâce à l'accord que l'on réalise avec les postes que l'on désire entendre, mais encore toutes les oscillations électriques du voisinage, aussi bien celles émises par les coups de foudre que par l'étincelle, pourtant bien petite, qui se produit au trembleur d'une sonnerie. Il va sans dire que les moteurs et principalement ceux à collecteur émettent eux aussi des oscillations élec-

triques se traduisant par un bruit de crécelle dans les récepteurs de T. S. F. voisins.

Les lois obligent les perturbateurs à supprimer tous bruits insolites et à modifier en conséquence les circuits émetteurs de parasites (car tel est le nom donné à ces bruits d'origine électrique).

Comme nous le signalons ci-dessus, c'est surtout le contact imparfait des balais avec les collecteurs qui provoque les oscillations les plus intenses et par suite les bruits les plus désagréables, bruits que l'on devra s'efforcer de faire disparaître, et pour cela nous allons essayer d'en donner les moyens. Il n'y a pas de règle absolue, car le plus souvent on a affaire à des cas d'espèce, cependant les schémas de principe que nous allons donner permettront le plus souvent d'arriver à une solution.

1^o *Moteur série.* — Dans ce moteur (fig. 113-a) le courant total passe dans l'inducteur puis dans l'induit, les deux enroulements étant en tension ou en série. Remarquons tout de suite que dans les moteurs de ce genre les pôles marchent par paire, de telle sorte que si nous voulons diminuer ou annuler les parasites provenant du collecteur il devient possible de leur barrer la route en intercalant l'induit entre chaque bobine inductrice (dont la self-induction s'opposera au passage des oscillations). Donc, au lieu de prendre le montage simple de la figure 113-a, on adoptera le montage symétrique de la figure 113-b qui a l'avantage d'encadrer le collecteur entre les deux bobines inductrices. Avec ce montage la self-induction des bobines interviendra pour gêner la transmission vers le réseau des oscillations électriques provenant des étincelles dues à la commutation.

Quelquefois ce montage est suffisant, mais dans certains cas il faut ajouter des condensateurs comme nous allons le voir pour les moteurs shunt ou les moteurs compound.

2^o *Moteurs shunt.* — Dans ces moteurs le bobinage inducteur aboutit aux balais et ne peut pas servir d'antiparasite, on est alors conduit à relier chaque

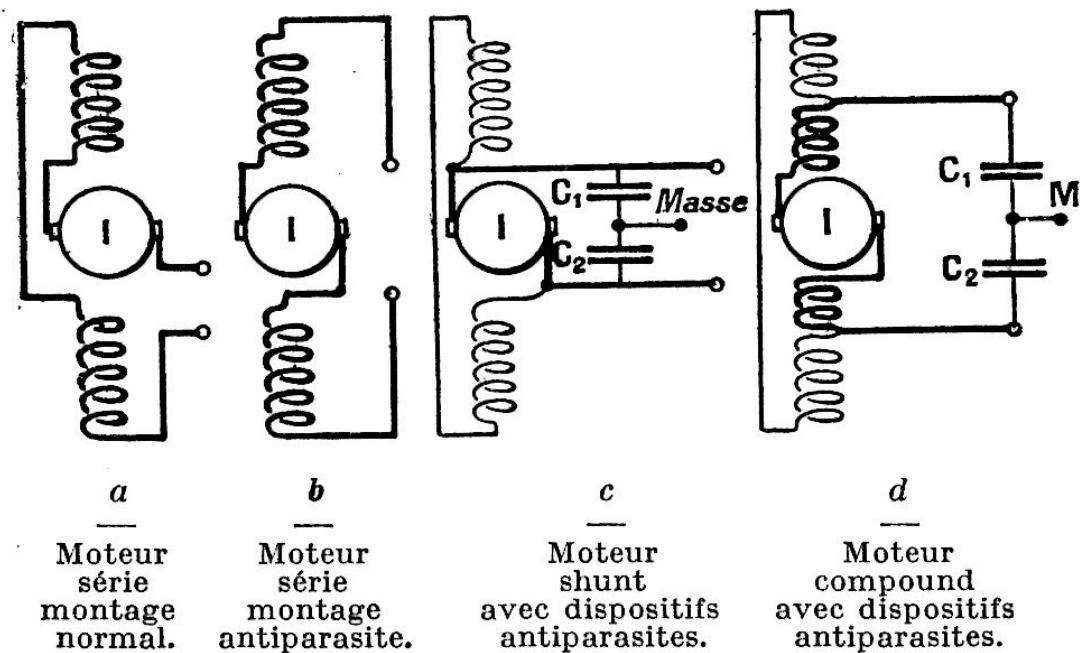


Fig. 113.

balai à la masse M du moteur à travers des condensateurs $C_1 C_2$ (fig. 113-*c*) dont la capacité sera déterminée pour chaque type de moteur par son constructeur. En général, il suffit de 1 ou 2 microfarads. C'est un montage de ce genre que l'on ajoutera au moteur-série si les enroulements à gros fil n'arrivent pas à arrêter les parasites.

3^o *Moteurs compound.* — Il suffit de réaliser avec eux le montage du moteur-série (fig. 113-*d*);

4^o *Moteurs asynchrones à cage d'écureuil.* — Ces

moteurs ne comportant ni balais, ni collecteur ou bagues, n'ont besoin, en principe, d'aucun dispositif antiparasite;

5° *Moteurs asynchrones à bagues.* — Les moteurs à bagues *en bon état d'entretien* ne donnent pas lieu à des parasites, s'il y en avait il suffirait de mettre

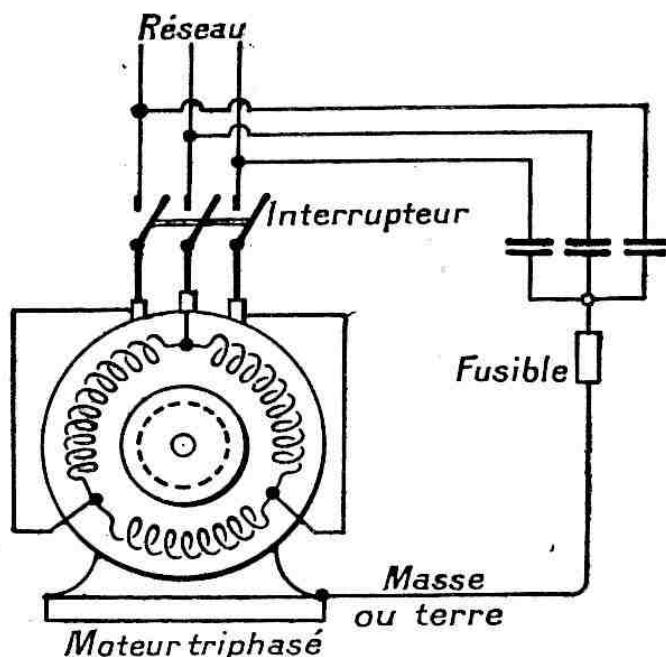


FIG. 114. — Montage d'un dispositif antiparasite sur un moteur triphasé.

entre chaque bague et la masse métallique du moteur un condensateur. Quelquefois aussi on est conduit à en mettre entre chaque fil d'arrivée et la terre ou la masse (fig. 114) *avant l'interrupteur* pour neutraliser les parasites qui pourraient provenir d'un mauvais contact dans le fonctionnement de l'interrupteur. Ce cas s'applique du reste à tous les interrupteurs de construction peu soignée dans lesquels il se produit des contacts incertains.

Bien entendu, les appareils ménagers qui sont

presque tous pourvus de moteurs-série du type dit « universel » doivent être protégés, cependant il ne faudrait pas croire que les capacités employées doivent être proportionnelles à la puissance des moteurs, on a constaté, en effet, que de très gros moteurs produisent des parasites imperceptibles ou presque, tandis qu'un petit moteur d'aspirateur par exemple provoque parfois dans les appareils de T. S. F. un grésillement insupportable. On ne devra pas perdre de vue cependant que moyennant quelques tâtonnements on arrive presque toujours en général à supprimer complètement tous ces bruits parasites, quel que soit le type de moteur d'où ils proviennent

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	v
---------------	---

PREMIÈRE PARTIE

MOTEURS A COURANT CONTINU

CHAPITRE I. — Réversibilité des machines dynamo-électriques	1
Force contre-électromotrice	6
Rhéostat de démarrage.....	9
CHAPITRE II. — Les différents systèmes d'excitation des moteurs à courant continu	13
Moteurs-série	13
Moteurs en dérivation.....	18
Moteur compound	21
Moteurs à pôles auxiliaires.....	23
CHAPITRE III. — Démarrage des moteurs...	25
Moteur-série	26
Moteurs en dérivation	27
Moteur compound	33
Démarrage avec contacteurs.....	35
Rhéostats de démarrage industriels.....	38
Rhéostats à liquide.....	41
CHAPITRE IV. — Inversion du sens de marche des moteurs à courant continu.....	44
Démarreurs inverseurs.....	49

Combinateurs de démarrage.....	52
Soufflage magnétique.....	57
CHAPITRE V. — Freinage électrique.....	60
Démarreur inverseur avec position de freinage	63
Couplage des moteurs.....	66
CHAPITRE VI. — Entretien des moteurs à courant continu.....	69

DEUXIÈME PARTIE

LES MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

CHAPITRE I. — Expériences avec les courants alternatifs	75
Effets magnétiques.....	78
Décalage	82
Actions répulsives observées avec le courant alternatif	87
Tension et intensité des courants alternatifs	90
CHAPITRE II. — Moteurs synchrones à courant alternatif.....	92
Influence de l'excitation.....	97
CHAPITRE III. — Moteurs asynchrones ou à champ tournant.....	100
Réalisation pratique des moteurs à champ tournant	104
CHAPITRE IV. — Moteurs asynchrones diphasés.....	107
Construction des bobines.....	113
CHAPITRE V. — Moteurs asynchrones triphasés	118
Construction pratique des moteurs triphasés	122

Groupement des circuits d'un moteur triphasé.	126
Moteurs asynchrones synchronisés	130
Moteurs auto-synchrones....	132
CHAPITRE VI. — Utilisation des champs tournants, induit ou rotor	135
Rotors bobinés.....	138
Fonctionnement d'un moteur à bagues....	141
Charge d'un moteur.....	142
Relevage des balais.....	144
CHAPITRE VII. — Dispositifs de démarrage des moteurs asynchrones.....	146
Démarrage par rhéostat.....	147
Démarrage automatique par la force centrifuge	148
Procédé Fischer-Hinnen.....	150
Moteurs à coupleur.....	152
Moteurs Boucherot.....	154
Démarrage « étoile-triangle ».....	157
CHAPITRE VIII. — Les moteurs asynchrones à courant alternatif simple.....	160
Moteur asynchrone à courant alternatif simple	163
Moteur asynchrone à courant alternatif simple à condensateur.....	166
Condensateurs	169
Moteurs mono-triphasés.....	171
Système de distribution mono-triphasé....	172
CHAPITRE IX. — Les moteurs à collecteur à courant alternatif simple.....	175
Moteur-série à courant alternatif simple...	176
Moteur à répulsion.....	181
Moteur Latour.....	183
Moteurs à coupleur.....	183
CHAPITRE X. — Application des moteurs électriques à la commande électrique des machines-outils.....	186
Augmentation du rendement. — Réglage de la vitesse.....	188

Choix du courant. — Choix des moteurs...	189
Installation	191
Pose des fils.....	194
Combinaison des moteurs avec les machines-outils	199
Commande par boutons et contacteurs....	204
Commandes automatiques des moteurs....	207
CHAPITRE XI. — Réparation des moteurs électriques	211
Réparation des moteurs à courant continu.	214
Réparation des moteurs à courant alternatif	217
Remise en état de moteurs inondés par l'eau	219
Refroidissement des moteurs.....	220
CHAPITRE XII. — Application des moteurs électriques à la traction.....	223
I. — Traction par courant continu.....	223
II. — Traction par courants alternatifs triphasés.....	230
III. — Traction par courant alternatif simple.....	232
Montage sur les moteurs de dispositifs anti-parasites	234