



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299053

xx
419

Les

Moteurs électriques

A COURANT CONTINU

NANCY. — IMPRIMERIE BERGER-LEVRAULT ET C^{ie}.

BIBLIOTHÈQUE DU MARIN

Les

Moteurs électriques

A COURANT CONTINU

PAR

H. LEBLOND

AGRÉGÉ DES SCIENCES PHYSIQUES

PROFESSEUR D'ÉLECTRICITÉ A L'ÉCOLE DES OFFICIERS-TORPILLEURS

OUVRAGE COURONNÉ PAR L'ACADÉMIE DES SCIENCES

DEUXIÈME ÉDITION

N. 22255



BERGER-LEVRULT ET C^{ie}, LIBRAIRES-ÉDITEURS

PARIS

5, RUE DES BEAUX-ARTS

NANCY

18, RUE DES GLACIS

1898

Tous droits réservés

cx
419

II 5381



Akc. Nr. 5097/50

PRÉFACE

DE LA PREMIÈRE ÉDITION

Les moteurs électriques sont actuellement utilisés pour des applications nombreuses et diverses ; les ventilateurs, pompes, treuils et monte-charges électriques sont d'un usage courant ; nombre d'ateliers emploient des électromoteurs pour actionner leurs machines-outils ; la navigation, ou plutôt le canotage électrique semble être sorti de la longue période de tâtonnements, pour prendre un développement considérable.

A bord des grands navires de guerre, les applications qui utilisent les électromoteurs ont pris subitement une extension extraordinaire, et l'on peut dès maintenant envisager le moment où une fraction importante des milliers de chevaux développés par les chaudières à vapeur d'un grand cuirassé, sera transmise aux organes à mettre en mouvement, par l'intermédiaire du courant et des moteurs électriques.

J'ai donc pensé qu'on pouvait consacrer à l'étude des électromoteurs et de leurs applications, non plus seulement un ou deux chapitres d'un traité ou d'un cours d'électricité, mais un livre spécial.

Le présent ouvrage peut être considéré comme le com-

plément de mon *Cours d'électricité*. C'est comme lui un livre d'*enseignement*.

J'ai cherché à établir aussi simplement que possible la *théorie numérique* des électromoteurs, en m'efforçant toutefois de ne pas sacrifier l'exactitude à la simplicité.

Dans l'étude du fonctionnement des électromoteurs, pour les différentes conditions auxquelles ils sont soumis, j'ai essayé de montrer comment les choses se passent, plutôt que de tirer le résultat d'équations d'ailleurs faciles à établir. J'ai voulu ainsi apprendre au lecteur à raisonner les cas qui peuvent se présenter et à ne pas accepter sans contrôle des résultats qui ne s'appliquent parfois qu'en apparence au cas spécial en cause. Le but que j'ai poursuivi expliquera et fera sans doute pardonner les répétitions qu'on trouvera dans cette partie de l'ouvrage.

Les méthodes de mesure appliquées aux électromoteurs sont exposées avec des détails suffisants pour en permettre la pratique immédiate ; des exemples numériques empruntés à des essais réels d'électromoteurs accompagnent l'exposé des principales méthodes.

Enfin, de nombreuses applications des moteurs électriques complètent l'ouvrage.

Ces applications, empruntées de préférence au service des navires, sont exposées avec des détails circonstanciés et des données numériques permettant non seulement de les connaître, mais d'en établir d'autres analogues.

Toulon, juin 1893.

Henri LEBLOND.

MOTEURS ÉLECTRIQUES

A COURANT CONTINU



CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS SUR LES MOTEURS ÉLECTRIQUES

A COURANT CONTINU

1. Moteur électrique. — Tout appareil dont une partie peut se mettre en mouvement sous l'influence d'un courant électrique est un *moteur électrique*.

Le courant, cause du mouvement, représente une certaine quantité d'énergie, que l'on eût pu, à volonté, récupérer sous forme de chaleur, de lumière, de décompositions chimiques et qui est l'*énergie électrique du courant*. Le mouvement communiqué au moteur engendre au moins le *travail mécanique* nécessaire pour vaincre le frottement des pièces mobiles. Ce mouvement peut d'ailleurs être employé à un *travail mécanique utilisable*. De sorte que le moteur électrique est l'appareil qui met en évidence l'énergie électrique du courant sous forme de travail mécanique, comme une lampe électrique révèle cette énergie sous forme de chaleur et lumière, ou un voltamètre sous forme de substances chimiques recueillies.

On peut donc définir le moteur électrique : *une machine qui produit un travail mécanique en consommant de l'énergie électrique*.

Le courant qui actionne un moteur électrique peut circuler, soit dans la partie mobile, soit dans la partie fixe, soit dans les deux à la fois. Le moteur peut, ou non, comprendre des aimants, des substances magnétiques. Si l'on songe qu'un courant crée un champ magnétique, on conçoit que l'étude d'un moteur quelconque puisse toujours être ramenée à l'étude d'actions magnétiques exercées ou subies par le courant.

2. — La définition très large que nous avons donnée du moteur électrique comprend un nombre considérable d'appareils.

C'est ainsi qu'il faut considérer comme moteurs, au moins rudimentaires, tous les appareils au moyen desquels on met en évidence, dans les cours, les actions mécaniques réciproques des courants et des aimants.

Une aiguille aimantée mobile et un fil métallique parallèle constituent un moteur embryonnaire, puisqu'un courant lancé dans le fil communique un mouvement à l'aiguille.

Les attractions et répulsions exercées par des courants circulant dans des fils parallèles ou croisés contiennent encore en germe une classe de moteurs.

Un électro-aimant et son armature peuvent constituer un moteur capable d'engendrer un travail notable et utile par la simple attraction de l'armature au moment où un courant est lancé dans la bobine de l'électro-aimant. Si l'on dispose les choses de manière à pouvoir interrompre et lancer périodiquement le courant dans la bobine et si un ressort antagoniste, par exemple, maintient l'armature écartée de l'électro-aimant, quand il n'est pas actionné par le courant, l'armature prend un mouvement de va-et-vient utilisable pour un travail continu. Ce mouvement alternatif de l'armature employé dans les sonneries électriques est quelquefois aussi mis à profit pour la manœuvre des charbons dans les lampes à arc voltaïque.

Un électro-aimant peut également attirer ou repousser un

aimant ou un autre électro-aimant ; on obtient des attractions et répulsions successives susceptibles de déterminer un mouvement continu, si on change périodiquement le sens du courant dans l'électro aimant. Un grand nombre de moteurs anciens comprennent des combinaisons d'électro-aimants fixes et d'électro-aimants mobiles successivement attirés et repoussés par les premiers.

Lorsqu'on présente à l'entrée d'un solénoïde parcouru par un courant un noyau de fer mobile, le solénoïde l'attire à l'intérieur jusqu'à ce qu'il soit placé au milieu de la bobine. Cette attraction peut encore être transformée en un mouvement rectiligne alternatif en interrompant périodiquement le courant du solénoïde et équilibrant le noyau mobile par un contre-poids ou un ressort. On peut aussi disposer deux solénoïdes l'un au-dessus de l'autre et lancer alternativement le courant dans chacun d'eux ; un noyau de fer mobile monte ou descend, suivant le solénoïde excité. Des dispositions analogues ont été employées autrefois pour la construction des moteurs électriques ; on les retrouve parfois encore, en particulier lorsque le mouvement que l'on désire produire est un mouvement rectiligne alternatif.

Des mouvements continus de rotation peuvent aussi être obtenus, sans interruption ni interversion du courant, avec des appareils très simples employés pour expériences de cours. Nous citerons la rotation continue d'aimants plongés dans une cuvette pleine de mercure sous l'influence de courants circulant à la surface de ce dernier, ou encore la roue de Barlow.

Bien que les dispositifs dont nous venons de parler aient été et puissent encore être mis à profit comme moteurs électriques, dans certains cas particuliers, nous nous bornerons à ces indications, parce que d'une manière générale, ils sont très inférieurs aux moteurs utilisés actuellement, quand on veut produire un travail mécanique un peu important. Ces derniers ne sont autre chose que des machines électriques semblables à celles employées pour *produire* des courants.

3. Réversibilité des machines électriques à courant continu. — Lorsqu'on réunit les deux bornes d'une machine électrique de Gramme aux deux pôles d'une pile suffisamment puissante, l'induit de la machine se met à tourner sous l'influence du courant électrique produit par la pile et circulant dans la machine. Cette machine Gramme est donc un moteur électrique.

Toute machine à courant continu, magnéto-électrique ou dynamo-électrique, quel que soit son mode d'excitation, peut être ainsi employée comme moteur électrique.

Autrement dit, toutes les machines électriques à courant continu sont *réversibles*, c'est-à-dire que si on leur communique un mouvement de rotation au moyen d'une dépense d'énergie mécanique, elles produisent un courant électrique dans un circuit communiquant avec leurs bornes ; que si, au contraire, on fait passer dans ce circuit un courant produit par une source étrangère quelconque, la machine prend un mouvement de rotation qui peut être utilisé pour produire un travail mécanique.

Le courant qui fait tourner la machine servant de moteur électrique peut être emprunté à une autre machine. On peut, par exemple, réunir les bornes de deux machines Gramme par deux conducteurs et, si l'une d'elles est mise en mouvement, par un moteur à vapeur ou toute autre force mécanique, l'autre se met également à tourner.

C'est l'étude des machines électriques à courant continu employées comme moteurs électriques qui fait l'objet de ce travail. Nous avons, dans un autre ouvrage ¹, étudié les machines génératrices de courant.

Pour éviter la confusion entre les machines électriques servant de moteurs et les machines sources d'électricité, nous appellerons les premières : *machines réceptrices*, ou *réceptrices*, ou *moteurs électriques*, ou *électromoteurs* ; les dernières : *machines génératrices*, ou *génératrices*, ou *sources électriques*.

1. H. Leblond, *Cours d'électricité*. — Berger-Levrault et C^{ie}.

4. Constitution générale d'une machine réceptrice. — Les machines réceptrices sont semblables, avons-nous dit, aux machines génératrices. Nous nous bornerons donc à en rappeler les parties constitutives principales.

Une machine génératrice se compose essentiellement d'un *induit* ou *armature*, ensemble de bobines parcourues par le courant venant de la source et d'un *champ magnétique inducteur*. Ce dernier est produit par des aimants permanents ou des électro-aimants dont les bobines sont alors parcourues également par un courant venant de la source électrique. C'est l'induit qui, le plus souvent, est mobile, l'inducteur étant fixe.

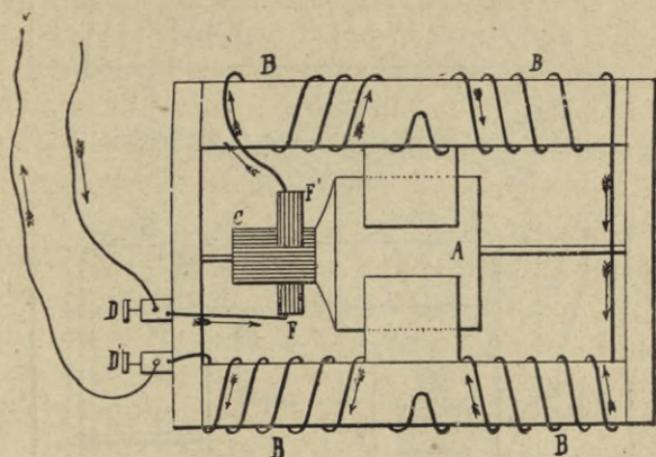


Fig. 1. — Électromoteur excité en série.

Quand l'électromoteur a pour inducteurs des électro-aimants, ces derniers peuvent être, comme pour les machines génératrices, placés à la suite de l'induit dans le même circuit : l'électromoteur est dit alors *excité en série*. Dans la figure 1, on a représenté schématiquement, en A l'induit, en B les électro-aimants inducteurs en série. Les deux extrémités de l'induit communiquent au moyen du *commutateur* ou *collecteur* C, avec les frotteurs ou *balais* F et F'. Les bornes du moteur sont en D et D'. On voit que le courant venant de

la source parcourt successivement les électro-aimants inducteurs et l'induit.

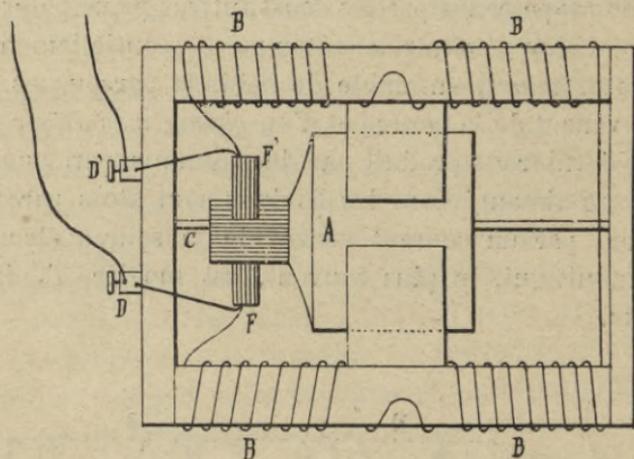


Fig. 2. — Électromoteur excité en dérivation.

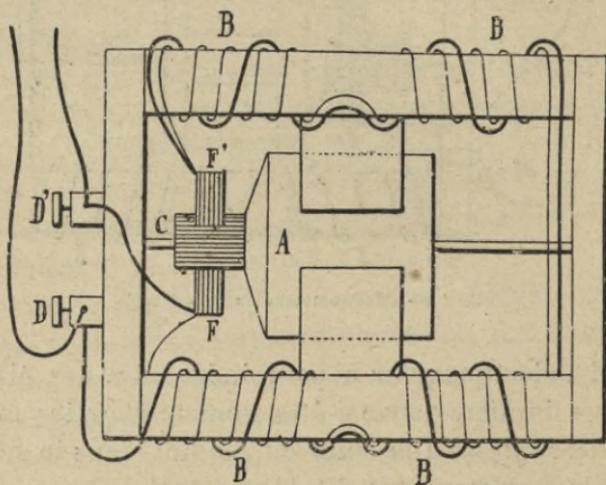


Fig. 3. — Électromoteur à excitation compound.

Les électro-aimants inducteurs peuvent aussi être établis en dérivation par rapport à l'induit : l'électromoteur est alors excité en dérivation, comme le montre la figure 2. Le courant

venant de la source se divise alors en deux parties pour passer séparément dans les inducteurs et dans l'induit.

Enfin la figure 3 représente les électro-aimants excités à

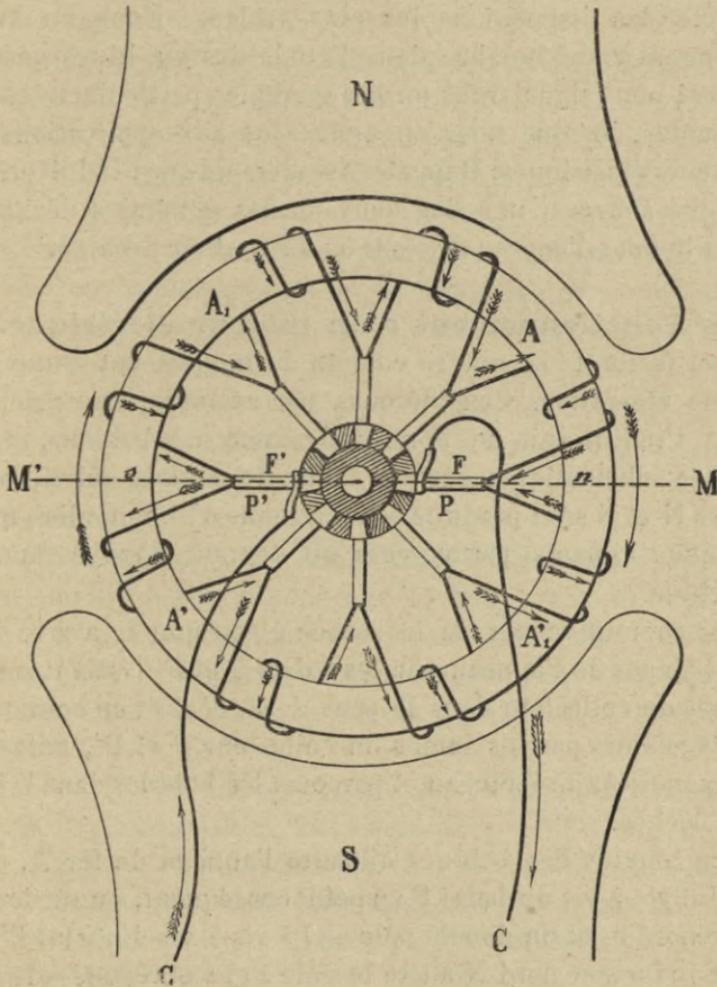


Fig. 4. — Fonctionnement d'un électromoteur.

la fois en série et en dérivation : le moteur est alors à *excitation compound*.

L'effet général des électro-aimants est de créer autour de l'induit des pôles inducteurs. Ces pôles peuvent être au

nombre de deux opposés et de noms contraires : le moteur est alors *bipolaire*. Lorsque le nombre des pôles est supérieur à deux, le moteur est *multipolaire*.

Les inducteurs et l'induit d'un électromoteur peuvent affecter les dispositions les plus variées. Nous en avons donné un grand nombre dans l'étude des machines génératrices ; nous signalerons encore quelques particularités intéressantes, lorsque nous en arriverons aux applications des moteurs électriques. Rappelons seulement que l'induit prend, le plus souvent, une des deux formes générales désignées sous le nom d'*anneau Gramme* ou de *tambour Siemens*.

5. Fonctionnement d'un moteur électrique. —

Il est facile de se rendre compte du mouvement d'une machine réceptrice. Considérons, par exemple, une machine dont l'induit soit un anneau Gramme à 8 bobines, représentée schématiquement par la figure 4. Les pôles inducteurs N et S sont produits et entretenus d'une manière quelconque, aimants permanents ou courant envoyé dans la machine.

Le courant venant de la source électrique C arrive dans les bobines de l'anneau par les balais F et F' frottant sur les lames du collecteur dans le sens de la flèche ; ce courant se partage alors par les lames du collecteur P et P', entre les deux moitiés de l'anneau et parcourt les bobines dans le sens des flèches.

Le courant des bobines aimante l'anneau de fer A, en y créant vis-à-vis du balai F un point conséquent, ou un double pôle nord *n*, et un double pôle sud *s* vis-à-vis du balai F'. Le pôle inducteur nord N attire le pôle sud *s* et repousse le pôle nord *n* ; le pôle inducteur sud S attire le pôle *n* et repousse le pôle *s*. L'anneau Gramme va donc tourner dans le sens de la flèche.

6. — On peut encore donner du mouvement une explication plus générale déduite de la loi des actions mécaniques

réciroques des aimants et des courants, loi qui peut s'énoncer ainsi :

Lorsqu'un conducteur, en forme de boucle, parcouru par un courant, est mobile dans un champ magnétique, il se meut de manière à rendre maximum le flux de force embrassé par la boucle.

Le flux de force émanant du pôle inducteur N gagne l'anneau de fer A en traversant l'entrefer qui sépare ce pôle de l'anneau, puis se partage en deux parties qui suivent les deux moitiés de l'anneau et se réunissent pour atteindre le pôle sud S, en traversant le second entrefer. Il en résulte que le flux inducteur est minimum pour les sections de l'anneau situées dans le plan passant par la ligne des pôles NS et que ce flux est maximum pour les sections situées dans le plan perpendiculaire MM'.

D'autre part, le courant passant dans les bobines de l'anneau crée aussi un flux de force traversant ces bobines et sortant par la face où le courant a le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Le flux créé par le courant dans les deux bobines A de l'anneau est de même sens que le flux inducteur ; ces deux bobines vont donc se mouvoir vers le plan MM', où le flux inducteur est maximum, de façon que le flux total embrassé soit maximum. Il en est de même pour les deux bobines du quadrant A'.

Le flux de force dû au courant des bobines du quadrant A₁ est de sens contraire au flux inducteur ; celui-ci se retranche donc du premier et les bobines vont se mouvoir vers le plan NS où le flux inducteur est minimum ; il en est de même pour les bobines du quadrant A'₁. Ces bobines continueront ensuite leur mouvement et, le flux de force dû au courant ayant été rendu de même sens que le flux inducteur grâce au retournement des bobines, vont tendre vers le plan MM' où le flux inducteur est maximum.

Les 8 bobines concourent donc à faire tourner l'anneau dans le sens de la flèche. Comme d'ailleurs à leur arrivée dans le plan MM', le courant est inversé dans les bobines,

par suite de la position des balais dans ce plan, le mouvement de rotation est continu.

7. — Il est intéressant de comparer le sens du mouvement de rotation pris par l'induit de la machine réceptrice sous l'influence du courant qui le parcourt, au sens du mouvement qu'il faut donner à la machine fonctionnant comme génératrice pour lui faire produire un courant de même sens.

En se reportant à l'étude du fonctionnement d'une machine Gramme¹, on voit que *le champ magnétique inducteur étant disposé de la même manière*, pour un même courant dans l'induit, le mouvement de la réceptrice est inverse de celui de la génératrice.

La loi de Lenz relative aux courants d'induction, permettait de prévoir ce résultat. En effet, en vertu de cette loi, *quand, par le déplacement relatif d'un inducteur et d'un circuit fermé, on développe dans ce dernier un courant induit, celui-ci est de sens tel qu'il tend, par son action mécanique sur l'inducteur, à imprimer un mouvement inverse de celui qui a produit l'induction.*

Cette inversion du sens du mouvement de l'induit, *pour la même disposition du champ inducteur et le même courant passant dans l'induit*, lorsque la machine sert successivement de génératrice et de réceptrice, est commune à toutes les machines, quels que soient le mode d'excitation des inducteurs et le système particulier de l'induit.

1. Leblond, *Cours d'électricité*, t. III, p. 22.

CHAPITRE II

THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

8. Force contre-électromotrice développée par un moteur électrique. — Si on intercale un galvanomètre, un ampèremètre par exemple, sur le trajet des conducteurs reliant un moteur à une source électrique dont la force électromotrice soit à peu près constante, on observe, pendant la rotation du moteur, un courant plus faible que lorsque le moteur est immobilisé. Un fil de fer, de dimensions convenables, mis à la place du galvanomètre peut rougir lorsqu'on empêche le moteur de tourner et ne rougit plus lorsqu'on laisse la rotation s'effectuer librement. Ce dernier dispositif constitue même une jolie expérience de cours ; elle montre bien comment on peut utiliser la source électrique, soit pour produire beaucoup de chaleur dans le circuit, soit pour produire moins de chaleur, mais en même temps le travail mécanique correspondant à la rotation du moteur.

Il est facile de se rendre compte à priori du phénomène qui nous occupe. Toute machine électrique peut servir de moteur et, réciproquement, tout moteur en tournant doit produire un courant d'induction. Or, d'après la loi de Lenz que nous avons énoncée plus haut, le courant induit développé tend, en réagissant sur l'inducteur, à produire un mouvement inverse de celui dont est animé le moteur sous l'influence du courant venant de la source (7). Le courant développé par la rotation du moteur est donc de sens contraire à celui qui produit cette rotation ; celui-ci doit diminuer.

9. — Dans l'induit du moteur tournant se développe donc

une certaine force électromotrice d'induction opposée à la force électromotrice de la source électrique employée à faire mouvoir le moteur : c'est une *force contre-électromotrice*, comme la force électromotrice de polarisation d'un voltamètre ; elle doit se retrancher de la force électromotrice de la source pour le calcul de l'intensité du courant.

10. — 1° Prenons, par exemple, une pile, ou une machine génératrice magnéto-électrique, ou excitée en série, ou à excitation indépendante et relierons-la directement, par deux conducteurs au moteur, qui est également une machine magnéto-électrique, ou excitée en série. Désignons par E la force électromotrice de la source¹ ; par e la force contre-électromotrice développée dans l'induit du moteur ; par R la *résistance totale* du circuit, source, conducteurs, moteur ; par I l'intensité du courant obtenu dans le circuit, quand le moteur est immobilisé ; par i l'intensité du courant, quand le moteur tourne ; on a

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

et

$$i = \frac{E - e}{R}.$$

11. — 2° Quelle que soit la source électrique et son mode de liaison au moteur, si ce dernier est toujours une machine magnéto-électrique, ou excitée en série, en désignant par :

D , la différence de potentiel aux bornes du moteur ;

e , la force contre-électromotrice développée dans l'induit ;

1. Nous croyons utile de prévenir que E désigne la force électromotrice de la source et non pas la différence de potentiel mesurée entre les bornes de la source ou du moteur. Il importe d'éviter toute confusion à cet égard. Nous prendrons soin, d'ailleurs, de toujours désigner par des lettres différentes les forces électromotrices et les différences de potentiel entre deux points d'un circuit ; bien que des formules semblables puissent être, dans certains cas, appliquées aux deux sortes de grandeurs, elles peuvent avoir des valeurs très différentes.

i , l'intensité du courant entrant dans le moteur, quand il tourne ;

I , l'intensité du courant, quand le moteur est immobilisé ;

R_m , la résistance présentée par l'ensemble du moteur entre ses bornes,

on a aussi

$$I = \frac{D}{R_m},$$

et

$$i = \frac{D - e}{R_m}.$$

12. — 3° Quelle que soit la source et quel que soit le mode d'excitation du moteur, en désignant par :

Δ , la différence de potentiel entre les extrémités de l'induit, c'est-à-dire entre les balais ;

e , la force contre-électromotrice ;

i_a , l'intensité du courant pénétrant dans l'induit¹, quand le moteur tourne ;

I_a , l'intensité du courant pénétrant dans l'induit, quand le moteur est immobilisé ;

r_a , la résistance de l'induit,

on a

$$I_a = \frac{\Delta}{r_a},$$

et

$$i_a = \frac{\Delta - e}{r_a}.$$

Ce sont ces formules qu'il faut appliquer seules, lorsque le courant arrivant au moteur se bifurque pour passer en partie dans les inducteurs, en partie dans l'induit, comme

1. Le courant i_a représente le courant total pénétrant dans l'induit. On sait que, dans les machines bipolaires, ce courant se divise en deux parties égales pour parcourir séparément les deux moitiés de l'induit. Il peut se diviser en 4, en 6 parties, ou plus, dans les machines multipolaires.

cela a lieu pour les moteurs excités en dérivation, ou à excitation compound.

13. — Lorsque, comme c'est le cas pour les moteurs excités en dérivation, les balais sont réunis aux bornes par des conducteurs de résistance négligeable, on a aussi :

$$I_a = \frac{D}{r_a},$$

et

$$i_a = \frac{D - e}{r_a},$$

D étant la différence de potentiel aux bornes du moteur.

14. Relation entre la force contre-électromotrice d'un moteur électrique, le flux de force et la vitesse de rotation. — La force contre-électromotrice des électromoteurs est la force électromotrice d'induction développée dans les bobines de l'induit par sa rotation dans le champ magnétique inducteur; elle doit donc varier, comme la force électromotrice des machines génératrices, avec la vitesse de rotation, l'intensité du champ inducteur et les dimensions des bobines de l'induit. Pour trouver la relation entre ces diverses grandeurs, il nous suffira d'appliquer la loi générale de l'induction :

La force électromotrice moyenne d'induction développée dans un induit est égale à la variation pendant l'unité de temps, du flux de force qui le traverse.

La force électromotrice moyenne d'induction développée dans un induit est égale à la variation pendant l'unité de temps, du flux de force qui le traverse.

Considérons, par exemple, un moteur bipolaire, à anneau Gramme, tel que celui représenté schématiquement par la figure 4.

Supposons, pour une première approximation, que les balais amenant le courant dans l'induit du moteur appuient sur le collecteur en des points situés dans le plan $M M'$ perpendiculaire à la ligne des pôles inducteurs $N S$; supposons de plus que le flux de force développé dans l'induit par le

courant qui en parcourt les bobines n'exerce aucune action sur le flux de force créé par les inducteurs.

Désignons par Φ le flux inducteur passant dans une spire de l'induit placée dans le plan MM' ; dans l'hypothèse énoncée ci-dessus, Φ est la valeur maxima du flux inducteur traversant une spire et, par suite, la moitié du flux passant d'un pôle inducteur à l'autre à travers le fer de l'anneau induit. Comme le flux inducteur traversant une spire située dans le plan NS des pôles inducteurs est nul, la variation du flux dans une spire de l'induit est égale à Φ quand cette spire fait un quart de révolution.

En désignant par t la durée d'une révolution complète, la force électromotrice moyenne est donc, pour une spire,

$$e = \frac{\Phi}{\frac{t}{4}} = \frac{4\Phi}{t}.$$

Si les bobines de l'induit comprennent n spires, la force électromotrice moyenne est, pour une bobine,

$$e = \frac{4n\Phi}{t}.$$

Désignons par N le nombre des bobines placées sur l'anneau; comme l'induit est formé de deux moitiés réunies en quantité, $\frac{N}{2}$ bobines seulement sont en tension sur chaque moitié et ajoutent leurs forces électromotrices. La force électromotrice moyenne d'un moteur bipolaire est donc

$$e = \frac{4nN\Phi}{2t} = \frac{2nN\Phi}{t}.$$

Si V désigne la vitesse de rotation, c'est-à-dire le nombre de tours par minute, il vient

$$e = \frac{nNV\Phi}{30}.$$

Il est facile de voir que cette formule est applicable aux moteurs à tambour Siemens, ainsi qu'aux moteurs multipolaires.

En mettant en évidence les unités, on a

$$e^{\text{unités C. G. S.}} = \frac{nNV\Phi^{\text{unités C. G. S.}}}{30},$$

et

$$e^{\text{volts}} = \frac{nNV\Phi^{\text{unités C. G. S.}}}{30 \times 10^8}.$$

15. Modifications apportées dans le champ inducteur par l'action magnétisante du courant passant dans l'induit. — Nous avons, jusqu'à présent,

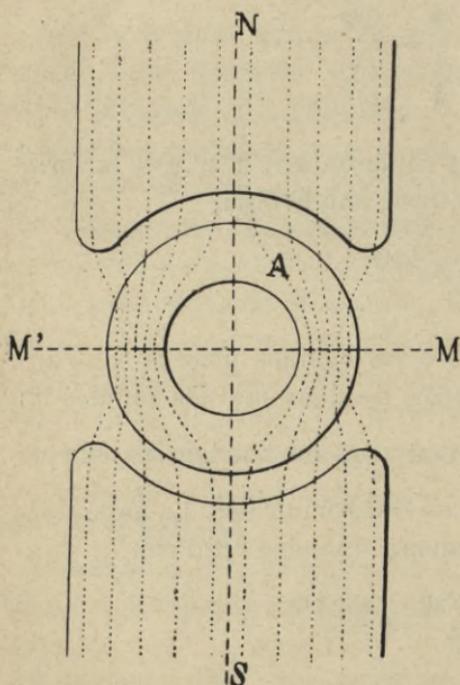


Fig. 5. — Champ magnétique d'un électromoteur sans courant dans l'induit.

supposé que le courant passant dans les bobines de l'induit n'apportait aucune modification dans la grandeur et la distribution du champ magnétique inducteur. Ce champ est alors tel que celui représenté par la figure 5, dans laquelle A est un simple anneau de fer, non enroulé de bobines.

Les lignes de force figurées en pointillé vont alors du pôle N à l'anneau, suivent les deux moitiés de l'anneau et regagnent le pôle S.

Dans la figure 6, on suppose que l'anneau A présente en *n* et *s* deux pôles, tels que ceux que pourraient y créer le courant arrivant dans

des bobines enroulées autour de cet anneau, par des balais placés dans le plan ns , ainsi d'ailleurs que nous l'avons supposé dans la figure 4. L'aimant circulaire ainsi produit développe un champ magnétique dont les lignes de force sont représentées dans la figure par des lignes pleines, allant du pôle n au pôle s , en passant par les masses polaires.

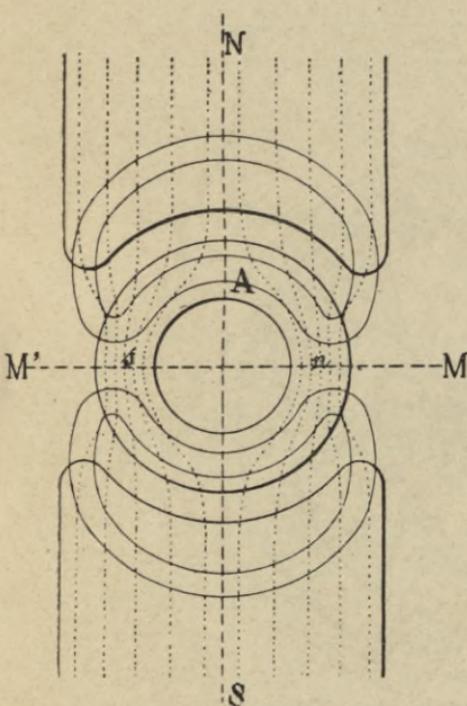


Fig. 6. — Champ magnétique inducteur et champ magnétique dû au courant passant dans l'induit.

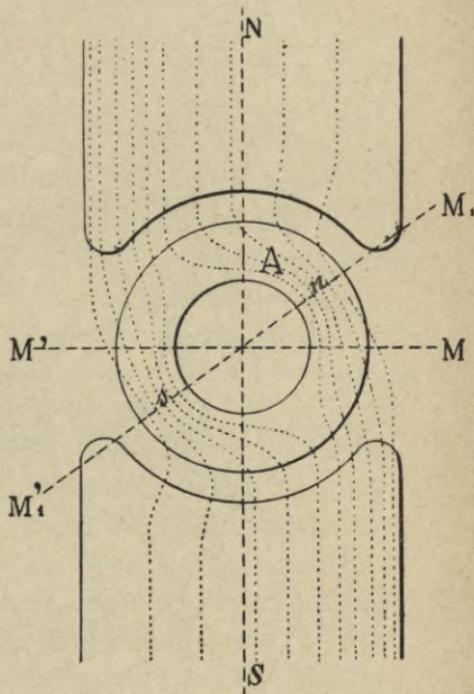


Fig. 7. — Champ magnétique résultant de la combinaison du champ inducteur et du champ dû au courant dans l'induit.

On voit alors aisément que la combinaison de ce champ avec le champ inducteur a pour effet de renforcer celui-ci dans l'entrefer à la partie supérieure de gauche et à la partie inférieure de droite, une diminution correspondante du champ ayant lieu dans les autres parties. Dans le fer de l'anneau, le flux est, au contraire, renforcé à la partie inférieure de gauche et à la partie supérieure de droite, puisque dans

l'aimant que cet anneau constitue, les lignes de force vont du pôle s au pôle n . Le champ résultant est représenté par la figure 7. On voit que les lignes de force partant des pôles inducteurs sont déviées vers les pôles de noms contraires de l'anneau A.

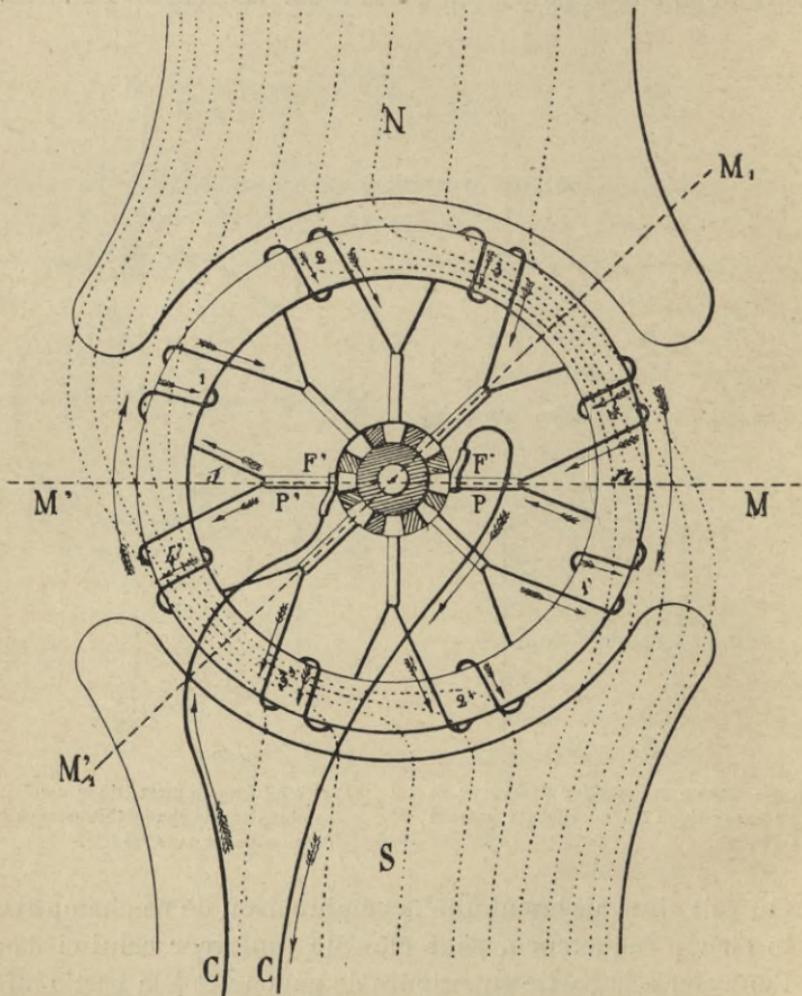


Fig. 8. — Calage des balais dans un électromoteur.

16. Calage des balais dans un électromoteur. — Une conséquence de la distorsion du champ magnétique in-

ducteur provoquée par l'aimantation de l'anneau induit due au courant passant dans ses bobines, est la nécessité de placer les balais amenant le courant non plus dans le plan perpendiculaire à la ligne des pôles inducteurs, mais dans un plan faisant avec le premier un certain angle, ainsi d'ailleurs qu'on est amené à le faire dans une machine génératrice.

Reprenons, en effet, le moteur bipolaire à anneau Gramme de 8 bobines qui nous a servi d'exemple dans l'étude générale du fonctionnement des électromoteurs (5); mais, tout en supposant les balais placés dans le plan perpendiculaire à la ligne des pôles inducteurs N S, nous tiendrons compte de la distorsion du champ magnétique dont nous venons de constater l'existence. La figure 8 représente schématiquement cette disposition. Le maximum du flux inducteur a lieu pour les sections de l'anneau situées non plus dans le plan MM', mais dans le plan $M_1 M_1'$. Il suit de là que si on applique la loi générale des actions mécaniques énoncée au n° 6, on voit que les bobines numérotées 1, 2 et 3 tendent à faire tourner l'anneau dans le sens de la flèche; il en est de même des bobines 1', 2' et 3'. Mais la bobine 4 tend à entraîner l'anneau en sens contraire pour rendre maximum le flux qui la traverse; il en est de même de la bobine 4'. L'anneau tournera dans le sens de la flèche, mais l'effort d'entraînement sera moins grand que si toutes les bobines agissaient dans le même sens, comme cela a lieu pour le champ non modifié que nous avons considéré tout d'abord (6). Pour rendre concordants les effets de toutes les bobines, il faut placer les balais dans le plan $M_1 M_1'$ où le flux inducteur est maximum, de façon que le courant étant inversé dans les bobines 4 et 4', leur action s'ajoute à celle des autres.

17. — Ainsi pour rendre maximum l'effort d'entraînement d'un moteur électrique, nous sommes conduits à appliquer la même règle que pour rendre maxima la force électromotrice d'une génératrice: placer les balais dans le plan où le flux inducteur traversant l'induit est maximum. Nous verrons

d'ailleurs que l'effort d'entraînement d'un électromoteur est proportionnel à sa force contre-électromotrice.

Mais il faut remarquer que, tandis que dans une machine génératrice l'application de la règle précédente conduit à *caler* les balais dans un plan *en avance* dans le sens du mouvement, par rapport au plan MM' normal à la ligne des pôles inducteurs, les moteurs devront avoir leurs balais calés *en arrière* du plan de calage théorique.

18. — Une autre considération influe sur le calage des balais dans les réceptrices, comme dans les génératrices. Si on donne aux balais d'un moteur une position quelconque, il se produit entre eux et les lames du collecteur des étincelles nombreuses et fortes qui peuvent amener la destruction rapide du collecteur. En déplaçant les balais on trouve une position pour laquelle les étincelles disparaissent ou sont réduites au minimum. Voici comment on peut se rendre compte de ce résultat. Les balais appuyant sur le collecteur par une surface de contact plus large que l'intervalle de deux lames, chaque bobine de l'induit est successivement mise en court-circuit au moment où elle passe dans le plan de contact des balais, puisque les deux lames voisines du collecteur auxquelles ses extrémités sont reliées sont simultanément en contact avec un des balais. Le courant passant dans la bobine et dû à la source électrique est donc brusquement supprimé, il se produit dans la bobine en court-circuit un extra-courant, de même sens que le courant précédent, auquel s'ajoute et succède pendant toute la durée du court-circuit le courant d'induction dû au mouvement de la bobine dans le champ magnétique. Lorsque le mouvement de rotation continuant, le balai quitte la lame du collecteur reliée à l'extrémité avant de la bobine, celle-ci rentre en circuit avec la seconde moitié de l'induit et elle est parcourue par un courant de sens inverse à celui qui la traversait avant son passage sous le balai.

Il se produira une étincelle entre le balai et la lame du collecteur qu'il abandonne, à moins que, pendant la durée

du court-circuit, le courant n'ait changé de sens dans la bobine et n'y ait pris une intensité égale à celle du courant de la partie de l'induit où entre cette bobine. Il faut pour cela que le courant d'induction développé dans la bobine pendant le court-circuit soit de même sens que le courant dans la seconde moitié de l'induit et que la force électromotrice d'induction dans la bobine ait une valeur suffisante. La mise en court-circuit et la commutation du courant dans les bobines ne devra donc pas se faire dans le plan où le champ magnétique inducteur est maximum, puisque l'induction est alors nulle, ni dans un plan en avance sur celui-là, puisque le courant d'induction serait alors de sens contraire à celui de la source, mais dans un plan en arrière.

19. — L'angle de calage des balais doit donc, si on veut éviter les étincelles, être encore plus grand que celui auquel on serait conduit, si on voulait obtenir l'effort d'entraînement maximum. Dans la pratique on calera toujours les balais de manière à obtenir le minimum d'étincelles, en consentant par cela même à une diminution de l'effort d'entraînement et de la force contre-électromotrice.

20. — L'angle de calage doit, d'après ce qui précède, varier avec l'intensité du courant passant dans l'induit. On évite l'obligation où l'on serait de modifier constamment le calage des balais en diminuant l'amplitude de ses variations, ce qui revient à rendre l'angle de calage lui-même petit, soit par une construction judicieuse du moteur, soit par des dispositifs de correction dont nous aurons occasion de parler.

L'invariabilité pratique du plan de calage des balais est plus importante encore pour un moteur que pour une génératrice ; dans la plupart des applications, en effet, les moteurs sont soumis à des régimes presque continuellement variables ; de plus, on a besoin souvent de changer le sens de la rotation et, si l'angle de calage n'est pas pratiquement nul, le calage devra être interverti en même temps.

21. Influence du calage des balais sur le flux inducteur et sur la force contre-électromotrice. —

En se reportant à la figure 8, on voit que le calage des balais en arrière du plan normal à la ligne des pôles inducteurs N S conduit à rapprocher les pôles n et s créés dans l'induit des pôles inducteurs de mêmes noms. Le magnétisme de l'induit tend donc à diminuer celui des inducteurs et cela d'autant plus que le courant dans l'induit est plus intense.

D'autre part, puisque la recherche du minimum d'étincelles conduit à caler les balais dans un plan autre que celui correspondant au maximum du flux inducteur, un certain nombre de bobines doivent développer des forces électromotrices en opposition avec celles des autres bobines en tension avec elles dans la même moitié de l'induit. Dans le calcul de la force contre-électromotrice (14), il faut donc supposer réduit le nombre des bobines, ou, ce qui revient au même, supposer diminué le flux Φ , qui n'est plus alors le flux inducteur maximum passant dans une spire. Cette réduction de la force contre-électromotrice augmente avec l'angle de calage, c'est-à-dire avec l'intensité du courant passant dans l'induit.

22. Relation entre le flux inducteur et l'excitation des électro-aimants. —

Les noyaux de fer des électro-aimants inducteurs, le fer de l'induit et les entrefers forment un ou plusieurs circuits magnétiques. Pour chaque type d'électromoteur en particulier, ces circuits sont faciles à établir et le flux de force passant dans chacun d'eux sera donné par la relation

$$\Phi = \frac{\mathfrak{F}}{\Sigma \mathfrak{R}},$$

\mathfrak{F} étant la force magnétomotrice des électro-aimants qui produisent le flux dans le circuit considéré et $\Sigma \mathfrak{R}$ la somme des résistances magnétiques des diverses parties de ce circuit.

Considérons, par exemple, un électromoteur dont l'induit

soit un anneau Gramme G H et dont l'inducteur soit formé par deux électro-aimants A, B placés l'un à la suite de l'autre dans le même circuit (fig. 9). Le circuit magnétique est représenté par les lignes pointillées. On voit que le flux, après avoir traversé l'entrefer D placé vis-à-vis de la masse polaire P, se divise en deux parties qui parcourent les deux moitiés G et H de l'anneau, puis se réunissent pour traverser le second entrefer F et reprendre le circuit général par la masse polaire Q.

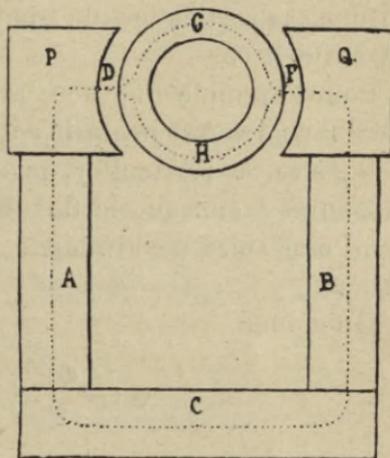


Fig. 9. — Circuit magnétique d'un électromoteur.

En désignant par i le courant passant dans le fil des électro-aimants et par n_1 le nombre des spires sur un électro-aimant, on a

$$\mathfrak{F} = 4\pi \times 2n_1 \times i.$$

Le flux de force Φ_1 créé par les électro-aimants est donc

$$\Phi_1 = \frac{8\pi n_1 i}{\Sigma \mathfrak{R}}.$$

Le flux créé par les inducteurs ne passe pas tout entier dans l'induit. Une partie est dérivée d'un noyau des électro-aimants à l'autre ; une partie passe aussi d'une masse polaire à l'autre, sans traverser l'induit. Le flux inducteur utile Φ_2 est donc une fraction de Φ_1 et on a

$$\Phi_2 = \frac{1}{v} \times \Phi_1 = \frac{1}{v} \times \frac{8\pi n_1 i}{\Sigma \mathfrak{R}},$$

v étant un nombre plus grand que 1, dépendant des dis-

positions particulières des électro-aimants inducteurs (c'est ce qu'on appelle le coefficient d'Hopkinson). Les lois des dérivations appliquées au flux magnétique permettront, dans chaque cas particulier, de trouver pour v une valeur au moins approximative.

Pour l'exemple que nous avons choisi (fig. 9), le coefficient v pourra être compris entre 1, 3 et 1, 4.

Dans ce cas particulier, qui est celui de toutes les machines bipolaires à anneau, le flux Φ inducteur maximum passant dans une spire de l'induit est la moitié du flux inducteur utile.

On a donc

$$\Phi = \frac{\Phi_2}{2} = \frac{1}{v} \times \frac{4\pi n_1 i}{\Sigma \mathfrak{R}}.$$

23. — C'est cette valeur du flux Φ qu'il faudrait introduire dans l'expression de la force contre-électromotrice du moteur (14), si on n'avait pas à tenir compte de la réaction de l'induit.

Nous avons vu (21) que, par suite du décalage des balais, le flux doit être diminué d'une quantité d'autant plus grande que le courant passant dans l'induit est plus intense.

Nous pourrions donc écrire que la force contre-électromotrice est

$$e = \frac{nNV\Phi'}{30},$$

avec la relation

$$\Phi' = \Phi - K i_a,$$

i_a étant l'intensité du courant passant dans l'induit.

On voit que Φ' augmente, d'une part, avec le courant inducteur et diminue, d'autre part, quand le courant dans l'induit augmente.

Il faut toutefois bien remarquer que le terme $K i_a$ est un terme de correction et que, d'une manière générale, Φ' et,

par suite, la force contre-électromotrice, augmente avec le courant inducteur, tant que les inducteurs ne sont pas saturés.

Nous devons ajouter que la réaction d'induit est plus faible dans les machines à tambour que dans les machines à anneau.

24. Puissance électrique totale dépensée dans un électromoteur. — Si on désigne par D la différence de potentiel aux bornes de l'électromoteur et par i l'intensité du courant qui arrive aux bornes et pénètre dans le moteur, la puissance électrique totale P dépensée dans le moteur est

$$P = Di.$$

En mettant en évidence les unités employées, on aura

$$P^{\text{watts}} = D^{\text{volts}} \times i^{\text{ampères}},$$

ou

$$P^{\text{kgm/s}} = \frac{D^{\text{volts}} \times i^{\text{ampères}}}{9,81}.$$

25. — Une partie de la puissance totale P est absorbée par la rotation du moteur; nous la désignerons par p . Une autre partie est absorbée par l'échauffement des conducteurs formant le moteur, conformément à la loi de Joule; nous la représenterons par p_c .

On peut donc écrire

$$P = p + p_c.$$

On peut toujours calculer facilement p_c connaissant la résistance des diverses parties constitutives du moteur et l'intensité du courant qui les parcourt.

1. Nous emploierons, dans le courant de ce travail, pour représenter l'expression : *kilogrammètres par seconde*, l'abréviation kgm/s . De même *mètres par seconde* s'écrira : m/s . Ainsi $P^{\text{kgm/s}}$ veut dire : la puissance P mesurée en *kilogrammètres par seconde*.

26. Puissance absorbée par l'échauffement des conducteurs formant le moteur. — Nous distinguerons les moteurs d'après leur mode d'excitation.

27. — 1° Si le moteur a des aimants permanents comme inducteurs, ou s'il est excité en série, en appelant R_m la résistance totale du moteur, inducteurs et induit additionnés, comme l'intensité du courant qui parcourt les diverses parties est la même et égale à l'intensité i du courant entrant dans le moteur, on a, d'après la formule de Joule,

$$p_c = R_m i^2.$$

En mettant en évidence les unités

$$p_c^{\text{watts}} = R_m^{\text{ohms}} \times (i^{\text{ampères}})^2,$$

ou

$$p_c^{\text{kgm/s}} = \frac{R_m^{\text{ohms}} \times (i^{\text{ampères}})^2}{9,81}.$$

28. — 2° Pour un moteur excité en déviation (fig. 2), le courant i entrant dans le moteur se bifurque aux bornes en deux parties, l'une passant dans les inducteurs, que nous désignerons par i_d , l'autre passant dans l'induit, que nous appellerons i_a . Les résistances respectives des inducteurs en dérivation et de l'induit étant r_d et r_a , on a pour la puissance transformée en chaleur, tant dans les inducteurs que dans l'induit,

$$p_c = r_d i_d^2 + r_a i_a^2.$$

Les unités à employer sont les mêmes que dans le cas précédent.

29. — 3° Enfin dans un moteur à excitation compound (fig. 3), comprenant, outre les inducteurs en dérivation sur l'induit, des électro-aimants, ou, tout au moins, des bobines inductrices placées en série, le courant pénétrant dans l'induit

parcourt entre les bornes du moteur et les balais du collecteur les électro-aimants, ou la partie du fil des électro-aimants, placés en série, avec l'intensité i . Aux balais le courant se bifurque entre le fil en dérivation des électro-aimants qu'il parcourt avec l'intensité i_a et l'induit qui est traversé par l'intensité i_a . En désignant par r_g , r_d et r_a les résistances respectives du fil inducteur en série, du fil inducteur en dérivation et de l'induit, on a donc

$$p_c = r_g i^2 + r_d i_a^2 + r_a i_a^2.$$

30. — Nous pouvons mettre l'expression de p_c sous une autre forme identique pour tous les modes d'excitation, en appliquant les formules de Ohm aux divers conducteurs formant l'électromoteur et en ayant soin de tenir compte de la force contre-électromotrice e développée dans l'induit lorsqu'il s'agit d'un conducteur comprenant l'induit. Nous désignerons par D la différence de potentiel aux bornes et par Δ la différence de potentiel aux balais, ces deux grandeurs pouvant d'ailleurs parfois se confondre, ainsi qu'il arrive pour les moteurs excités en dérivation.

31. — 1° Pour les moteurs en série ou à aimants permanents, nous avons dit (41) qu'on a

$$R_m i = D - e,$$

R_m désignant la résistance totale du moteur entre ses bornes.

En substituant cette valeur dans l'expression de p_c trouvée précédemment (27), il vient

$$p_c = (D - e)i = Di - ei.$$

32. — 2° Pour un moteur en dérivation, les inducteurs n'étant pas le siège de force électromotrice, on a

$$i_a = \frac{D}{r_d}.$$

L'induit, au contraire, étant le siège de la force contre-électromotrice e , on a (13)

$$i_a = \frac{D - e}{r_a}.$$

En remplaçant $i_d r_d$ et $i_a r_a$ par leurs valeurs dans l'expression de p_c (28), il vient

$$p_c = D i_d + (D - e) i_a.$$

Comme, d'ailleurs, l'intensité du courant i entrant dans le moteur est égale à la somme des intensités des courants i_d et i_a entre lesquels il se divise aux bornes, on a aussi

$$p_c = D i - e i_a.$$

33. — 3° Si le moteur est à excitation compound, on a

$$i = \frac{D - \Delta}{r_g},$$

$$i_d = \frac{\Delta}{r_d},$$

$$i_a = \frac{\Delta - e}{r_a}.$$

en substituant dans l'expression de p_c (29), il vient

$$p_c = (D - \Delta) i + \Delta i_d + (\Delta - e) i_a.$$

En tenant toujours compte de la relation

$$i = i_d + i_a,$$

on obtient

$$p_c = D i - e i_a.$$

34. — Cette expression de p_c est donc générale, si l'on veut bien remarquer que, dans le cas d'un moteur en série, le courant i entrant dans le moteur est aussi celui qui passe dans l'induit.

35. Puissance électrique absorbée par la rotation d'un moteur. — Il est maintenant aisé de calculer la puissance p absorbée par la rotation d'un moteur. Des relations

$$P = Di,$$

$$P = p + p_c,$$

et

$$p_c = Di - ei_a,$$

on tire

$$p = ei_a.$$

La puissance électrique absorbée par la rotation d'un moteur est égale au produit de sa force contre-électromotrice par l'intensité du courant passant dans l'induit.

En mettant, une fois de plus, en évidence les unités employées, on a

$$p^{\text{watts}} = e^{\text{volts}} \times i_a^{\text{ampères}},$$

$$p^{\text{kgm/s}} = \frac{e^{\text{volts}} \times i_a^{\text{ampères}}}{9,81}.$$

36. Puissance mécanique développée par un électromoteur. — La puissance électrique $p = e i_a$ absorbée par la rotation du moteur ne pourrait être tout entière transformée en travail mécanique utilisable que par un moteur idéal *sans frottements*.

Cette valeur $e i_a$ représente donc la *puissance mécanique théorique* du moteur.

37. — En réalité les moteurs électriques, comme toutes les machines, comportent des frottements. Il en est de plusieurs sortes.

D'abord les frottements proprement dits, de l'arbre dans ses coussinets, des balais sur le collecteur, de l'induit sur l'air, absorbent une partie de la puissance avec production de chaleur. Cette cause de perte est généralement assez faible,

si le graissage est convenable et si les balais ne sont pas trop appuyés sur le collecteur. Il est bon de remarquer, toutefois, que cette perte de puissance augmente avec la vitesse de rotation.

38. — En second lieu, dans toutes les masses métalliques mobiles par rapport au champ magnétique inducteur et ne faisant pas partie du circuit proprement dit se développent des courants d'induction, dits de Foucault, qui consomment encore une partie de la puissance employée à la rotation du moteur. Nous savons que ces courants de Foucault se traduisent par un échauffement des masses métalliques ; on peut donc les considérer comme des *frottements intra-métalliques*.

39. — Enfin le moteur comprend un certain nombre de pièces magnétiques dont l'aimantation éprouve des variations.

Une partie de la puissance électrique employée à la rotation du moteur est encore absorbée par le phénomène connu d'*hystérésis*, qui peut être appelé *frottement magnétique*, cette perte de puissance se manifestant encore sous forme de chaleur développée dans les pièces magnétiques qui en sont le siège.

Nous devons ajouter que la perte par courants de Foucault et par hystérésis augmente avec le champ inducteur et avec la vitesse de rotation.

Il faut remarquer, en outre, que ces frottements divers, ces *effets parasites*, comme on les nomme parfois, constituent des *forces antagonistes* opposées au mouvement du moteur.

40. — En désignant par p_f la puissance absorbée par les divers frottements que nous venons d'examiner, il reste, pour la puissance mécanique utilisable p_u développée par le moteur,

$$p_u = p - p_f = ei_a - p_f.$$

La puissance mécanique utile p_u peut se mesurer par l'ap-

plication d'un frein sur l'arbre du moteur. Si l'on a mesuré, d'autre part, la force électromotrice e et le courant i_a passant dans l'induit, on pourra calculer la puissance p_f absorbée par les frottements, les courants de Foucault, l'hystérésis, c'est-à-dire par tous les effets parasites.

41. — On peut même, dans certains cas, séparer la perte provenant des courants de Foucault de celle due à l'hystérésis et aux frottements proprement dits.

Quelquefois, on traduit dans les formules l'influence des effets parasites en écrivant que la puissance mécanique utile n'est qu'une fraction de la puissance mécanique théorique.

$$p_u = \gamma p = \gamma e i_a,$$

γ étant au nombre plus petit que 1, variable avec le champ inducteur et la vitesse de rotation.

42. — Rendement d'un électromoteur. — On appelle *rendement électrique* d'un électromoteur le rapport de la *puissance absorbée par la rotation* du moteur à la *puissance électrique totale dépensée* dans le moteur. En représentant toujours ces deux puissances par p et P , on a donc

$$\text{Rendement électrique} = \frac{p}{P}.$$

En remplaçant p et P par les valeurs trouvées précédemment, il vient

$$\text{Rendement électrique} = \frac{e i_a}{D i}.$$

Dans le cas d'un moteur excité en série, ou à aimants permanents, comme le courant i passant dans l'induit est égal au courant i entrant dans le moteur, on a, plus simplement,

$$\text{Rendement électrique} = \frac{e}{D}.$$

Le rendement est alors, mais dans ce cas seulement, le rapport de la force contre-électromotrice développée par le moteur à la différence de potentiel maintenue entre ses bornes par la source électrique.

43. — Le *rendement industriel* d'un électromoteur est le rapport de la *puissance mécanique utile développée* à la *puissance électrique totale dépensée*. On a donc, en conservant aux lettres leurs significations précédentes,

$$\text{Rendement industriel} = \frac{p_u}{P}.$$

En remplaçant p_u et P par leurs valeurs, il vient

$$\text{Rendement industriel} = \frac{ei_a - p_f}{Di},$$

ou

$$\text{Rendement industriel} = \frac{\gamma ei_a}{Di}.$$

Si l'on veut bien mettre en évidence les causes qui concourent à diminuer le rendement, il faut l'écrire sous la forme

$$\text{Rendement industriel} = \frac{p - p_f}{p + p_c},$$

ou

$$\text{Rendement industriel} = \frac{ei_a - p_f}{ei_a + p_c}.$$

On voit alors que les effets parasites représentés par p_f diminuent le numérateur du rapport, tandis que l'échauffement des conducteurs du moteur représenté par p_c augmente le dénominateur.

44. Moment de rotation développé par un électromoteur. — Désignons par F la force tangentielle d'entraînement en un point de l'arbre du moteur, ou de la

circonférence d'une poulie montée sur l'arbre, et par r le rayon de l'arbre ou de la poulie. Le moment T de la force F par rapport à l'axe de rotation, c'est-à-dire le *moment de rotation* du moteur, est

$$T = Fr.$$

Le moment de rotation s'appelle parfois aussi *moment du couple moteur*, ou, par abréviation, *couple moteur*, ou *moment moteur*. Nous emploierons souvent cette dernière désignation. La force F prend les noms *d'effort d'entraînement*, ou *effort moteur*.

Le travail accompli par la force F pendant une révolution de l'arbre est égal à $2\pi r \times F$ et, si le moteur fait v tours par seconde, le travail accompli par seconde, ou la puissance mécanique du moteur, puissance que nous avons déjà désignée par p , sera :

$$p = 2\pi rvF = 2\pi vT.$$

Or, nous avons trouvé (35).

$$p = ei_a.$$

On en déduit

$$T = \frac{ei_a}{2\pi v}.$$

En mettant en évidence les unités employées, on a

$$T^{\text{joules}} = \frac{e^{\text{volts}} \times i_a^{\text{ampères}}}{2\pi v},$$

ou

$$T^{\text{kilogrammètres}} = \frac{e^{\text{volts}} \times i_a^{\text{ampères}}}{2\pi v \times 9,81}.$$

Si la vitesse de rotation est exprimée en *tours par minute*, soit V cette vitesse, on a

$$T^{\text{kilogrammètres}} = \frac{60e^{\text{volts}} \times i_a^{\text{ampères}}}{2\pi V \times 9,81}.$$

Connaissant le moment T et le rayon r d'application de l'effort moteur F , on déduira aisément la valeur de ce dernier.

On aura, par exemple,

$$F^{\text{kilogrammes}} = \frac{30e^{\text{volts}} \times i_a^{\text{ampères}}}{\pi V \times 9,81 \times r^{\text{mètres}}}$$

45. REMARQUE. — Il importe essentiellement de faire observer que l'effort moteur ainsi calculé est en partie équilibré, lorsque le moteur tourne à une certaine vitesse, par les forces antagonistes parasites résultant des frottements proprement dits, de la réaction des courants de Foucault sur les inducteurs en vertu de la loi de Lenz et de l'hystérésis (37). Nous appellerons *effort résistant parasite* la résultante de ces forces parasites et nous la représenterons par F_r . Pour une vitesse donnée, l'*effort résistant utile* F_u que l'on peut opposer au moteur n'est donc qu'une fraction de l'effort moteur F . L'équilibre est obtenu à cette vitesse, lorsqu'on a la relation

$$F = F_u + F_r.$$

L'effort résistant utile s'appelle aussi la *charge* du moteur.

De la même manière, on appelle *moment résistant parasite*, ou simplement *moment parasite*, le moment de l'effort résistant parasite par rapport à l'axe de rotation, et *moment résistant utile*, ou *moment utile*, le moment de l'effort résistant utile. En les désignant respectivement par T_r et T_u , on doit avoir, pour la vitesse d'équilibre,

$$T = T_u + T_r.$$

Il faut remarquer d'ailleurs que les moments T , T_u et T_r sont égaux aux puissances correspondantes p , p_u et p_r divisées par $\frac{\pi V}{30}$.

46. Variation des effets parasites avec la vitesse de rotation. — Dans les moteurs construits rationnellement et de grande puissance, les effets parasites ont en général peu d'importance, au voisinage de la puissance utile normale pour laquelle ils sont établis ; mais il n'en est pas ainsi pour les petits moteurs, dans lesquels, en particulier, les frottements mécaniques peuvent absorber une fraction considérable de la puissance. Dans les grands moteurs, d'ailleurs, lorsque l'effort résistant utile est faible, l'effort résistant parasite peut acquérir une valeur relative assez grande pour influencer sur le fonctionnement. Il n'est donc pas sans intérêt de mettre en évidence, au moins sommairement, les causes de variation des effets parasites, pour un moteur donné.

47. 1° FROTTEMENTS PROPREMENT DITS. — Dans les mêmes conditions d'entretien des parties frottantes, on peut considérer comme constant le moment résistant créé par les frottements proprement dits, quels que soient la vitesse et le champ magnétique inducteur. La puissance absorbée par les frottements est donc proportionnelle à la vitesse.

48. 2° COURANTS DE FOUCAULT. — Les courants de Foucault développés dans un moteur auront d'autant moins d'importance qu'on aura divisé avec plus de soin les masses métalliques mobiles dans le champ magnétique. Mais, pour un moteur une fois construit, ces courants peuvent encore varier avec le champ inducteur et la vitesse de rotation.

Les courants de Foucault se développant dans des circuits invariables sont proportionnels à la force électromotrice d'induction, c'est-à-dire au produit du champ magnétique inducteur par la vitesse de rotation. Si le champ inducteur est constant, l'intensité des courants de Foucault est simplement proportionnelle à la vitesse.

La puissance absorbée est proportionnelle au carré du champ inducteur multiplié par le carré de la vitesse, ou

simplement au carré de la vitesse, si le champ inducteur est constant.

Le moment résistant parasite qui en résulte est proportionnel au produit du carré du champ par la vitesse, ou simplement à la vitesse, si le champ est constant.

49. 3° HYSTÉRÉSIS. — La puissance perdue par hystérésis provenant des variations du magnétisme des pièces magnétiques du moteur peut être regardée comme proportionnelle au champ inducteur et à la vitesse. Pour un champ inducteur constant, la puissance perdue est donc simplement proportionnelle à la vitesse.

Le moment résistant résultant de l'hystérésis est proportionnel au champ inducteur ; il est indépendant de la vitesse. Si le champ inducteur est constant, ce moment parasite est également constant.

50. — On peut donc écrire, pour l'expression de la puissance p_f absorbée par les effets parasites,

$$p_f = a\Phi'^2 V^2 + b\Phi' V + cV,$$

V désignant la vitesse et Φ' le flux de force passant dans les bobines de l'induit, a , b , c étant des coefficients relatifs aux courants de Foucault, à l'hystérésis et aux frottements proprement dits et dépendant des données de construction.

On a aussi en désignant par T_f le moment résistant parasite,

$$T_f = \frac{30a\Phi'^2 V}{\pi} + \frac{30b\Phi'}{\pi} + \frac{30c}{\pi}.$$

51. Équilibre d'un électromoteur. — Nous pouvons maintenant étudier les conditions d'équilibre d'un électromoteur en activité. Nous dirons qu'un électromoteur en mouvement est *en équilibre*, lorsque aucune cause ne tend à modifier sa vitesse de rotation. La condition fondamentale de cet équilibre est que le moment moteur soit égal au mo-

ment résistant. En mettant en évidence que ce dernier est la somme du moment résistant utile et du moment résistant parasite et en conservant les notations précédentes, nous aurons donc l'équation d'équilibre

$$(1) \quad T = T_u + T_r.$$

Il est clair qu'une augmentation du moment moteur, ou une diminution du moment résistant, tendront à accélérer le mouvement; qu'une diminution du moment moteur, ou une augmentation du moment résistant, tendront à ralentir le mouvement, à détruire, par conséquent, l'équilibre.

On peut faire varier directement le moment résistant utile appliqué au moteur; on peut aussi faire varier le moment moteur, en agissant par exemple sur la source électrique, ou sur les liaisons de la source avec le moteur.

Nous savons exprimer le moment moteur T en fonction de la force contre-électromotrice et du courant dans l'induit (44)

$$(2) \quad T = \frac{60ei_a}{2\pi V}.$$

La force contre-électromotrice elle-même peut s'écrire (23)

$$(3) \quad e = \frac{2nNV\Phi'}{60 \times 10^8}.$$

Le moment moteur peut donc aussi s'écrire

$$T = \frac{nN\Phi' i_a}{\pi \times 10^8}.$$

Le moment parasite T_r est aussi fonction de la vitesse V et du flux Φ' (50); on a ainsi une quatrième relation

$$(4) \quad T_r = \frac{30a\Phi'^2 V}{\pi} + \frac{30b\Phi'}{\pi} + \frac{30c}{\pi}.$$

Enfin le flux Φ' dépend, pour un moteur donné, de l'inten-

sité du courant passant dans le fil des électro-aimants inducteurs (22). Or ce dernier est relié, d'une manière plus ou moins complexe, et qui varie avec le mode d'excitation des électro-aimants, aux données caractéristiques de la source électrique et à la force contre-électromotrice. Nous pouvons donc dire que le flux Φ' dépend de la force contre-électromotrice et de la source électrique; en tenant compte de la réaction de l'induit et du calage des balais, nous savons qu'il faut aussi considérer le flux Φ' comme variable avec le courant dans l'induit (23).

Quoi qu'il en soit, on voit donc qu'il existe 5 relations distinctes entre les grandeurs, T , T_u , T_r , e , i_a , V , Φ' . Par suite, si on donne à deux de ces grandeurs des valeurs particulières, toutes les autres prennent aussi des valeurs déterminées.

L'équilibre d'un électromoteur est donc caractérisé par les valeurs particulières données, par exemple, au moment résistant utile et à la vitesse, au moment résistant utile et au flux inducteur, à l'intensité du courant dans l'induit et à la vitesse, etc. L'équilibre se maintient tant que ces valeurs restent constantes.

52. — L'équilibre est détruit, si on modifie la valeur d'une des grandeurs caractéristiques et, en général, un nouvel équilibre s'établit, avec des modifications correspondantes dans la valeur des autres grandeurs. Il faut remarquer, cependant, que l'une des grandeurs peut rester constante dans les différents équilibres successifs.

On dit quelquefois, pour signifier que le moteur est en équilibre, qu'il *a atteint son régime*, qu'il *fonctionne à son régime*. On dit de même que le *régime change* quand un nouvel équilibre remplace le premier.

53. Condition de stabilité d'équilibre d'un électromoteur. — Dans la pratique, il est impossible de maintenir rigoureusement constantes deux des grandeurs

caractéristiques d'un électromoteur. Souvent même les variations de ces grandeurs sont une conséquence directe et nécessaire de l'utilisation particulière du moteur. Il faut donc qu'un électromoteur puisse facilement et rapidement passer d'un état d'équilibre à un autre. On ne saurait admettre, par exemple, dans la pratique, un moteur électrique qui, étant animé d'une certaine vitesse d'équilibre correspondant à un moment résistant utile déterminé, stopperait, ou prendrait des vitesses exagérées, lorsque ce moment résistant éprouverait de très faibles accroissements ou diminutions.

Les modifications apportées, volontairement ou non, dans la grandeur du moment résistant utile appliqué à l'électromoteur ne peuvent tout d'abord que provoquer des variations dans la vitesse. Comme nous l'avons dit, une diminution du moment résistant accroît la vitesse; une augmentation la réduit. Nous dirons que l'équilibre du moteur est *stable*, quand les variations de la vitesse, conséquences des modifications du moment résistant utile, entraînent des modifications dans la valeur du moment moteur et du moment résistant parasite permettant d'obtenir rapidement un nouvel équilibre.

Nous dirons que la *stabilité d'équilibre*, ou la *stabilité de fonctionnement*, d'un électromoteur est d'autant plus grande que la vitesse éprouve de plus faibles variations lorsqu'on fait varier les grandeurs caractéristiques et, en particulier, le moment résistant utile.

54. — Il est facile de montrer que le fonctionnement d'un moteur ne saurait en général être stable, lorsque le moment de rotation augmente avec la vitesse.

Supposons, en effet, qu'à un moment donné le moteur soit en équilibre et tourne à une vitesse V avec un moment de rotation T et un moment résistant $T_u + T_r$ égal au premier. Si, par exemple, le moment résistant utile T_u augmente légèrement, la vitesse tend à diminuer; or le moment de rotation

diminuant lui-même quand la vitesse diminue, on voit que la diminution de vitesse doit s'accuser de plus en plus, jusqu'à l'arrêt complet du moteur. Il est vrai que le moment parasite T_f pourra aussi diminuer en même temps que la vitesse ; mais, outre que ce moment parasite est toujours une faible fraction du moment de rotation, dans les moteurs bien construits, la diminution de ce moment parasite est généralement moins rapide que celle du moment de rotation. Toutefois, si nous voulons être absolument corrects, nous devons dire que l'équilibre d'un moteur ne saurait être stable lorsque la différence $T - T_f$ entre le moment de rotation et le moment parasite augmente avec la vitesse.

On voit aussi que, le moment résistant utile étant légèrement diminué, la vitesse tendant à croître, si le moment de rotation ou, plus exactement, la différence $T - T_f$ augmente avec la vitesse, l'accroissement de vitesse sera toujours considérable.

On doit donc considérer, d'une manière générale, comme *instable* le fonctionnement d'un moteur dont le moment de rotation ou tout au moins le moment de rotation diminué du moment parasite varie dans le même sens que la vitesse.

Il peut arriver que le moment de rotation d'un moteur diminué du moment parasite augmente avec la vitesse pour des vitesses comprises entre 0 et une valeur V_1 , et que le moment de rotation diminue quand la vitesse augmente au delà de V_1 . Dans ce cas, le fonctionnement du moteur est instable pour les vitesses comprises entre 0 et V_1 ; il est stable pour les vitesses supérieures.

Le sens de la variation du moment de rotation d'un moteur ne dépend pas uniquement du mode de construction particulier du moteur et de son excitation ; il est étroitement lié à la manière dont la source électrique est en relation avec le moteur. Nous verrons, dans le chapitre suivant, quelques exemples d'instabilité dépendant de la source électrique.

CHAPITRE III

DIVERS MODES D'EXCITATION DES ÉLECTROMOTEURS PROPRIÉTÉS QUI EN DÉRIVENT

§ 1. — Électromoteurs excités en série.

55. Sens de la rotation des machines excitées en série employées comme réceptrices. — Supposons qu'une machine électrique employée comme génératrice produise un courant d'un certain sens. Si on lance maintenant dans la machine servant de réceptrice un courant de même sens que le précédent et provenant d'une source électrique, la machine prendra un mouvement de sens inverse à celui qu'elle avait comme génératrice, en vertu de la loi de Lenz (7).

Si on change le sens du courant lancé dans la machine réceptrice, le sens de la rotation ne change pas, parce que le champ magnétique est inversé en même temps que le courant dans l'induit et la machine tourne toujours en sens inverse de son mouvement comme génératrice.

Pour inverser le sens du mouvement il faut changer, non pas le sens du courant arrivant au moteur, mais le sens du courant circulant dans l'induit seulement, ou les inducteurs seulement.

56. — Relation entre les divers éléments d'un électromoteur excité en série fonctionnant en équilibre. — Désignons par :

- i , le courant entrant dans le moteur par ses bornes et en parcourant successivement les diverses parties ;
- r_g , la résistance des inducteurs ;

- r_a , la résistance de l'induit ;
 e , la force contre-électromotrice développée par le moteur ;
 D , la différence de potentiel aux bornes ;
 Δ , la différence de potentiel aux balais ;
 P , la puissance électrique totale dépensée dans le moteur ;
 p_c , la puissance électrique absorbée par l'échauffement des conducteurs ;
 p , la puissance électrique absorbée par la rotation ;
 p_u , la puissance mécanique utile développée ;
 p_f , la puissance absorbée par les effets parasites ;
 T , le moment de rotation ;
 T_u , le moment résistant utile ;
 T_f , le moment résistant parasite ;
 V , la vitesse de rotation ;
 n , le nombre de spires dans chaque bobine de l'induit ;
 N , le nombre des bobines de l'induit ;
 Φ' , le flux de force maximum dans une spire de l'induit ;

Nous avons entre ces diverses grandeurs les relations suivantes :

- (1) $D - e = i(r_g + r_a),$
- (2) $\Delta - e = ir_a,$
- (3) $P = p_c + p = Di,$
- (4) $p_c = (r_g + r_a) i^2,$
- (5) $p = ei,$
- (6) $p = p_u + p_f,$
- (7) $p_f = a\Phi'^2 V^2 + b\Phi' V + cV,$
- (8) $T = \frac{30p}{\pi V},$
- (9) $T_u = \frac{30p_u}{\pi V},$
- (10) $T_f = \frac{30p_f}{\pi V},$
- (11) $e = \frac{nNV\Phi'}{30 \times 10^8},$
- (12) $\Phi' = \Lambda i - Ki.$

57. — Dans les relations précédentes, nous supposons les grandeurs électriques, intensité, force électromotrice, résistances exprimées en ampères, volts, ohms ; les puissances sont exprimées en watts, les moments en joules ; le flux de force est donné en unités C. G. S ; la vitesse est le nombre de tours par minute.

Nous avons déjà vu séparément ces diverses relations. L'équation (7) est la traduction algébrique des remarques faites précédemment au sujet de la puissance perdue par les effets parasites (46). Les coefficients a , b , c sont des nombres relatifs aux courants de Foucault, à l'hystérésis et aux frottements proprement dits ; ils dépendent des données de construction du moteur, mais peuvent être considérés comme indépendants de la vitesse et du flux de force.

Dans l'équation (12), le nombre A dépend du nombre de spires enroulées sur les électro-aimants inducteurs et de la résistance magnétique des pièces constituant le circuit magnétique, c'est-à-dire des dimensions de ces pièces ; le terme Ki est introduit pour tenir compte de la réaction d'induit et du décalage (23) ; il est généralement faible dans les moteurs bien construits.

58. — Étant donné un électromoteur en série, c'est-à-dire connaissant les dimensions de l'induit et de l'inducteur, les nombres n et N , les résistances r_a et r_g , il existe donc 12 relations distinctes entre les 14 autres grandeurs introduites dans les formules précédentes et qui correspondent à un état d'équilibre du moteur. Cet état d'équilibre est donc bien toujours déterminé quand on connaît deux des grandeurs (51). Dire, par exemple, d'un moteur en série qu'il fonctionne avec un courant de i ampères et une différence de potentiel aux bornes de D volts, c'est préciser en même temps la vitesse de rotation, le moment du couple moteur, la puissance développée, etc.

59. — Pour bien connaître un électromoteur, il ne suffit

pas d'avoir les éléments caractéristiques d'un état d'équilibre déterminé. Il faut étudier la succession des états d'équilibre qu'il peut être appelé à prendre par suite de son fonctionnement. On conçoit, en particulier, que c'est à cette condition seulement qu'on pourra connaître et choisir, s'il y a lieu, le fonctionnement le plus économique.

Nous avons dit que les divers équilibres d'un moteur s'obtenaient en faisant varier, soit le moment résistant utile appliqué au moteur, soit la source électrique ou les liaisons de la source électrique avec le moteur, soit les deux à la fois (52). En général, les distributions d'énergie électrique sont faites de manière à maintenir constante la différence de potentiel aux bornes des appareils, ou l'intensité du courant entrant dans ces appareils. Une des grandeurs intéressant le moteur étant maintenue constante, il ne reste plus, pour obtenir les divers états d'équilibre qu'à faire varier le moment résistant utile. Nous supposons donc successivement constante ou la différence de potentiel aux bornes du moteur, ou l'intensité du courant qui le parcourt; nous examinerons aussi le cas où la différence de potentiel est maintenue constante, non plus entre les bornes, mais entre deux points séparés des bornes par des conducteurs présentant une certaine résistance.

I. — LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL AUX BORNES DU MOTEUR
EST CONSTANTE

60. Variation de l'intensité du courant et du moment de rotation. — Supposons d'abord le moteur immobilisé par un effort résistant utile considérable. La vitesse étant nulle, la force contre-électromotrice e est nulle (56, équation 11), l'intensité i du courant prend sa valeur maxima (équation 1)

$$I = \frac{D}{r + r'}$$

Il y aura lieu d'examiner si le courant maximum ainsi obtenu n'est pas susceptible de détériorer le moteur et, dans ce cas, de prendre des dispositions propres à empêcher tout accident. On peut, par exemple, introduire une résistance dans le circuit, lorsque le moteur est immobilisé et n'enlever cette résistance que lorsque le moteur s'est mis en marche.

61. — Le moment de rotation développé par le moteur peut se mettre sous la forme

$$T = \frac{nN\Phi' i}{\pi \cdot 10^8},$$

obtenue en combinant les équations 5, 8, 11 (56). Comme le flux Φ' augmente avec le courant exciteur des électroaimants, c'est-à-dire avec i , le moment moteur T acquiert son maximum, en même temps que i , quand le moteur est immobilisé. C'est là un avantage fort appréciable dans tous les cas où il y a lieu de donner *au démarrage* un fort coup de collier, comme dans la traction électrique, la manœuvre des affûts de canon, etc.

On voit aussi que le moment moteur ne dépend que de l'intensité du courant. A une même valeur de celle-ci correspond toujours la même valeur du moment moteur. L'étude des variations du moment moteur et par suite des équilibres successifs de l'électromoteur est donc intimement liée à l'étude des variations du courant.

Le moment parasite a pour expression

$$T_r = \frac{30(a\Phi'^2 V + b\Phi' + c)}{\pi}.$$

Dans un moteur bien construit, les courants de Foucault sont toujours de peu d'importance, de sorte que le moment parasite acquiert son maximum en même temps que le terme $b\Phi'$, c'est-à-dire quand, le moteur étant immobilisé, le courant atteint son maximum.

62. — Supposons maintenant que l'effort résistant utile opposé au moteur, ou sa charge, diminue jusqu'à créer un moment résistant qui, augmenté du moment parasite, soit inférieur au moment moteur maximum développé par le moteur immobilisé. Le moteur se met en marche et la vitesse croît jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre le moment de rotation et le moment résistant utile augmenté du moment parasite. Il faut pour cela que le moment moteur diminue, et il ne peut le faire que si le courant lui-même diminue¹. Or, quand la vitesse augmente, la force électromotrice e augmente ; l'intensité i du courant diminue ; le moment de rotation T diminue parce que le courant i et le flux Φ' diminuent : l'équilibre s'établit donc nécessairement. Il est vrai que le moment résistant parasite diminue aussi ; mais cette diminution est en général peu rapide, puisqu'un des termes représentant ce moment, celui relatif aux courants de Foucault, contient la vitesse en facteur et que le terme le plus important, celui relatif à l'hystérésis, ne contient qu'un seul facteur décroissant Φ' , qui d'ailleurs varie peu pour les grandes valeurs de l'intensité (63).

63. Stabilité d'équilibre. — Il est intéressant d'étudier la grandeur des variations du moment de rotation avec la vitesse ; nous pourrions juger ainsi de la stabilité d'équilibre plus ou moins grande d'un moteur excité en série.

Tout d'abord comme le moment moteur ne dépend que de l'intensité du courant (61), l'étude des variations du premier se ramène à l'étude des variations de celui-ci.

Or la différence de potentiel aux bornes étant constante,

1. Nous disons ici : *il faut* que le moment moteur diminue pour que l'on puisse arriver à l'équilibre et, par suite, *il faut* que le courant diminue. La diminution du courant n'est pas, en effet, la conséquence fatale et directe de la réduction du moment résistant ; mais il est *nécessaire*, pour que l'équilibre puisse s'établir, que l'augmentation de vitesse résultant, elle, directement de cette réduction du moment résistant, entraîne une diminution de l'intensité du courant et, à la suite, du moment moteur.

l'intensité du courant ne varie que si la force contre-électromotrice elle-même varie (56, équation 1).

La stabilité d'équilibre du moteur sera grande, c'est-à-dire le moment moteur diminuera beaucoup pour une faible augmentation de la vitesse, quand d'abord la force électromotrice augmentera rapidement avec la vitesse et qu'ensuite l'intensité du courant diminuera rapidement pour de faibles accroissements de la force électromotrice.

Cette dernière condition est nécessaire, mais pas suffisante.

Dans le cas de moteurs en série n'ayant pas une résistance $r_a + r_g$ trop considérable, la diminution de l'intensité du courant est assez rapide, lorsque la force électromotrice augmente, pour que la stabilité soit grande toutes les fois que la force électromotrice croît rapidement avec la vitesse.

Or l'expérience apprend que si on fait croître au delà de certaine limite le courant exciteur d'un électro-aimant, le flux qu'il engendre n'augmente plus que d'une manière presque insensible, le fer de l'électro-aimant étant dit alors saturé ; cela tient à ce que la perméabilité du fer diminue à mesure que le flux augmente. Or quand un moteur excité en série est immobilisé, le courant maximum qui le traverse est en général très supérieur au courant de saturation des électro-aimants inducteurs. Il suit de là que, le moteur s'étant mis en marche, par suite d'une réduction convenable de l'effort résistant utile, et le courant diminuant, le flux créé par les inducteurs n'est que faiblement réduit même par une réduction importante du courant. Dans l'expression du flux Φ' qui produit l'induction, le terme $A i$ qui représente le flux créé par les inducteurs diminue donc peu, quand la vitesse augmente à partir de 0, et, comme le terme soustractif $K i$, qui représente la réaction d'induit, diminue proportionnellement au courant, le flux Φ' reste d'abord sensiblement constant ; il peut même, dans certains moteurs où la réaction d'induit est très importante, augmenter légèrement, quand la vitesse commence à croître à partir de 0.

Il en résulte que la force contre-électromotrice e augmente

d'abord rapidement avec la vitesse, quand le moteur commence à se mettre en marche.

Le courant i va donc diminuer d'abord assez rapidement, ainsi que le moment moteur T . Dans le cas où les effets parasites sont peu importants, l'équilibre obtenu pour des valeurs du moment résistant utile voisines du moment maximum est donc très stable. Si on diminue, ou si on augmente, ce moment résistant, l'augmentation, ou la diminution, de la vitesse qui en résulte est faible, puisque cette faible variation de la vitesse provoque une diminution, ou une augmentation, du moment moteur suffisante pour obtenir un nouvel équilibre.

64. — Il n'en est pas de même pour les faibles valeurs du moment résistant utile.

En effet, la vitesse ayant alors des valeurs assez grandes, le courant inducteur i est très inférieur au courant de saturation ; le flux Φ' est alors à peu près proportionnel à i .

La force contre-électromotrice e n'augmente plus que faiblement pour des accroissements assez considérables de la vitesse, puisque son expression contient le terme Φ' qui varie en sens inverse de V . Le courant i lui-même n'éprouve de diminution notable que pour des accroissements importants de la vitesse ; le moment de rotation T , bien que renfermant deux facteurs Φ' et i qui diminuent quand la vitesse augmente, variera peu rapidement avec la vitesse. L'équilibre étant obtenu pour de faibles valeurs du moment résistant utile, une réduction de ce moment résistant nécessitera donc une augmentation considérable de la vitesse pour arriver à une diminution du moment moteur compensant celle du moment résistant. L'équilibre est donc peu stable dans ces conditions.

65. — En particulier, lorsqu'on supprime tout effort résistant utile, de telle façon que le travail à effectuer par le moteur ne soit plus que celui correspondant aux frottements divers, la vitesse prend une valeur souvent considérable.

Avec les moteurs bien construits, et surtout avec les grands moteurs où la puissance absorbée par les frottements a relativement une faible valeur, la vitesse prise par l'induit, au moment où on supprime toute charge du moteur, peut devenir dangereuse. C'est là un grave défaut des moteurs excités en série.

66. Variation des puissances dépensées et développées. — Lorsque le moteur est immobilisé, la puissance électrique totale P dépensée dans le moteur prend sa valeur maximum en même temps que le courant i (56, équation 3); la puissance électrique p_e absorbée par l'échauffement des conducteurs (équation 4) est aussi maximum. La puissance p absorbée par la rotation est nulle, puisque e est nulle (équation 5); la puissance mécanique utile p_u et la puissance absorbée par les effets parasites p_f sont nulles.

Lorsque, par suite de réductions successives de l'effort résistant utile, le moteur se met en marche et qu'on obtient des vitesses d'équilibre croissantes, la puissance électrique totale P diminue, ainsi que la puissance p_e ; les puissances p , p_u et p_f augmentent. Mais, si les puissances P et p_e diminuent constamment à mesure que la vitesse augmente, jusqu'à atteindre une valeur voisine de zéro quand la vitesse prend sa valeur maximum correspondant à la suppression de toute charge pour le moteur, les puissances p et p_u n'augmentent pas constamment.

En effet, la force contre-électromotrice e croît avec la vitesse et tend vers D , l'intensité i du courant diminue et tend vers zéro, de sorte que la puissance p , nulle pour une vitesse nulle, prend encore des valeurs très faibles pour des vitesses voisines de la vitesse maximum; cette puissance passe donc par un maximum que nous allons chercher.

67. — La puissance p peut s'écrire

$$p = P - p_e,$$

ou, en remplaçant P et p_c par leurs valeurs,

$$p = Di - (r_g + r_a) i^2.$$

Sous cette forme, l'expression de p ne comprend plus qu'une variable, l'intensité i , puisque D est supposée constante. Si on égale à 0 la dérivée par rapport à i , il vient

$$D - 2(r_g + r_a) i = 0,$$

d'où

$$i = \frac{D}{2(r_g + r_a)}.$$

La puissance p absorbée par la rotation acquiert donc son maximum quand la vitesse de rotation est telle que l'intensité du courant est égale à la moitié de l'intensité obtenue quand le moteur est immobilisé (60).

En portant cette valeur de i dans l'équation 1 (56), on trouve

$$e = \frac{D}{2}.$$

La force contre-électromotrice correspondant au maximum de p est la moitié de la différence de potentiel aux bornes.

La valeur du maximum de la puissance p est donc

$$p = \frac{D}{2} \times \frac{D}{2(r_g + r_a)} = \frac{D^2}{4(r_g + r_a)}.$$

68. — La puissance mécanique utile p_u peut s'écrire (56, équation 6)

$$p_u = p - p_f.$$

Or la puissance p_f absorbée par les effets parasites (équation 7) augmente constamment avec la vitesse, car la force contre-électromotrice, ou le produit $\Phi' V$, augmente.

Puisque p passe par un maximum, il en est de même, à fortiori, pour p_u . On peut même affirmer que le maximum de

p_u aura lieu pour une vitesse inférieure à celle correspondant au maximum de p . Toutefois, pour les moteurs bien construits, les frottements et autres effets parasites constituant une faible fraction de la puissance absorbée par la rotation, surtout si ces moteurs sont puissants, on peut admettre, d'une manière approximative, que le maximum de p_u a lieu en même temps que celui de p .

69. Variation du rendement. — Le rendement électrique étant le rapport $\frac{p}{P}$ (42), peut aussi se mettre, pour les moteurs excités en série, sous la forme

$$\text{Rendement électrique} = \frac{e}{D}.$$

Le rendement électrique a donc la valeur 0 quand le moteur est immobilisé ; il augmente constamment à mesure que e augmente, c'est-à-dire que la vitesse augmente et se rapproche de l'unité. Ce rendement atteindrait même la valeur 1 si, les effets parasites du moteur étant nuls, la force contre-électromotrice pouvait devenir rigoureusement égale à D .

Le rendement électrique est égal à 0,50 lorsque la vitesse prend la valeur correspondant au maximum de la puissance absorbée par la rotation du moteur. On désigne le rendement électrique par η_e .

70. — Le rendement industriel $\frac{p_u}{P}$ (43) part de 0, pour une vitesse nulle et reprend une valeur nulle pour la vitesse maximum correspondant à la suppression de toute charge pour le moteur, puisque la puissance utile p_u est alors nulle et que la puissance électrique dépensée P est au moins égale à celle absorbée par les frottements. Le rendement industriel doit donc passer par un maximum. Ce maximum du rendement industriel ne correspond pas au maximum de la puissance utile, mais a lieu pour une vitesse supérieure, ainsi qu'il est

facile de s'en rendre compte, si l'on songe que dans l'expression du rendement industriel, le dénominateur P diminue quand la vitesse augmente.

Si le moteur est bien construit, d'assez grande puissance et fonctionne aux environs de sa puissance maximum, le rendement industriel, tout en passant par un maximum, peut cependant n'éprouver que de faibles variations, pour des puissances mécaniques développées comprises entre des limites assez écartées.

Le rendement industriel se désigne par η_i .

II. — LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL EST MAINTENUE CONSTANTE ENTRE DEUX POINTS DES CONDUCTEURS AMENANT LE COURANT AU MOTEUR

71. Variation de l'intensité du courant et du moment moteur. — Si on désigne par D' la différence de potentiel supposée constante entre deux points A et B des conducteurs amenant le courant au moteur et par ρ la résistance des conducteurs entre ces points et les bornes du moteur, on a, en outre des équations déjà indiquées pour le moteur en équilibre (56), la suivante

$$(1 \text{ bis}) \quad D' - e = i(\rho + r_g + r_a).$$

Le produit $i\rho$ est la chute de potentiel dans les conducteurs entre les points A et B et les bornes du moteur.

L'équation 1 bis étant de même forme que l'équation 1 (56), nous sommes conduits aux mêmes conclusions que précédemment.

L'intensité du courant et le moment de rotation atteignent leur maximum quand le moteur est immobilisé; ces grandeurs diminuent à mesure que, la charge du moteur diminuant, la vitesse de rotation augmente, et elles prennent des valeurs faibles quand, tout effort résistant utile étant sup-

primé, la vitesse est maximum. La force contre-électromotrice, qui est nulle au démarrage, tend, à mesure que la vitesse augmente, à prendre une valeur de plus en plus voisine de la différence de potentiel D' .

72. — La seule différence qui existe entre ce cas et le précédent est que la valeur maximum du courant au démarrage est

$$I' = \frac{D'}{\varrho + r_g + r_a}.$$

Si donc la différence de potentiel maintenue constante entre les deux points en dehors du moteur a même valeur que la différence de potentiel maintenue constante aux bornes dans le cas précédent, le courant maximum est plus petit. Cette infériorité est d'autant plus accusée que la résistance ϱ est plus grande.

Le moment moteur au démarrage est aussi plus petit que dans le cas d'une différence de potentiel constante aux bornes. Il en est de même pour le courant et le moment moteur correspondant à une vitesse d'équilibre quelconque.

73. — Il y a là l'indication d'un procédé pour faire varier l'effort moteur au démarrage, suivant la demande. La différence de potentiel D' étant maintenue constante, l'effort moteur est d'autant moins grand que la résistance ϱ est plus grande et atteint son maximum quand ϱ est nulle. Nous avons vu plus haut (60) que l'on était parfois obligé d'introduire une résistance entre la source et le moteur pour diminuer le courant maximum d'immobilisation. Si cette résistance est un rhéostat variable, on peut l'utiliser pour gouverner le moteur, modérer ou augmenter les efforts qu'il peut produire, suivant les circonstances.

74. Stabilité d'équilibre. — La stabilité d'équilibre du moteur est moindre que lorsque la différence de potentiel est constante aux bornes.

On voit, en effet, que, l'expression de l'intensité ayant en dénominateur, non plus seulement la somme des résistances $r_a + r_g$ de l'induit et des inducteurs, mais la somme $r_a + r_g + \rho$ contenant en plus la résistance ρ intercalée entre les bornes du moteur et les points où la différence de potentiel est constante, la variation de l'intensité du courant est moins grande pour une même variation de la force contre-électromotrice et cela d'autant moins que la résistance ρ est plus importante.

Par conséquent, supposons que dans les deux cas, on ait obtenu un équilibre pour une valeur identique du moment moteur, c'est-à-dire de l'intensité du courant et qu'on vienne à diminuer la charge du moteur. La diminution correspondante du moment moteur nécessaire pour arriver à un nouvel équilibre nécessitera un accroissement plus grand de la force électromotrice et, par suite, de la vitesse, lorsque la différence de potentiel est constante en deux points séparés des bornes par une résistance ρ , que lorsque cette résistance ρ est nulle et que la différence de potentiel est constante aux bornes mêmes.

75. REMARQUE. — Il faut faire rentrer dans le cas que nous venons d'examiner celui où une source de force électromotrice constante est reliée directement à un moteur. La résistance ρ de la formule 1 bis (71) est alors la somme de la résistance de la source et des conducteurs reliant la source au moteur.

III. — L'INTENSITÉ DU COURANT EST MAINTENUE CONSTANTE

76. Moment moteur. — Le courant i étant maintenu constant, le flux Φ' l'est aussi ; le moment moteur T pouvant se mettre sous la forme

$$T = \frac{nN\Phi'i}{\pi \times 10^8}$$

conserve une valeur invariable quelle que soit la vitesse de rotation.

Le moment parasite (56, équations 7 et 10) augmente constamment avec la vitesse.

Par conséquent, si une force extérieure est opposée au mouvement du moteur, celui-ci ne se met en marche que si la valeur constante du moment moteur est supérieure au moment résistant. Dans ce cas, la vitesse s'accroît jusqu'à ce que le moment parasite augmentant ait donné au moment résistant une valeur assez grande pour équilibrer le moment moteur.

Si on diminue la charge du moteur, la vitesse augmente jusqu'à ce que l'accroissement des forces parasites qui en résulte compense la diminution de l'effort résistant utile.

77. — Il est clair que la stabilité d'équilibre du moteur est très faible, surtout pour les moteurs bien construits où les effets parasites sont peu importants. Les vitesses prises sous des charges notablement inférieures à celle qui immobilise le moteur sont toujours dangereuses.

78. Variation des puissances dépensées et développées. — La puissance électrique totale P dépensée dans le moteur varie comme la différence de potentiel aux bornes. Or celle-ci est égale à la force contre-électromotrice accrue du produit constant $i (r_g + r_a)$ (56, équation 1); il faudra donc l'augmenter à mesure que la vitesse croîtra, si l'on veut maintenir constante l'intensité. La puissance P est donc minimum quand la vitesse est nulle, croît avec la vitesse et atteint son maximum quand toute charge du moteur est supprimée.

La puissance p_c absorbée par l'échauffement des conducteurs est constante.

La puissance p absorbée par la rotation suit toutes les variations de la force électromotrice e ; elle est nulle pour une vitesse nulle, croît avec la vitesse et atteint son maximum quand toute charge est supprimée.

La puissance mécanique utile p_u , nulle quand le moteur est immobilisé, est encore nulle quand toute charge utile est supprimée ; cette puissance passe donc par un maximum.

79. Variation du rendement. — Le rendement électrique $\frac{p}{P}$ est toujours égal au rapport $\frac{e}{D}$ (42). Le rendement électrique est donc nul quand le moteur est immobilisé. Lorsque le moteur est mis en mouvement, grâce à une réduction convenable de l'effort résistant utile, le rendement augmente constamment avec la vitesse ; la différence $D - e$ étant en effet constante, le rapport $\frac{e}{D}$ croît avec e , c'est-à-dire avec la vitesse.

80. — Le rendement industriel $\frac{p_u}{P}$, nul quand le moteur est immobilisé, est encore nul lorsque le moteur a pris sa vitesse maximum après la suppression de tout effort résistant utile ; il passe donc par un maximum. Le maximum du rendement a lieu pour une vitesse inférieure à celle correspondant au maximum de la puissance utile, puisque la puissance P augmente avec la vitesse.

§ 2. — Électromoteurs excités en dérivation.

81. Sens de la rotation des machines excitées en dérivation employées comme réceptrices. — Supposons qu'une machine électrique excitée en dérivation tourne comme génératrice et produise un courant d'un certain sens. Si on lance dans la machine, employée maintenant comme réceptrice, un courant de même sens que le précédent et provenant d'une source électrique extérieure, la machine prendra un mouvement de même sens que celui qu'on lui avait donné comme génératrice. Ce fait n'est pas en contra-

diction avec la loi de Lenz (7). On voit, en effet, sur les figures 10 et 11 que le même courant passant dans l'induit et le circuit extérieur, les électro-aimants en dérivation sont parcourus par des courants de sens contraires suivant que la machine est génératrice ou réceptrice, c'est-à-dire suivant que le courant produit par l'induit passe dans un circuit extérieur R, ou que produit par la source extérieure S il passe

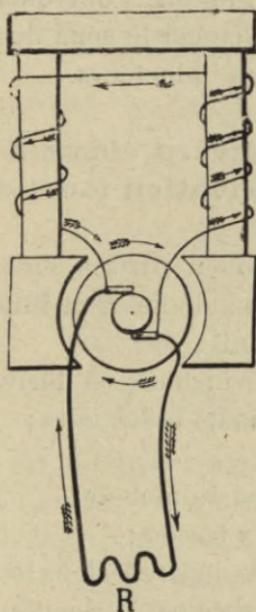


Fig. 10. — Machine en dérivation fonctionnant comme génératrice.

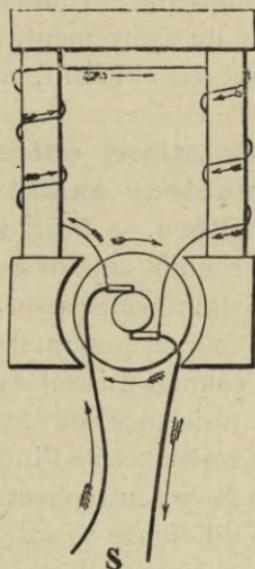


Fig. 11. — Machine en dérivation fonctionnant comme réceptrice.

dans l'induit. Or la loi de Lenz suppose que, dans les deux cas, le champ magnétique conserve la même direction. Avec une machine en dérivation, la direction du champ magnétique étant différente, pour le même courant dans l'induit, suivant que la machine est génératrice ou réceptrice, le mouvement doit être le même dans les deux cas. D'ailleurs, si l'on considère, non plus le sens absolu du mouvement, mais le sens par rapport à la direction du champ magnétique, on voit que dans une machine en dérivation, comme dans une

machine en série, il y a inversion du mouvement quand la machine est employée successivement comme génératrice et comme réceptrice.

82. — Lorsqu'on inverse le sens du courant lancé par la source dans la machine réceptrice, le sens de la rotation ne change pas, puisque le champ magnétique est inversé en même temps que le courant dans l'induit. Pour obtenir une inversion du mouvement, il faut changer le sens du courant seulement dans l'induit, ou dans les inducteurs.

83. Relations entre les divers éléments d'un électromoteur excité en dérivation fonctionnant en équilibre. — Désignons par :

- i , le courant entrant dans le moteur par ses bornes et se divisant pour passer dans les inducteurs et l'induit ;
- i_a , le courant passant dans l'induit ;
- i_d , le courant passant dans les inducteurs en dérivation ;
- r_d , la résistance des électro-aimants inducteurs ;
- r_a , la résistance de l'induit ;
- e , la force contre-électromotrice du moteur ;
- D , la différence de potentiel aux bornes ;
- P , la puissance électrique totale dépensée dans le moteur ;
- p_c , la puissance électrique absorbée par l'échauffement des conducteurs ;
- p , la puissance électrique absorbée par la rotation ;
- p_u , la puissance mécanique utile développée ;
- p_f , la puissance absorbée par les effets parasites ;
- T , le moment de rotation ;
- T_u , le moment résistant utile ;
- T_f , le moment résistant parasite ;
- V , la vitesse de rotation ;
- n , le nombre de spires dans chaque bobine de l'induit ;
- N , le nombre des bobines de l'induit ;
- Φ' , le flux de force maximum passant dans une spire de l'induit.

Nous avons les relations

- (1) $i = i_a + i_d,$
- (2) $D - e = i_a r_a,$
- (3) $D = i_d r_d,$
- (4) $P = p_c + p = Di$
- (5) $p_c = r_a i_a^2 + r_d i_d^2,$
- (6) $p = e i_a.$
- (7) $p = p_u + p_f,$
- (8) $p_f = \alpha \Phi'^2 V^2 + b \Phi' V + cV,$
- (9) $T = \frac{30p}{\pi V},$
- (10) $T_u = \frac{30p_u}{\pi V},$
- (11) $T_f = \frac{30p_f}{\pi V}$
- (12) $e = \frac{nNV\Phi'}{30 \times 10^8},$
- (13) $\Phi' = Ai_d - Ki_a.$

Dans ces relations, nous supposons les grandeurs électriques, intensité, force électromotrice ou différence de potentiel, résistance exprimées en ampères, volts, ohms ; les puissances sont exprimées en watts, les moments en joules ; le flux de force est donné en unités C. G. S ; la vitesse est le nombre de tours par minute.

I. — LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL AUX BORNES DU MOTEUR
EST CONSTANTE

84. Variation de l'intensité du courant et du moment de rotation. — La propriété caractéristique donnée au moteur par l'invariabilité de la différence de potentiel aux bornes est la constance approximative du champ magnétique inducteur. L'intensité du courant i_d excitant les

inducteurs est, en effet, constante et le champ magnétique serait absolument invariable, si on n'avait pas à tenir compte de la réaction d'induit. En réalité, pour les moteurs où cette réaction est sensible, le flux inducteur Φ' décroît légèrement à mesure que le courant dans l'induit augmente (83, équation 13).

85. — Lorsque le moteur est immobilisé par un effort résistant suffisamment grand, la force contre-électromotrice est nulle, l'intensité i_a du courant dans l'induit prend une valeur maximum qui est

$$I_a = \frac{D}{r_a}.$$

La résistance r_a de l'induit étant souvent très faible, il y a lieu d'introduire dans le circuit une résistance de manière à empêcher la production d'un courant excessif. Cette résistance doit être de préférence intercalée sur le circuit de l'induit seulement (*fig. 31*); on conserve ainsi l'invariabilité du flux inducteur.

86. — Le moment de rotation, dont l'expression peut s'écrire

$$T = \frac{nN\Phi' i_a}{\pi \times 10^8},$$

acquiert son maximum, en même temps que i_a , quand le moteur est immobilisé, malgré la diminution de Φ' causée par la réaction d'induit.

Lorsqu'on diminue convenablement l'effort résistant utile, le moteur se met en marche et sa vitesse s'accroît jusqu'à ce que l'équilibre soit obtenu entre le moment moteur et le moment résistant utile et parasite. Cet équilibre sera toujours possible.

En effet, à mesure que la vitesse augmente, la force contre-électromotrice, qui lui est sensiblement proportionnelle, aug-

mente aussi; l'intensité du courant i_a diminue, ainsi que le moment moteur. Le moment parasite, dont l'expression est

$$T_r = \frac{30(a\Phi'^2 V + b\Phi' + c)}{\pi},$$

augmente avec la vitesse, ou reste à peu près constant lorsque le coefficient a relatif aux courants de Foucault est négligeable, puisque le flux Φ' est lui-même sensiblement constant, ou augmente légèrement quand l'intensité du courant dans l'induit diminue.

87. — Si l'on compare les moteurs excités en dérivation aux moteurs excités en série, on voit que ces derniers développent, au moment du démarrage, un moment de rotation plus considérable que les moteurs en dérivation. Le flux de force Φ' des moteurs en série augmente, en effet, avec le courant dans l'induit, qui acquiert, au moment de l'immobilisation, une valeur considérable; dans les moteurs en dérivation, le flux Φ' reste à peu près constant, si la différence de potentiel aux bornes est bien maintenue constante, et il faut compter que souvent, dans la pratique, la différence de potentiel aux bornes sera plus petite au démarrage, en raison de la faible résistance de l'induit reliant les bornes.

88. — Lorsque, pour empêcher au démarrage le passage dans l'induit d'un courant dangereux, on se sert d'un rhéostat pour réduire ce dernier, on voit aussi que, pour un moteur en dérivation, si le rhéostat est placé sur les conducteurs venant de la source, entre celle-ci et le moteur, la différence de potentiel aux bornes diminue et le moment de rotation est réduit non seulement par la diminution, reconnue nécessaire, du courant dans l'induit, mais encore par la diminution du flux inducteur. C'est pour cette raison que nous avons conseillé plus haut de placer le rhéostat sur le circuit induit

seulement, le fil inducteur étant mis en dérivation entre les points A et B situés au delà de la résistance ρ intercalée sur le circuit de l'induit (*fig. 31*).

Dans un moteur en série, l'introduction d'un rhéostat dans le circuit ne diminue guère le flux inducteur, parce que le courant conserve toujours une intensité bien supérieure à celle correspondant à la saturation des inducteurs (63).

Mais si, au point de vue de la grandeur du moment de rotation au démarrage, les moteurs en dérivation sont parfois inférieurs aux moteurs en série, ils sont bien supérieurs en ce qui concerne la stabilité d'équilibre.

89. Stabilité d'équilibre. — L'équilibre étant obtenu pour une certaine charge du moteur, si on diminue celle-ci, la vitesse augmente. Mais, si on regarde d'abord le flux inducteur Φ' comme sensiblement constant, la force contre-électromotrice croît proportionnellement à la vitesse; comme la résistance r_a est toujours assez faible, l'intensité i_a du courant dans l'induit (83, équation 2) diminue rapidement quand la force électromotrice ou la vitesse augmente, ainsi que le moment moteur T . D'ailleurs le moment résistant parasite T_f ne peut qu'augmenter avec la vitesse, puisque le flux est à peu près constant. Il suit de là qu'une faible augmentation de la vitesse provoquera une diminution du moment moteur suffisante pour qu'il fasse de nouveau équilibre au moment résistant utile, qui a été diminué, mais auquel s'ajoute un moment résistant parasite accru. Il faut remarquer que si la réaction d'induit est importante, le flux, au lieu d'être constant, augmente quand l'intensité du courant dans l'induit diminue, ce qui réduit d'autant plus l'accroissement nécessaire de vitesse pour arriver au nouvel équilibre.

Un moteur excité en dérivation, avec différence de potentiel constante aux bornes a donc toujours une grande stabilité d'équilibre, quelle que soit la charge, tandis qu'un moteur en série n'a, dans ces conditions, une grande stabilité que pour des charges assez importantes.

90. — Lorsque la résistance de l'induit du moteur en dérivation est faible et que la réaction d'induit, sans être trop grande, a une valeur notable, pour une différence de potentiel aux bornes constante, la variation de vitesse provoquée par une variation, même importante, de l'effort résistant utile est assez faible, pour que cette vitesse puisse être considérée comme pratiquement constante.

On voit tout d'abord que la résistance r_a étant faible, la différence $D - e$ est également très réduite ; D étant constante et e très voisine de D , une variation, même très faible de la force contre-électromotrice entraînera une variation considérable dans le courant i_a et, par suite, dans le moment moteur. Or le flux de force, en raison de la réaction d'induit, que nous avons supposée assez importante, augmente quand l'intensité dans l'induit diminue.

Par conséquent, supposons que l'équilibre étant établi, le moment résistant utile soit diminué, même notablement. La vitesse commencera par augmenter. Mais aussitôt qu'elle se sera accrue d'une quantité très faible, la force contre-électromotrice e ayant augmenté, le courant i_a diminue ; il en résulte un nouvel accroissement de e et une nouvelle réduction de i_a , de sorte que le très léger accroissement initial de la vitesse suffit pour provoquer une diminution de i_a et du moment moteur assez grande pour obtenir un nouvel équilibre.

On peut d'ailleurs vérifier, sur l'expression de la vitesse, que ses variations sont faibles et que la réaction d'induit concourt à la maintenir constante.

En effet de l'équation 12 (83) on tire, pour la valeur de la vitesse d'équilibre,

$$V = \frac{30 \times 10^8 e}{nN\Phi'}$$

ou, en remplaçant e par sa valeur tirée de l'équation 2, et Φ' par celle tirée de l'équation 13,

$$V = \frac{30 \times 10^8 (D - i_a r_a)}{nN (A i_a - K i_a)}$$

Puisque D et i_a sont supposés constants, si la résistance r_a est faible, ainsi que le coefficient K représentant la réaction d'induit, les deux termes soustractifs au numérateur et au dénominateur peuvent se compenser à peu près et la vitesse d'équilibre est alors sensiblement constante, quelle que soit l'intensité du courant i_a , c'est-à-dire quelle que soit la valeur du moment moteur et, par suite, du moment résistant utile. On peut dire qu'un pareil moteur est *autorégulateur de la vitesse*, pour une différence de potentiel aux bornes constante.

91. — C'est la réciproque de la propriété des machines génératrices en dérivation, à induit de faible résistance, qui donnent une différence de potentiel aux bornes sensiblement constante, autrement dit sont *autorégulatrices de la différence de potentiel aux bornes*, lorsqu'on les fait tourner mécaniquement à une vitesse constante.

92. — En particulier, lorsqu'on supprime toute charge utile pour un moteur excité en dérivation, la vitesse maximum prise par le moteur n'est généralement ni excessive, ni dangereuse.

93. — L'expression de la vitesse que nous avons donnée plus haut montre aussi que, en supposant qu'il y ait compensation entre la réaction d'induit et la chute de potentiel dans l'induit, la vitesse doit être à peu près indépendante de la valeur de la différence de potentiel maintenue aux bornes. En effet le dénominateur contient un terme proportionnel au courant inducteur i_a et celui-ci varie dans le même sens que D et proportionnellement. Il faut en conclure que la vitesse ne pourra aisément se régler, *au moins pour les moteurs à faible résistance d'induit* dans lesquels les inducteurs restent dérivés entre les bornes, par une variation de la différence de potentiel aux bornes.

Au contraire, si on agit sur le courant inducteur i_a , sans toucher à la différence de potentiel D , la vitesse change de

valeur rapidement. On y parvient en modifiant la résistance des inducteurs par l'introduction d'un rhéostat de résistance convenable.

94. — Cette grande stabilité d'équilibre des moteurs en dérivation et la sécurité avec laquelle on peut diminuer brusquement la charge utile leur constitue un avantage très sérieux sur les moteurs en série et les fait, le plus souvent, préférer, lorsque l'effort résistant utile est, par sa nature, variable.

95. — **Variation des puissances absorbées et développées.** — La puissance électrique totale P absorbée dans le moteur a son maximum quand le moteur est immobilisé (83, équation 4), puisque D et le courant inducteur i_a sont constants et que i_a est alors maximum. A mesure que la charge diminue et que la vitesse augmente, P diminue et tend vers un minimum qu'elle atteint, en même temps que la vitesse son maximum, lorsque toute charge utile est supprimée. La puissance P est alors égale à la somme de la puissance parasite p_f et de la puissance p_c absorbée par l'échauffement des conducteurs de l'inducteur et de l'induit.

96. — La puissance p_c (équation 5) est maximum quand le moteur est immobilisé; elle diminue constamment quand la vitesse augmente.

97. — La puissance parasite p_f (équation 8), nulle pour une vitesse nulle, augmente constamment avec la vitesse.

98. — La puissance p absorbée par la rotation (équation 6), nulle quand la vitesse et la force contre-électromotrice sont nulles, augmente d'abord avec la vitesse; mais le courant i_a diminuant en même temps que e augmente, cette puissance passe par un maximum pour prendre une valeur assez faible et égale à la puissance parasite, lorsque toute charge

utile est supprimée. Nous pouvons facilement chercher ce maximum.

La puissance p peut s'écrire (équations 6 et 2)

$$p = (D - r_a i_a) i_a.$$

Égalant à zéro la dérivée par rapport à i_a , on a

$$D - 2r_a i_a = 0$$

d'où

$$i_a = \frac{D}{2r_a}.$$

Le maximum de p a donc lieu pour une vitesse telle que l'intensité du courant dans l'induit est égale à la moitié de la valeur maximum qu'elle prend quand le moteur est immobilisé. La force contre-électromotrice correspondante est $\frac{D}{2}$. La valeur de la puissance p maximum est

$$p = \frac{D}{2} \times \frac{D}{2r_a} = \frac{D^2}{4r_a}.$$

99. — La puissance mécanique utile développée p_u est nulle quand le moteur est immobilisé, croît d'abord avec la vitesse, passe par un maximum et redevient nulle quand toute charge utile est supprimée. Le maximum de la puissance utile a lieu pour une vitesse inférieure à celle correspondant au maximum de la puissance absorbée par la rotation (68).

100. Variation du rendement. — Le rendement électrique $\frac{p}{P}$ peut se mettre sous la forme

$$\eta_e = \frac{ei_a}{Di} = \frac{ei_a}{Di_a + Di_a}.$$

Le rendement électrique est nul quand le moteur étant immobilisé, la force contre-électromotrice est nulle ; le moteur étant en marche, le rendement électrique augmente d'abord avec la vitesse, puisque le numérateur augmente et tend vers son maximum, tandis qu'au dénominateur le terme variable $D i_a$ diminue constamment quand la vitesse augmente. Le rendement électrique peut encore prendre une valeur faible quand la vitesse atteint son maximum. En effet, lorsque toute charge utile est supprimée, la force contre-électromotrice e acquiert sa valeur maximum, mais reste toujours inférieure à la différence de potentiel constante D ; comme, d'autre part, pour les moteurs bien construits, le courant i_a peut devenir assez petit, le dénominateur ayant un terme constant $D i_a$, le rendement peut prendre une valeur, sinon très faible, du moins beaucoup plus petite que celles correspondant à des courants i_a plus intenses.

101. — En général, le rendement électrique passe donc par un maximum. On peut d'ailleurs, à priori, annoncer que ce maximum, s'il existe, aura lieu pour une vitesse supérieure à celle qui rend maximum la puissance p , puisque cette puissance décroît d'abord lentement après avoir dépassé son maximum, tandis que P continue à décroître assez rapidement. Cherchons ce maximum du rendement.

Le rendement électrique peut encore se mettre sous la forme

$$\eta_e = \frac{(D - i_a r_a) i_a}{D i_a + D i_a}$$

Si on remplace D par sa valeur $i_a r_a$ et si on désigne par q le rapport $\frac{r_a}{r_d}$ de la résistance de l'induit à la résistance de l'inducteur, il vient

$$\eta_e = \frac{(i_d - q i_a) i_a}{(i_d + i_a) i_d}$$

En écrivant que la dérivée par rapport à la variable i_a est nulle, on obtient, toutes réductions opérées,

$$qi_a^2 + 2qi_a i_a' - i_a'^2 = 0.$$

Une valeur positive est racine de cette équation ; cette valeur que nous désignerons par i_a' est

$$i_a' = \frac{-qi_a + \sqrt{q^2 i_a^2 + qi_a'^2}}{q},$$

que l'on peut écrire

$$i_a' = \frac{i_a}{q} [-q + \sqrt{q(q+1)}]$$

Or le courant maximum I_a passant dans l'induit lorsque le moteur est immobilisé est (85)

$$I_a = \frac{D}{r_a} = \frac{i_d}{q};$$

par suite, on a

$$i_a' = I_a [-q + \sqrt{q(q+1)}].$$

Cette valeur du courant dans l'induit correspondant au maximum du rendement électrique est toujours plus petite que $\frac{I_a}{2}$ qui est l'intensité correspondant au maximum de la puissance p absorbée par la rotation. En effet, pour que la parenthèse ait pour valeur 0,5, il faut ajouter sous le radical le carré de 0,5 ou 0,25.

On voit aussi que l'intensité i_a' est d'autant plus faible que le nombre q est lui-même plus petit. Le rapport $q = \frac{r_a}{r_d}$, pour les moteurs en dérivation bien construits et d'assez grande puissance, est extrêmement faible ; néanmoins comme le courant maximum I_a est alors considérable, comme aussi les effets parasites sont peu importants et que, par conséquent,

le courant dans l'induit correspondant à la suppression de toute charge est le plus souvent très réduit, le maximum du rendement électrique aura lieu parfois bien avant que toute charge utile soit supprimée.

102. — Le maximum du rendement électrique est inférieur à 1. Si on remplace, en effet, dans l'expression du rendement, le courant i_a par la valeur i'_a correspondant au maximum, on trouve

$$\eta_e(\text{maximum}) = [\sqrt{q+1} - \sqrt{q}]^2,$$

nombre toujours inférieur à 1.

103. — Il faut remarquer aussi que le rendement électrique, lorsque la puissance absorbée par la rotation passe par son maximum, n'est plus égal à 0,50, comme pour un moteur en série.

Pour un moteur en dérivation, nous avons vu (98) que la force contre-électromotrice est alors $\frac{D}{2}$ et le courant dans l'induit $\frac{I_a}{2}$. Le rendement électrique est donc, dans ces conditions,

$$\eta_e = \frac{\frac{D}{2} \times \frac{I_a}{2}}{D i_d + D \frac{I_a}{2}} = \frac{I_a}{2(I_a + 2i_d)},$$

que l'on peut aussi écrire,

$$\eta_e = \frac{1}{2(1+2q)},$$

puisque $i_d = q I_a$.

Le rendement électrique correspondant au maximum de la puissance p est donc toujours inférieur à 0,50.

104. — Le rendement industriel $\frac{p_u}{P}$, nul quand le moteur

est immobilisé, est encore nul quand toute charge utile est supprimée. Il passe donc par un maximum. Si l'on réfléchit, d'ailleurs, que l'on a

$$p_u = p - p_f,$$

comme p_f augmente avec la vitesse, on voit que le maximum du rendement industriel a lieu pour une vitesse inférieure à celle correspondant au maximum du rendement électrique, ou pour une intensité dans l'induit supérieure.

II. — LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL EST MAINTENUE CONSTANTE ENTRE DEUX POINTS DES CONDUCTEURS AMENANT LE COURANT AU MOTEUR

105. Variation de l'intensité du courant et du moment de rotation. — Aux équations que nous avons déjà données (83), il faut ajouter la relation suivante entre la différence de potentiel D' maintenue constante entre les deux points considérés du circuit extérieur, la résistance ρ séparant ces points des bornes du moteur, la différence de potentiel D aux bornes et l'intensité i du courant arrivant au moteur.

$$(2') \quad D' = D + i\rho.$$

En combinant cette relation avec l'équation 3 (83), on obtient

$$D' = i_a r_a + i\rho.$$

Puisque D' est constante, on en conclut que les variations du courant total i se font en sens inverse des variations du courant inducteur i_a ; comme d'ailleurs i est la somme du courant inducteur i_a et du courant dans l'induit i_o , les variations de i_o sont aussi inverses, comme sens, des variations de i_a .

Considérons, d'autre part, la combinaison suivante des équations 2 et 3 (83)

$$e + i_a r_a = i_d r_d.$$

Elle montre que si la force contre-électromotrice augmente, i_d doit augmenter et i_a diminuer.

Enfin l'équation 3 prouve que la différence de potentiel D aux bornes augmentant avec i_d , augmente aussi avec e .

106. — De ce qui précède, il résulte que la force contre-électromotrice doit augmenter constamment et rapidement avec la vitesse, un premier accroissement de e déterminant une diminution consécutive du courant i_a et une augmentation du courant i_d , c'est-à-dire (équation 13) une augmentation du flux Φ' , auquel la force contre-électromotrice est proportionnelle.

107. — Ceci établi, supposons d'abord le moteur immobilisé ; la force contre-électromotrice est nulle, l'intensité i_a dans l'induit et l'intensité totale i acquièrent leur maximum. Soit I'_a l'intensité maximum dans l'induit, on a

$$I'_a = \frac{D' r_d}{\varrho r_a + \varrho r_d + r_a r_d},$$

que l'on peut aussi écrire

$$I'_a = \frac{D'}{r_a + \varrho + \varrho \frac{r_a}{r_d}},$$

montrant ainsi que cette intensité maximum est plus faible que celle que l'on obtenait en maintenant constante aux bornes la différence de potentiel.

Le courant inducteur i_d est minimum lors de l'immobilisation du moteur.

108. — Lorsque le moteur se met en marche et que la vitesse augmente, e et D augmentent, ainsi que le courant i_d ; i_a et i diminuent.

109. — Le moment de rotation peut s'écrire

$$T = \frac{nN\Phi' i_a}{\pi \times 10^8}$$

ou encore

$$T = \frac{nN}{\pi \times 10^8} (A i_d - K i_a) i_a.$$

On ne peut, à priori, savoir dans quel sens varie le moment de rotation quand la vitesse augmente.

Toutefois, on peut montrer que, suivant la valeur donnée à la résistance φ , le moment moteur peut diminuer ou augmenter quand la vitesse commence à croître, à partir de l'instant où le moteur s'est mis en marche; on voit aussi que quelle que soit φ , il existe toujours une vitesse, ou une valeur de i_a correspondante, à partir de laquelle le moment moteur diminue quand la vitesse augmente, ou que i_a diminue.

En effet, la relation que nous avons établie plus haut

$$D' = i_d r_d + i \varphi,$$

peut s'écrire

$$D' = i_d (r_d + \varphi) + i_a \varphi.$$

Elle montre que les variations du courant i_d doivent être très faibles, par rapport aux variations du courant i_a , lorsque la résistance φ est très petite, par rapport à la résistance des inducteurs r_d , D' étant supposée constante. Le terme $A i_d$, dans l'expression du moment moteur, est alors sensiblement constant, pendant que le courant i_a éprouve une diminution considérable; le moment de rotation décroît alors constamment quand la vitesse augmente, comme lorsque la différence de potentiel est maintenue constante aux bornes.

110. — Supposons, au contraire, que φ soit grand par rapport à r_a ; on déduit de l'équation précédente en désignant par $\delta(i_a)$ la variation du courant i_a ,

$$\delta(i_a) \times (r_a + \varphi) = -\delta(i_a) \times \varphi.$$

Comme d'ailleurs, au moment du démarrage, la force contre-électromotrice étant nulle, on a

$$i_a r_a = i_a r_a,$$

on en déduit

$$\frac{\delta(i_a)}{i_a} = -\frac{\delta(i_a)}{i_a} \times \frac{\varphi}{\varphi + r_a} \times \frac{r_a}{r_a}.$$

Par conséquent, les variations relatives du courant i_a sont plus grandes que les variations relatives du courant i_a , lorsque φ est grand par rapport à r_a . Il est clair qu'alors, dans l'expression du moment moteur, le flux Φ' augmente plus vite que le facteur i_a ne diminue, d'autant plus que la réaction d'induit diminue elle-même avec i_a . Le moment moteur augmente donc avec la vitesse, à partir du démarrage, lorsque la résistance φ est grande. On voit d'ailleurs de même qu'il en est encore ainsi, si l'on a

$$\frac{\varphi}{\varphi + r_a} \times \frac{r_a}{r_a} > 1,$$

ou

$$\varphi > \frac{r_a r_a}{r_a - r_a}.$$

Lorsque la vitesse de rotation s'est accrue suffisamment pour que le courant i_a prenne de faibles valeurs, l'intensité du courant inducteur est près de son maximum, qui est $\frac{D'}{\varphi + r_a}$.

La variation relative du flux Φ' est alors beaucoup plus faible que la variation du courant i_a et le moment moteur diminue, quand la vitesse continue à augmenter.

Le moment moteur doit donc passer par un maximum lorsque la résistance φ a une valeur suffisamment grande.

111. Stabilité d'équilibre. — 1° Lorsque la résistance φ est petite, le moment moteur diminue constamment quand la vitesse augmente, l'équilibre obtenu pour une certaine valeur du moment résistant utile est toujours stable. Cependant il faut observer que la stabilité d'équilibre est moindre que si la différence de potentiel était maintenue constante aux bornes, c'est-à-dire si φ était nulle.

L'intensité du courant dans l'induit est, en effet

$$i_a = \frac{D - e}{r_a},$$

et nous avons dit (105) que lorsque e augmente, i_a diminue, mais D augmente. Supposons donc que le moment résistant appliqué au moteur diminue. La vitesse commence par augmenter et passe de V à V_1 ; la force électromotrice augmente aussi de e à e_1 ; il en résulte que l'intensité du courant prendrait la valeur i_{1a} plus petite que i_a , si D restait constante; mais D augmente et devient D_1 de sorte que i_a prend une valeur i'_a intermédiaire entre i_a et i_{1a} . Le courant dans l'induit diminue donc moins que si D était constante; d'autre part D augmentant le flux inducteur, augmente et devient Φ'_1 , de sorte que le moment moteur n'éprouve qu'un faible décroissement à la suite de l'augmentation de vitesse. Il est vrai que l'accroissement du flux détermine, sans que la vitesse change, un nouvel accroissement de la force électromotrice qui prend la valeur e_2 et une nouvelle diminution du courant qui devient i_{2a} plus petit que i'_a . Mais en supposant même que l'accroissement $\Phi'_1 - \Phi'$ du flux ou l'accroissement $e_2 - e_1$ qui en résulte soient proportionnels à l'accroissement $D_1 - D$ de la différence de potentiel, ce qui n'est pas, la différence $D_1 - e_2$ resterait plus grande que $D - e_1$; par suite le courant i_{2a} est toujours plus grand que i_{1a} . Il faudra donc un nouvel accroissement de vitesse si l'on veut que le moment moteur soit aussi réduit que si D était restée constante.

112. — 2° Lorsque la résistance φ , intercalée entre les

points où on maintient constante la différence de potentiel et les bornes du moteur, a une valeur qui n'est plus très petite (il suffit qu'elle soit plus grande que $\frac{r_d r_a}{r_d - r_a}$), le moment de rotation commence par croître lorsque le moteur se met en mouvement. Nous avons vu qu'il ne saurait y avoir d'équilibre stable pour les valeurs du moment de rotation croissant ainsi avec la vitesse (54). Pour la première fois, nous rencontrons dans cette étude un cas d'instabilité d'équilibre ; aussi allons-nous examiner avec quelque détail le fonctionnement du moteur.

Lorsque le moteur est immobilisé, et bien que le courant dans l'induit soit maximum, le moment de rotation n'atteint pas sa plus grande valeur ; il peut même être assez faible, si la résistance ρ est grande. Pour que le moteur se mette en marche, il faut que le moment résistant utile opposé au moteur soit inférieur au moment de rotation diminué du moment parasite. Il faut donc n'appliquer au moteur en repos que des effets résistants utiles quelquefois assez faibles.

113. — Si on a appliqué au moteur en repos un moment résistant utile notablement inférieur au moment de rotation de démarrage, le moteur s'étant mis en marche, comme le moment de rotation commence à croître avec la vitesse, malgré l'augmentation assez rapide du moment parasite avec la vitesse, l'équilibre ne sera généralement pas atteint pour une vitesse inférieure à la vitesse V_1 correspondant au maximum du moment de rotation moteur. Cette vitesse V_1 étant dépassée, comme alors le moment de rotation diminue, le moment parasite continuant à augmenter, l'équilibre s'obtient pour une vitesse d'autant plus grande que les forces parasites ont moins d'importance relative.

114. — Augmentons alors l'effort résistant utile ; la vitesse diminue, jusqu'à ce que l'augmentation du moment résistant utile soit compensée par l'augmentation du moment de

rotation et la diminution du moment parasite. En continuant ainsi à augmenter l'effort résistant utile, on rétrograde jusqu'à la vitesse V_1 pour laquelle le moment de rotation est maximum. A ce moment, le moment résistant utile appliqué au moteur peut être bien supérieur au moment de rotation du moteur immobilisé; de sorte qu'on est arrivé ainsi graduellement à faire produire au moteur un effort utile assez considérable, alors qu'un effort résistant bien plus faible eût empêché le démarrage, si on l'avait appliqué tout d'abord au moteur en repos.

Si maintenant on continue à accroître l'effort résistant utile appliqué au moteur, il s'ensuivrait encore une diminution de la vitesse, mais cette fois avec la réduction correspondante du moment de rotation; malgré la réduction du moment parasite, on ne peut savoir à l'avance si un nouvel équilibre s'établira. On peut toutefois prévoir qu'en raison de la faible variation du moment de rotation aux environs du maximum, on pourra augmenter légèrement le moment résistant utile et obtenir ainsi un équilibre pour une vitesse V'_1 un peu inférieure à V_1 , mais il arrivera toujours un moment où le moment résistant utile étant encore accru et le moment de rotation ayant diminué sensiblement, l'équilibre ne pourra plus être obtenu. La vitesse diminuera alors brusquement et le moteur s'arrêtera. Le moment résistant utile qu'on peut appliquer au moteur a donc un maximum correspondant à la vitesse V'_1 et on ne peut obtenir d'équilibre pour des vitesses inférieures à V'_1 . Le fonctionnement du moteur est donc tout à fait instable pour les faibles vitesses de rotation; il n'est pas très stable pour les vitesses voisines du maximum du moment de rotation; l'équilibre ne devient réellement stable que lorsque le moment de rotation décroît franchement quand la vitesse augmente.

115. — On comprend maintenant pourquoi nous avons conseillé de réduire le courant passant dans l'induit, lorsque cela est nécessaire (85), en intercalant un rhéostat sur le

circuit de l'induit seulement, et non pas sur les conducteurs arrivant au moteur, dans le cas d'un moteur en dérivation, avec différence de potentiel constante. Si la source est disposée pour maintenir aux bornes du moteur la différence de potentiel constante, l'introduction d'un rhéostat dans le circuit extérieur aura pour effet de reporter au delà de ce rhéostat les points où la différence de potentiel est constante. Nous venons de voir que si la résistance ρ du rhéostat n'est pas faible, le moment de rotation au démarrage peut être très réduit et qu'on ne doit alors soumettre que progressivement le moteur à un effort résistant un peu considérable, ce qui, dans la pratique, pour certaines applications, peut être difficile et entraîner des complications.

On voit aussi l'importance qu'il pourra y avoir, dans une distribution à potentiel constant, à relier par des conducteurs de résistance faible le moteur aux points où la différence de potentiel est réellement maintenue constante par la source électrique. En particulier on se trouvera toujours placé dans ces conditions défavorables lorsque le moteur sera alimenté par une source électrique de force électromotrice constante et de résistance intérieure assez grande, la résistance intérieure de la source devant être alors ajoutée à celle des conducteurs.

116. Modification dans les liaisons de l'inducteur et de l'induit permettant d'améliorer le fonctionnement du moteur. — Lorsque la source maintient constante la différence de potentiel entre deux points séparés des bornes du moteur par des conducteurs de résistance ρ non négligeable, si l'on veut éviter les inconvénients que nous venons de signaler, il suffira de séparer des balais ou des bornes où elles sont fixées les extrémités du fil des électroaimants inducteurs en dérivation et de prendre cette dérivation des inducteurs entre les deux points où la différence de potentiel est maintenue constante. Le courant inducteur est alors constant comme dans le cas précédemment étudié (84), l'équilibre est toujours stable et le démarrage facile.

Mais, la résistance ρ devant être ajoutée à la résistance de l'induit, la stabilité d'équilibre sera toujours moindre que si la différence de potentiel était maintenue constante aux bornes. Nous comparerons d'ailleurs lors de l'étude graphique des moteurs les stabilités d'équilibre d'un même moteur fonctionnant :

1° Avec une différence de potentiel D constante aux bornes (211);

2° Avec la même différence de potentiel constante entre deux points séparés des bornes par une résistance ρ , sans modification des liaisons de l'inducteur et de l'induit (218);

3° Avec la même différence de potentiel constante aux deux points précédents, mais l'inducteur étant mis en dérivation entre ces deux points, comme nous venons de l'indiquer plus haut (217).

III. — L'INTENSITÉ TOTALE DU COURANT ENTRANT DANS
LE MOTEUR EST MAINTENUE CONSTANTE

117. Variation du moment de rotation. — Le moteur étant immobilisé, l'intensité constante i se partage entre l'induit et l'inducteur en raison inverse des résistances. Comme l'intensité totale maintenue constante i est limitée par la densité de courant dans les conducteurs, on voit que le courant i_a , toujours inférieur à i , aura lui-même une valeur modérée et ne manifestera plus, au démarrage, cette exagération caractéristique d'un grand nombre de cas précédents. L'intensité du courant inducteur i_a , d'autre part, sera le plus souvent très faible, au démarrage, en raison de la petitesse du rapport $\frac{r_a}{r_a}$. Le moment de rotation aura donc, en général, une valeur très faible et le moteur ne démarrera que sous des efforts résistants très petits.

Si le moment résistant est suffisamment réduit, le moteur

se met néanmoins en marche ; lorsque la vitesse et, par suite, la force contre-électromotrice augmente, l'intensité i_d du courant inducteur augmente, l'intensité i_a du courant dans l'induit diminue, puisque l'on a toujours

$$e + i_a r_a = i_d r_d$$

et, d'autre part,

$$i_a + i_d = i,$$

i étant constant.

Il en résulte que la force contre-électromotrice augmente constamment avec la vitesse ainsi que le courant i_d ; le courant i_a diminue constamment (105).

Il suit de là que, la somme $i_a + i_d$ étant constante, i_d étant plus petit que i_a , le produit $i_a i_d$ augmente quand la vitesse augmente, tant que les courants dans l'inducteur et l'induit ne sont pas devenus égaux. Si l'on se reporte à l'expression du moment moteur, on voit alors que ce dernier doit d'abord augmenter quand la vitesse croît, à partir du démarrage.

Nous avons fait l'étude du fonctionnement du moteur dans ces conditions (112) et montré qu'on ne saurait obtenir d'équilibre stable à des vitesses correspondant à un moment moteur croissant.

118. — On peut, il est vrai, améliorer les conditions de fonctionnement du moteur et obtenir le démarrage sous des charges plus importantes appliquées directement au moteur en repos, en introduisant, pour le démarrage, dans le circuit de l'induit, un rhéostat dont l'effet sera de diminuer le courant dans l'induit, mais d'augmenter en revanche le courant inducteur, ce qui accroît le moment moteur, tant que la résistance du rhéostat n'est pas telle que les courants dans l'induit et l'inducteur soient à peu près égaux. Le moteur une fois en marche, la résistance du rhéostat pourra être progressivement supprimée, en même temps qu'on pourra augmenter encore dans une certaine mesure l'effort résistant utile appliqué au

moteur, sans que cependant on puisse jamais, sans risquer d'arrêter ce dernier, donner à cet effort résistant des valeurs voisines du maximum que le moteur est capable de vaincre.

On voit que l'emploi d'un moteur en dérivation, dans une distribution à courant constant, peut présenter des difficultés, si l'effort résistant est, de sa nature, variable.

§ 3. — Électromoteurs à excitation compound.

119. Dispositions diverses du double enroulement des électro-aimants inducteurs. — On enroule parfois les électro-aimants inducteurs d'un électromoteur avec deux fils, l'un en dérivation sur l'induit, l'autre en série avec lui. Le courant arrivant aux bornes du moteur passe donc dans le fil en série, arrive aux balais et se divise en deux parties, pour passer séparément dans l'induit et dans le fil en dérivation des inducteurs (*fig. 3*).

Quelquefois l'enroulement du fil en série est de sens tel que le flux inducteur qu'il crée est de même sens que celui qui résulte de l'excitation des inducteurs par le fil en dérivation ; les deux flux s'ajoutent alors et l'excitation est renforcée, comme cela a lieu dans les machines génératrices à excitation compound. Parfois aussi, l'enroulement en série est disposé de façon à diminuer l'excitation produite par le fil en dérivation. C'est d'ailleurs ce dernier cas qui se présente lorsqu'on emploie comme réceptrice, sans modification, une machine électrique construite pour fonctionner comme génératrice à excitation compound ; il est facile, en effet, de voir que, si les deux enroulements sont disposés de manière à ajouter leurs effets inducteurs lorsque le courant qui les parcourt est produit par l'induit tournant mécaniquement, les deux excitations se contrarient lorsque le courant vient, au contraire, d'une source extérieure. Cela tient au renversement du courant dans le fil en dérivation, ainsi que nous l'avons montré dans les figures 10 et 11 (81).

120. Sens de la rotation d'une machine à excitation compound employée comme réceptrice. —

Si l'on emploie comme réceptrice une machine à excitation compound construite pour fonctionner comme génératrice, comme, ainsi que nous venons de le dire, les deux excitations des électro-aimants inducteurs sont alors contraires, on ne peut savoir à l'avance quel sera le sens de la rotation. Toutefois on peut dire, d'une manière générale, que si l'excitation due au fil en série est prédominante, le moteur se comporte comme s'il était excité en série; il agit au contraire, comme un moteur en dérivation, si l'excitation dérivée est prépondérante.

121. Relations entre les divers éléments d'un électromoteur à excitation compound fonctionnant en équilibre. — Désignons par :

i , le courant total arrivant aux bornes du moteur ;

i_a , le courant passant dans l'induit ;

i_d , le courant passant dans le fil en dérivation des inducteurs ;

r_g , la résistance du fil inducteur en série ;

r_d , la résistance du fil inducteur en dérivation ;

r_a , la résistance de l'induit ;

e , la force contre-électromotrice du moteur ;

D , la différence de potentiel aux bornes du moteur ;

Δ , la différence de potentiel aux balais ;

P , la puissance électrique totale dépensée dans le moteur ;

p_c , la puissance électrique absorbée par l'échauffement des conducteurs ;

p , la puissance électrique absorbée par la rotation ;

p_u , la puissance mécanique utile développée ;

p_f , la puissance absorbée par les effets parasites ;

T , le moment de rotation ;

T_u , le moment résistant utile ;

T_f , le moment résistant parasite ;

V , la vitesse de rotation ;

n , le nombre de spires dans chaque bobine de l'induit ;
 N , le nombre des bobines de l'induit ;
 Φ' , le flux de force maximum passant dans une spire de l'induit.

Nous avons les relations

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & i = i_a + i_d, \\
 (2) \quad & \Delta - e = i_a r_a, \\
 (3) \quad & D - \Delta = i r_g, \\
 (4) \quad & \Delta = i_d r_d, \\
 (5) \quad & P = p + p_c = D i, \\
 (6) \quad & p_c = r_a i_a^2 + r_d i_d^2 + r_g i^2, \\
 (7) \quad & p = e i_a, \\
 (8) \quad & p = p_u + p_f, \\
 (9) \quad & p_f = a \Phi'^2 V^2 + b \Phi' V + c V, \\
 (10) \quad & T = \frac{30 p}{\pi V}, \\
 (11) \quad & T_u = \frac{30 p_u}{\pi V}, \\
 (12) \quad & T_f = \frac{30 p_f}{\pi V}, \\
 (13) \quad & e = \frac{n N V \Phi'}{30 \times 10^9}, \\
 (14) \quad & \Phi' = A i_d \pm A' i - K i_a.
 \end{aligned}$$

Dans ces relations, les unités sont les mêmes que précédemment (83). Dans la relation 14 on mettra le signe + devant le terme $A' i$ relatif à la portion du flux dû à l'excitation en série, lorsque les deux excitations seront de même sens ; on mettra, au contraire, le signe —, lorsque les deux excitations se contrarieront.

122. Variation du moment de rotation, la différence de potentiel aux bornes étant maintenue constante. — Sans faire une étude complète du fonctionnement des moteurs à excitation compound, nous voulons

montrer, dans le cas le plus fréquent d'une différence de potentiel constante aux bornes, quelques-unes des particularités qui les caractérisent, afin de pouvoir, par des exemples, mettre en évidence les raisons qui font quelquefois préférer aux autres le mode d'excitation compound, toujours plus compliqué d'ailleurs.

En combinant les équations 1, 2, 3, 4 (121) on trouve, comme valeur de l'intensité i du courant entrant dans le moteur et passant dans le fil en série des inducteurs,

$$i = \frac{D(r_a + r_d) - er_d}{r_g(r_a + r_d) + r_a r_d}.$$

De la même manière, on a, pour la différence de potentiel Δ aux balais,

$$\Delta = \frac{D r_a r_d + e r_d r_g}{r_g(r_a + r_d) + r_a r_d}.$$

Supposons le moteur immobilisé. La force contre-électromotrice e étant nulle, le courant i prend sa valeur maximum. La différence de potentiel Δ est alors minimum, ainsi que le courant i_a passant dans le fil en dérivation. Par suite, le courant i_a , différence entre i et i_a , est maximum.

123. — Si les deux excitations sont de même sens, le flux Φ' pourra prendre, au démarrage, une valeur assez grande et le moment moteur T sera d'autant plus grand que le courant i_a est maximum. L'excitation du fil inducteur en série supplée, dans ce cas, à l'insuffisance de l'excitation du fil en dérivation.

124. — Mais si le fil en série, au lieu de renforcer l'excitation du fil en dérivation, produit une excitation de sens inverse, le flux Φ' peut être très réduit, ainsi que le moment de rotation au démarrage et le moteur ne se met en marche que si l'effort résistant est très faible.

Il peut se faire, si le nombre des spires du fil inducteur en série est suffisant, que l'excitation qui en résulte soit supérieure, au démarrage, à l'excitation due au fil en dérivation. Comme le courant inducteur en série i diminue quand la vitesse augmente, tandis que le courant dérivé i_d augmente, il faut prendre garde que le magnétisme des électro-aimants inducteurs ne soit, au démarrage, l'inverse de celui prévu pour une marche normale, ce qui produirait des interversions fâcheuses dans la rotation du moteur. On pare à cet inconvénient en supprimant, pour le démarrage, l'excitation en série, ou même en inversant le courant dans le fil en série seulement, ce qui a pour effet de donner le même sens aux deux excitations et d'assurer au moment de rotation une valeur suffisante (123). Le sens du courant dans le fil en série est changé de nouveau quand le moteur a pris sa vitesse normale.

125. — Lorsque le moteur s'est mis en marche et que la vitesse augmente, le sens des variations du moment de rotation dépend, non seulement du mode d'association des deux excitations en série et en dérivation, mais encore de leur importance relative. L'étude générale du fonctionnement des électro-moteurs à excitation compound serait laborieuse et sans grand intérêt. Cette étude se simplifie, si on considère la double excitation des électromoteurs comme un moyen de corriger certains défauts inhérents aux modes d'excitation précédemment étudiés, ou de donner certaines qualités déterminées. Nous allons donner des exemples.

126. — Exemples d'emploi de la double excitation pour les électromoteurs. — Nous avons vu (86) que lorsqu'un électromoteur est excité en dérivation et que la différence de potentiel aux bornes est maintenue rigoureusement constante, le moment de rotation est maximum au démarrage et diminue à mesure que la vitesse augmente ; ce sont là les conditions réclamées par la plupart des applications. Mais il est souvent difficile de maintenir cette

différence de potentiel constante aux bornes lorsque le moteur est immobilisé, ou animé d'une faible vitesse. D'abord, l'exagération du courant dans l'induit qui en résulterait serait souvent dangereuse pour les moteurs, et l'on est parfois amené à intercaler entre le moteur et la source un rhéostat dont on augmente la résistance à mesure que la vitesse diminue ou que l'intensité du courant augmente. La différence de potentiel aux bornes est alors minimum quand le moteur est immobilisé et augmente avec la vitesse.

D'autre part, peu d'installations permettent de maintenir une différence de potentiel rigoureusement constante aux bornes du moteur; la chute de potentiel dans les conducteurs qui amènent le courant aux bornes augmente en effet considérablement quand la vitesse de l'électromoteur devient très petite, à moins d'employer des conducteurs hors de proportion avec la puissance normale du moteur. En général, la différence de potentiel aux bornes sera plus petite pour les petites vitesses et minimum pour le moteur immobilisé.

Nous avons étudié ce cas lorsque nous avons supposé la différence de potentiel constante, non plus aux bornes, mais en deux points des conducteurs qui les relient à la source électrique (105); nous avons vu qu'alors le moment de rotation peut être assez réduit au démarrage et qu'il augmente d'abord avec la vitesse. Il suit de là en premier lieu que le moteur peut ne pas démarrer, si on lui applique au repos sa charge normale, et ensuite que l'équilibre ne peut être obtenu pour de petites vitesses.

Pour corriger ce défaut, on pourra ajouter sur les inducteurs en dérivation quelques spires en série produisant une excitation de même sens. Le renforcement de l'excitation qui en résulte permettra d'obtenir un moment de rotation suffisant pour le démarrage en pleine charge et une variation continue de ce moment en sens inverse de la vitesse.

127. — Comme autre exemple, nous supposerons qu'on se propose de construire un moteur qui puisse développer,

avec une vitesse constante, des puissances mécaniques très variables. Nous avons vu qu'un électromoteur excité en dérivation, entre les bornes duquel on maintient constante la différence de potentiel, et dont la résistance d'induit est suffisamment réduite, n'éprouve que de faibles variations de vitesse pour des variations assez considérables dans la charge (90). Mais l'on peut encore obtenir une vitesse pratiquement constante, si la résistance de l'induit n'est pas très petite, ou si la différence de potentiel n'est pas rigoureusement constante et décroît quand l'intensité du courant augmente, en superposant au fil en dérivation des inducteurs un nombre convenable de tours de fil en série, disposés de manière à produire une excitation de sens inverse.

Des équations 2 et 3 (121) nous tirons, en effet,

$$e = D - ir_g - i_a r_a.$$

En substituant dans l'équation 13 et en remplaçant dans celle-ci le flux Φ' par sa valeur tirée de l'équation 14, il vient

$$V = \frac{30 \times 10^8 (D - ir_g - i_a r_a)}{n N (A i_a - A' i - K i_a)}$$

Le numérateur diminue quand i et, par suite, i_a augmentent, c'est-à-dire quand la charge augmente. Mais, d'autre part, le dénominateur diminue également, puisque le courant i_a diminue, alors que i et i_a augmentent. En proportionnant judicieusement les deux excitations, on voit qu'on pourra obtenir pour V une valeur sensiblement constante. Si la différence de potentiel D décroît quand l'intensité i augmente, le numérateur diminue d'autant plus rapidement. En donnant à l'excitation du fil en série une importance suffisante, on peut aussi faire décroître le dénominateur assez rapidement pour qu'il y ait compensation.

CHAPITRE IV

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

§ 1. — Méthodes de mesure.

128. — Généralités. — Nous avons vu, dans le chapitre précédent, quelles sont les propriétés générales des moteurs électriques et les particularités de leur fonctionnement dues au mode d'excitation. L'étude précédente permettra à l'ingénieur de choisir le moteur en vue des applications particulières auxquelles il est destiné ; dans un chapitre spécial, nous traiterons d'ailleurs de l'établissement d'un projet de moteur électrique.

Actuellement nous supposons le moteur construit et nous voulons étudier expérimentalement son fonctionnement, vérifier ainsi son aptitude plus ou moins grande au service qu'on doit lui imposer.

Nous devons donc ici, non plus indiquer l'allure générale des variations des éléments caractéristiques d'un moteur quelconque, mais déterminer expérimentalement et exactement ces variations pour le moteur particulier dont il s'agit.

Tout d'abord, nous devons déterminer ou vérifier les données de construction, résistance de l'induit et des inducteurs, nombres de bobines et de spires, dimensions des pièces de fer, etc.

Puis reliant le moteur à une source électrique capable de le faire fonctionner dans des conditions précises, par exemple avec une différence de potentiel constante aux bornes, ou avec

un courant constant, on fait varier l'effort résistant utile appliqué au moteur. On obtient ainsi une succession d'équilibres du moteur dont on mesure, ou on calcule, les éléments.

129. — Nous avons vu qu'en raison du nombre des équations reliant les grandeurs caractéristiques de l'équilibre d'un moteur, il suffisait de connaître deux de ces grandeurs pour en déduire toutes les autres (58). Mais il faut bien remarquer qu'en réalité deux des équations que nous avons données ne sont pas absolument explicites et contiennent des coefficients dépendant, par exemple, des dimensions des pièces du moteur et dont le calcul serait quelquefois long et difficile ; telle est, par exemple, l'équation reliant le flux de force au courant inducteur. La forme que nous lui avons donnée est suffisante pour étudier le sens des variations des éléments du moteur ; mais elle ne saurait conduire au calcul numérique de ces éléments. Aussi préfère-t-on, pour l'étude expérimentale, considérer les deux équations dont il s'agit comme n'existant pas et mesurer alors quatre des grandeurs afin de pouvoir calculer ensuite toutes les autres.

Les grandeurs ordinairement mesurées sont : la différence de potentiel aux bornes, l'intensité totale du courant arrivant au moteur, la vitesse, le moment résistant utile. On dresse un tableau des valeurs de ces grandeurs mesurées et des valeurs correspondantes calculées pour les autres grandeurs.

130. Mesure des résistances de l'induit et des inducteurs. — La mesure des résistances de l'induit et des inducteurs se fera par une des méthodes quelconques généralement employées. Il faut observer toutefois que de cette mesure dépend le calcul d'un grand nombre des éléments du moteur ; il importe donc qu'elle soit faite avec précision. En particulier, il faut que la résistance introduite dans le calcul soit celle correspondant à la température prise par le moteur tant sous l'influence du milieu extérieur que par l'effet du courant qui le traverse. Dans le calcul du rendement, les va-

riations de la résistance de l'induit et des inducteurs sous l'influence de la température peuvent avoir une importance notable.

131. — Voici comment il convient d'opérer :

1° Mesurer la résistance de l'induit et des inducteurs à *froid*, c'est-à-dire avant que le moteur ait fonctionné, en notant exactement la température θ à laquelle se trouvent les conducteurs mesurés et qui est la température de la salle où l'on opère, si le moteur s'y trouve depuis un temps suffisamment long.

2° Pendant que le moteur fonctionne en vue de la détermination des équilibres successifs, mesurer la température prise par les inducteurs au moment où l'on fait les autres mesures relatives aux divers équilibres réalisés.

Il est clair que cette détermination de la température est toujours facile pour les inducteurs fixes, par l'application d'un thermomètre convenablement protégé contre le rayonnement, et peut, par suite, être faite d'une manière pour ainsi dire continue.

3° Terminer les essais du moteur par un fonctionnement à charge maximum et quand le moteur est stoppé, mesurer la température de l'induit. A cet effet prendre, quand cela est possible, la température de la surface extérieure et de la partie intérieure et faire la moyenne ; on conçoit en effet que pendant la rotation ces deux surfaces ne peuvent être à la même température en raison de la ventilation provoquée par le mouvement et que la différence de température reste accusée quelque temps encore après le stoppage.

4° Mesurer la résistance de l'induit et des inducteurs à *chaud*, aussitôt après que le moteur vient de fonctionner à charge maximum.

5° Calculer la résistance des inducteurs correspondant aux divers équilibres par la formule

$$R_{\theta'} = R_{\theta} [1 + K(\theta' - \theta)],$$

R_{θ} , étant la résistance à la température θ' mesurée comme nous l'avons dit pendant le fonctionnement du moteur, R_{θ} étant la résistance mesurée à la température θ , avant le commencement des essais ; K est égal pour le cuivre à 0,00388.

En comparant la résistance ainsi calculée pour la température prise par les inducteurs pendant le fonctionnement à charge maximum à la résistance mesurée à chaud aussitôt après le stoppage, on voit s'il y a lieu de corriger les autres résistances calculées.

Pour l'induit, on n'a mesuré que les températures et les résistances extrêmes ; mais on peut procéder par interpolations. Si l'on veut y mettre quelque précision, il y a lieu de déterminer la température prise par l'induit pour quelques équilibres intermédiaires, en stoppant après chacun d'eux, afin de permettre cette mesure.

132. — Mesure de la vitesse. — La vitesse de rotation se mesure en général au moyen d'un *tachymètre*, celui de Buss, par exemple. Mais les meilleurs tachymètres sont sujets à des causes d'erreur telles que le dérèglement de leurs organes et en particulier des ressorts antagonistes, ou encore le glissement des courroies qui les commandent.

Lorsqu'on voudra connaître exactement la vitesse d'un moteur, il faudra, ou mesurer directement cette vitesse avec un *compte-tours*, ou avoir étalonné préalablement avec un compte-tours le tachymètre dont on se sert.

133. — Lorsque le moteur a une faible puissance, l'application d'un compteur de tours ou la commande d'un tachymètre absorbent une portion souvent très importante de la puissance mécanique développée par le moteur. On peut alors mesurer la vitesse de la manière suivante. La surface d'une poulie montée sur l'arbre de rotation ayant été recouverte de noir de fumée, on en approche un diapason en vibration dont l'une des branches porte un stylet très fin. Les branches du diapason sont tenues perpendiculairement à l'axe de rotation

et le stylet est alors normal à la surface de la poulie. Moyennant un tour de main facile à acquérir, on obtiendra, sur la surface noircie de la poulie, la trace des vibrations du diapason; en déplaçant légèrement et d'une manière à peu près continue le diapason dans le sens de l'axe de rotation, on pourra obtenir la trace des vibrations qui se sont produites pendant plusieurs tours consécutifs du moteur. Si on connaît le nombre de vibrations exécutées par le diapason dans l'unité de temps, en comptant le nombre de vibrations correspondant à un tour du moteur, on déduira facilement la vitesse de ce dernier.

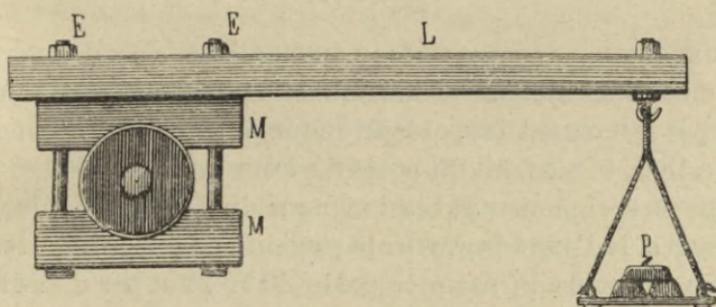


Fig. 12. — Frein de Prony.

134. Mesure du moment résistant utile ; dynamomètres. — Pour l'étude d'un moteur, on remplace les efforts résistants ordinaires qui seront, dans la pratique, appliqués au moteur par un effort résistant facile à mesurer et créé par un frottement. On utilise à cet effet les *dynamomètres* ou *freins à friction*.

Nous allons examiner quelques formes de dynamomètres et indiquer la manière d'en faire usage.

135. Frein de Prony. — Le premier des freins à friction fut le frein de Prony. Il se compose essentiellement de deux mâchoires en bois *M*, *M'* (*fig. 12*), dont l'une est fixée à un levier *L*. Les deux mâchoires peuvent être pressées sur une poulie *R* montée sur l'arbre du moteur, au moyen des

écrous E, E. Un plateau suspendu à l'extrémité du levier peut recevoir des poids P.

Le serrage des écrous détermine un frottement plus ou moins grand des mâchoires sur la poulie qui, tournant dans le sens de la flèche, tend à entraîner le frein. On donne aux poids P une valeur telle que le levier demeure horizontal, en équilibre.

Soit F la force de frottement tangente à la poulie et r le rayon de cette dernière. Le moment résistant développé par le frottement, qui constitue ici le moment résistant utile, est alors

$$T_u = Fr.$$

Comme le levier est maintenu en équilibre, c'est donc que le moment d'entraînement du frein dû au frottement est compensé par le moment des poids P, auquel il convient d'ajouter, s'il y a lieu, le moment du poids du frein lui-même.

Si nous désignons par l la longueur du levier, ou plutôt la distance de l'axe à la verticale passant par le point de suspension du poids P, par p le poids du frein et par d la distance de l'axe à la verticale du centre de gravité du frein, nous aurons

$$Fr = Pl + pd.$$

Pour éliminer la distance d , difficile à déterminer directement, on cherche quel poids p_1 appliqué à l'extrémité du levier, c'est-à-dire à la distance l de l'axe, produit un moment égal à celui du poids du frein; le poids p_1 est appelé la tare du frein. On a alors

$$Fr = (P + p_1)l.$$

Le moment résistant utile est donc

$$T_u^{\text{kilogrammètres}} = (P + p_1)^{\text{kilogrammes}} \times l^{\text{mètres}}.$$

On voit que la détermination de T_u se fait aisément par une évaluation du poids P nécessaire pour amener le levier

à l'équilibre et, en outre, que l'on peut faire varier ce moment résistant utile en modifiant la pression des mâchoires, sans qu'il soit besoin, d'ailleurs, de connaître cette pression.

136. — Le frein que nous venons de décrire comporte des causes d'erreur et il est d'un emploi difficile. C'est ce que nous allons essayer de mettre en relief.

Nous avons supposé que le levier pouvait être maintenu en équilibre horizontalement. Or, malgré la précaution que l'on doit avoir de lubrifier constamment les surfaces en contact des mâchoires et de la poulie, au moyen d'eau de savon le plus souvent, le coefficient de frottement varie presque continuellement ; ses variations peuvent être faibles, il est vrai, mais elles sont, en général, suffisantes pour que l'équilibre ne puisse être réalisé d'une manière permanente.

Pour limiter la course du levier, on place de part et d'autre de la position horizontale deux arrêts solides. On peut toujours corriger les variations importantes du coefficient de frottement par des changements de pression, au moyen des écrous de serrage, de telle façon que le levier ne vienne pas buter contre les arrêts. Mais les variations légères et souvent périodiques produiront des oscillations du levier entre les butoirs. Avec la disposition de la figure 12, les bras de levier des poids P et p changent continuellement pendant les oscillations du frein ; il y a donc incertitude sur la valeur exacte du moment résistant correspondant, par exemple, à des mesures faites, à un moment donné, d'éléments électriques du moteur.

De plus, dans la figure 12, le centre de gravité du frein et le point d'attache du poids P se trouvent au-dessus de l'horizontale passant par le centre de rotation. On voit alors aisément que le levier étant supposé en équilibre horizontal, si le frottement vient à augmenter, même légèrement, et que le levier prenne, par suite, une inclinaison au-dessus de l'horizontale, les moments du poids P et du poids p du frein diminuent, de sorte que l'inclinaison du levier ne fait que

s'accroître davantage : l'équilibre du frein est instable et il est, pour ainsi dire, impossible de s'en servir.

Enfin, on conçoit que, les boulons de serrage traversant les mâchoires massives et sans élasticité, un très faible mouvement des écrous détermine une variation considérable de pression, ce qui rend le réglage très difficile.

137. Frein à leviers parallèles. — Dans le frein à leviers parallèles (*fig. 13*), les deux mâchoires M et M' sont fixées à deux leviers L et L' semblables. Le serrage se fait au moyen du seul écrou E dont le boulon traverse les leviers ;

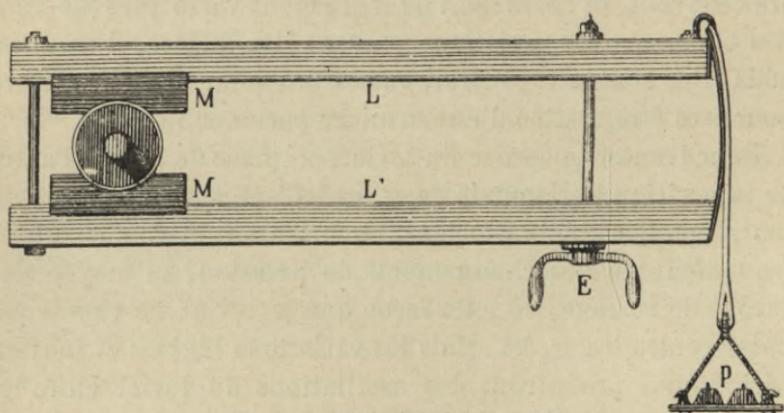


Fig. 13. — Frein à leviers parallèles.

on profite ainsi, pour le réglage, de l'élasticité de ces derniers. Le plateau P est attaché au levier au moyen d'une courroie qui passe sur un arc en fer dont le centre est sur l'axe de rotation. Le moment du poids P est donc constant, malgré les oscillations du frein. Si le centre de gravité est exactement sur l'horizontale passant par l'axe, ce qu'on peut réaliser avec ce frein, le déplacement, pendant les oscillations, se fait pour ce point à peu près suivant une verticale et le moment du poids du frein peut encore être regardé comme pratiquement constant ; le frein ainsi établi est donc très exact et permet d'avoir à chaque instant la valeur du moment résistant.

138. — Mais, avec le centre de gravité sur l'horizontale de l'axe, le frein serait trop sensible aux variations du frottement. On s'arrange donc de manière à placer le centre de gravité un peu au-dessous, ce qui assure à l'équilibre une stabilité suffisante; le moment du poids-frein croissant quand le dernier est entraîné par un frottement plus grand que celui qui correspond à l'équilibre horizontal, les oscillations se limitent d'elles-mêmes, lorsque les variations du frottement ne sont pas trop grandes. Le frein est alors moins exact, mais d'un emploi plus commode; la limite de l'erreur commise, par suite de l'abaissement du centre de gravité, peut, du reste, toujours être évaluée.

139. — Il sera toujours avantageux, afin de faciliter les lectures sur les autres appareils qui servent à des mesures simultanées, de rendre les oscillations du frein aussi lentes que possible. On augmente leur durée en augmentant le moment d'inertie du frein.

140. — Pour déterminer la tare p_1 du frein, on serre entre les mâchoires un disque en bois de même diamètre que la poulie de l'arbre du moteur sur laquelle le frein doit être installé. Ce disque est traversé par un axe que l'on fait reposer sur des couteaux d'acier. On fixe l'extrémité du levier à l'un des plateaux d'une balance et le poids p_1 mis dans l'autre plateau pour obtenir l'équilibre constitue la tare du frein. On peut aussi tarer le frein, quoique moins exactement, en fixant l'extrémité du levier à une corde faisant retour sur une poulie et à l'extrémité libre de laquelle on suspend des poids jusqu'à obtenir un mouvement ascensionnel lent et continu du frein; on diminue ensuite le poids suspendu à la corde, jusqu'à ce que le frein prenne un mouvement lent de descente; la moyenne des poids ainsi obtenus est la tare du frein.

141. Balance dynamométrique de Raffard. — Les freins à mâchoire, que nous venons de décrire, ne se

prêtent que difficilement à l'étude des moteurs de faible puissance. Il est, en effet, malaisé de serrer les mâchoires juste assez pour maintenir le frein en équilibre lorsque les efforts à produire sont petits ; de plus, avec les petits moteurs, les variations dans le frottement peuvent prendre une importance relative considérable. M. Raffard a imaginé une disposition de frein, qu'il appelle *balance dynamométrique*, pouvant s'appliquer à des moteurs de très faible puissance, comme

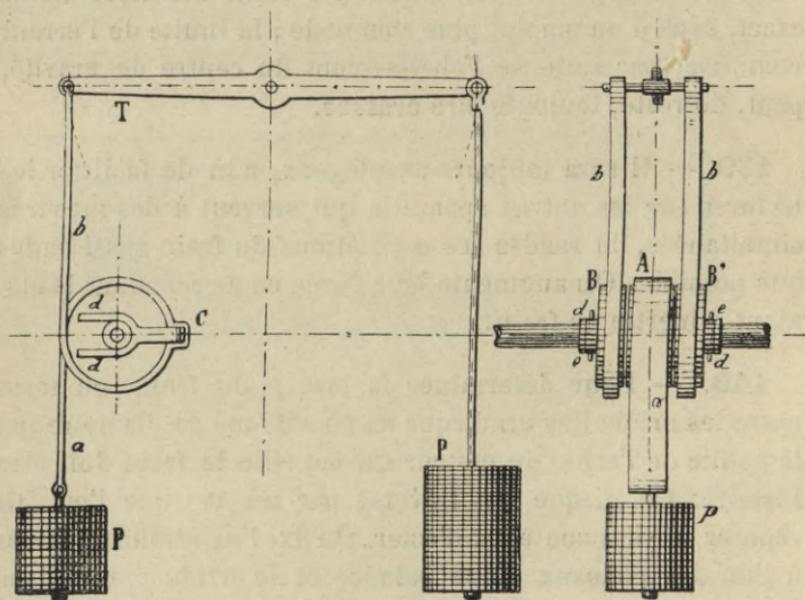


Fig. 14. — Balance dynamométrique Raffard.

aussi à des moteurs développant une puissance mécanique de plusieurs chevaux. La figure 14 représente ce frein. Il se compose d'une poulie calée sur l'arbre A et de deux poulies folles B et B'. Au fléau T d'une balance on suspend, d'un côté un poids P, de l'autre les sangles *b* et *b'* passant sur les poulies folles. Un étrier C reçoit les attaches de ces sangles et en même temps celle de la sangle *a* passant sur la poulie calée A et tendue par un poids *p* ; l'étrier est équilibré par rapport à l'axe au moyen de contrepoids fixés aux branches *d*.

L'axe tournant dans le sens direct, la poulie A frotte sur la sangle a et tend à entraîner l'étrier C et les sangles b, b' ; comme le poids p agit dans le même sens, le poids P qui produit l'équilibre est donc égal à la force de frottement augmentée du poids p . En désignant par r le rayon de la poulie calée A, le moment dû au frottement, c'est-à-dire le moment résistant utile opposé au moteur est donc

$$T_u = (P - p)r.$$

142. — L'équilibre étant établi, supposons que le coefficient de frottement vienne à diminuer; l'équilibre est rompu, le poids P l'emporte et l'étrier C se déplaçant en sens inverse du mouvement de l'axe, la sangle a s'enroule sur une portion plus grande de la circonférence de la poulie A. Comme le frottement d'une corde tendue enroulée sur un cylindre augmente très vite avec l'arc embrassé, on voit que la diminution du coefficient de frottement se compense automatiquement; il en est de même si le coefficient de frottement augmente.

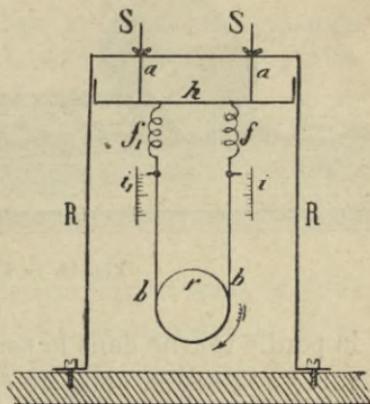


Fig. 15. — Frein pour petit moteur.

D'ailleurs, pour rendre aussi faibles que possible les variations du coefficient de frottement, on a soin, comme toujours, de bien lubrifier les poulies avec de l'eau ordinaire, ou de l'eau de savon, par exemple, en faisant plonger la partie inférieure des poulies dans un récipient rempli de ce liquide.

143. Freins pour moteurs de faible puissance. —

Nous donnerons encore deux dispositifs de freins applicables particulièrement aux moteurs de faible puissance.

Dans le premier (fig. 15) un châssis R solidement fixé sur

une table est traversé par deux boulons *a* portant un étrier *h* guidé par le châssis. Des écrous S permettent de faire monter ou descendre cet étrier. Sous ce dernier sont fixés deux dynamomètres à ressort (deux pesons ordinaires) *f* et *f*₁ reliés par un ruban de soie *b* qui passe sur la poulie *r* du moteur et dont la tension est réglée au moyen des écrous S. Les pesons ont été étalonnés avec des poids et des index *i* et *i*₁ donnant les tensions des deux brins du ruban de friction par une simple lecture.

Lorsque le moteur n'est pas actionné par le courant, les deux tensions sont égales ; mais si le moteur étant actionné,

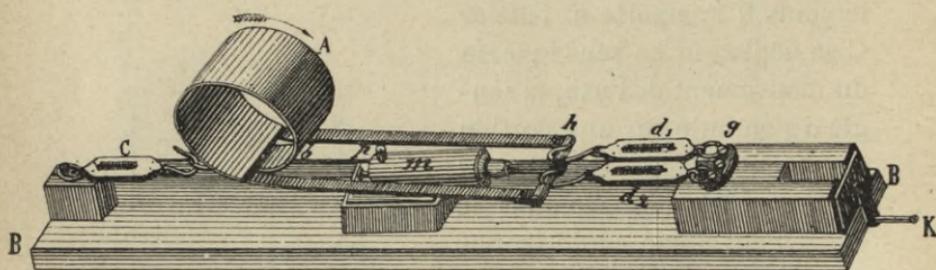


Fig. 16. — Frein pour petit moteur.

la poulie tourne dans le sens de la flèche, la tension du ressort *f* augmente, celle de *f*₁ diminue ; la différence *f* — *f*₁ est égale à la force de frottement. Le moment résistant utile est donc

$$T_u = (f - f_1) r,$$

r étant le rayon de la poulie.

En raison des variations inévitables du coefficient de frottement, les index des deux pesons ne restent pas immobiles, mais sont animés de vibrations qui, en général, permettent cependant de lire la position moyenne. On atténue d'ailleurs ces vibrations par un lubrifiage convenable ; on se sert le plus souvent d'huile et il faut n'en mettre ni trop, ni trop peu.

144. — La vitesse se détermine, comme nous l'avons indiqué plus haut (**133**), au moyen d'un diapason inscrivant ses vibrations sur la poulie tournante.

La figure 16 représente un frein pour petits moteurs, pouvant également être construit pour moteurs d'assez grande puissance, dû à M. Kohlrausch.

Un ruban A de cuivre mou entoure dans toute sa largeur la poulie du moteur. L'une des extrémités *b* de ce ruban est reliée à un peson à ressort *c* solidement fixé lui-même à la table B B. Deux autres pesons identiques d_1 et d_2 sont reliés, d'une part au double levier mobile *g*, d'autre part au ruban à l'aide de la tige transversale *h*. Le double levier *g* peut être déplacé au moyen d'une vis actionnée par une manivelle K; on peut ainsi augmenter ou diminuer la tension du ruban de friction A. La tige transversale *h* est reliée au piston d'un amortisseur de vibrations *m*, lequel est fixé lui-même à un pivot solide *p*; cette disposition a pour effet, en atténuant les vibrations des ressorts, de rendre plus aisées les lectures.

Il est clair que les deux pesons d_1 et d_2 peuvent être remplacés par un seul plus puissant.

Comme précédemment, la rotation se faisant dans le sens de la flèche, la force de frottement est mesurée par la différence des tensions aux deux extrémités du ruban de friction, c'est-à-dire ici, en désignant par *c*, d_1 et d_2 les lectures faites sur les 3 pesons, $d_1 + d_2 - c$. Le rayon de la poulie étant *r*, le moment résistant utile est

$$T_u = (d_1 + d_2 - c) r.$$

145. Mesures indirectes de puissance mécanique développée par un moteur. — Nous venons de voir comment l'emploi des dynamomètres ou freins à friction permet de mesurer le moment résistant utile appliqué à un moteur et par suite de calculer la puissance mécanique développée. Mais l'emploi des freins à friction, outre qu'il suppose la possession d'un de ces appareils, nécessite certaines

précautions, certains tours de main et ne donne des résultats exacts qu'aux expérimentateurs ayant déjà quelque pratique de ces appareils ; de plus les mesures faites au frein exigent souvent un temps assez long.

Aussi a-t-on cherché à remplacer les mesures faites au frein par des mesures purement électriques avec des instruments dont l'emploi ne réclame aucun apprentissage particulier. Nous allons successivement indiquer quatre méthodes différentes.

146. Méthode de M. Swinburne, ou de l'essai à vide. — Supposons qu'un moteur électrique, auquel on a appliqué, par un moyen quelconque, un effort résistant inconnu, tourne à une certaine vitesse V , avec une différence de potentiel aux bornes D et un courant i ; on mesure aussi le courant d'excitation des inducteurs, si le moteur est excité en dérivation.

En désignant par :

P , la puissance électrique totale dépensée dans le moteur ;

p_c , la puissance absorbée par l'échauffement des conducteurs ;

p , la puissance absorbée par la rotation ;

p_f , la puissance absorbée par les effets parasites ;

p_u , la puissance utile développée ;

on a

$$p_u = P - p_c - p_f.$$

Comme P est toujours égale à $D i$ et que la puissance p_c peut toujours se calculer aisément, lorsqu'on connaît la résistance des diverses parties du moteur (26), la détermination de p_u se ramène à celle de p_f . Voici comment on trouve une valeur approchée de cette dernière.

L'arbre du moteur étant complètement libéré de tout effort résistant extérieur, on donne aux électro-aimants inducteurs la même excitation que précédemment. A cet effet, si le moteur est excité en dérivation, on donne à la différence de

potentiel aux bornes la même valeur D qu'auparavant ; si le moteur est excité en série, il faut séparer les inducteurs de l'induit et les exciter à part par un courant égal à i . On fait alors passer dans l'induit un courant i'_a tel que le moteur prenne, à vide, une vitesse égale à la vitesse V précédemment observée ; la différence de potentiel aux balais Δ' est alors mesurée. La puissance $\Delta' i'_a$ dépensée dans l'induit est égale à la puissance absorbée par l'échauffement de cet induit, c'est-à-dire $r_a i_a'^2$ augmentée de la puissance p_f absorbée par les effets parasites. On peut donc écrire

$$p_f = \Delta' i'_a - r_a i_a'^2.$$

147. — Il faut remarquer, toutefois, que la puissance p_f ainsi déterminée est toujours un peu différente de celle qu'il s'agissait d'obtenir. En effet dans l'expérience à vide, on a bien excité les électro-aimants inducteurs par un courant égal à celui qui les traversait dans l'expérience sous charge, la vitesse est la même dans les deux cas ; mais il faut songer qu'à un même courant inducteur ne correspond exactement le même flux de force que si le courant dans l'induit est aussi identique. Par suite de la réaction de l'induit, le flux de force obtenu à vide, avec un faible courant dans l'induit, est différent de celui de l'essai sous charge et, par conséquent, pour la même vitesse, la puissance absorbée par les effets parasites n'est pas identique dans les deux cas.

148. Méthode de l'essai à vide modifiée. — On peut éviter de la manière suivante la cause d'erreur inhérente à la méthode précédente et que nous venons de signaler.

La puissance absorbée par les effets parasites sera la même dans l'essai à vide et dans l'essai sous charge, lorsque la vitesse et le flux de force seront identiques dans les deux essais. Or, pour la même vitesse, le flux de force aura la même valeur quand la force contre-électromotrice aura aussi

la même valeur. La modification que nous indiquons ici consiste donc à faire tourner le moteur, à vide, à la même vitesse que dans l'essai sous charge et avec une excitation des inducteurs telle que la force contre-électromotrice à vide soit aussi la même. Voici d'ailleurs la marche à suivre pour y parvenir.

149. — Supposons qu'un moteur ait tourné, sous charge, à la vitesse V , avec une différence de potentiel *aux balais* Δ et un courant dans l'induit i_a .

La force contre-électromotrice développée est alors

$$e = \Delta - i_a r_a,$$

r_a étant la résistance de l'induit.

Le moteur étant libéré de tout effort résistant extérieur, exciter séparément les inducteurs et lancer un courant dans l'induit par l'intermédiaire d'un rhéostat.

Observer la vitesse de rotation et la différence de potentiel Δ' mesurée *aux balais du moteur*. Agir sur le rhéostat commandant le courant dans l'induit de manière à donner à Δ' une valeur approximativement égale à la force contre-électromotrice e du moteur en charge, tout en augmentant ou diminuant le courant d'excitation des inducteurs de façon à donner à la vitesse la valeur V obtenue dans l'essai en charge. La force contre-électromotrice e' à vide ne diffère alors de la force électromotrice en charge que du produit toujours petit $i'_a r_a$, r_a n'étant que la résistance de l'induit seulement, toujours petite, et i'_a étant lui-même faible.

150. — On voit que la méthode peut se résumer ainsi : maintenir constante la différence de potentiel aux balais et égale à e et régler la vitesse par l'excitation des inducteurs, tandis que dans la méthode précédemment critiquée, l'excitation des inducteurs est maintenue constante et la vitesse réglée par le courant dans l'induit.

On calcule d'ailleurs toujours la puissance absorbée par les effets parasites dans l'essai à vide par la formule

$$p_f = \Delta' i_a' - r_a i_a'^2.$$

151. Emploi d'une génératrice pour absorber le travail produit par le moteur. — Nous avons dit qu'à défaut de frein on appliquait au moteur un effort résistant par un moyen quelconque. Une excellente manière de faire consiste à accoupler, d'une façon invariable, l'arbre du moteur M dont on fait l'étude (fig. 17) à l'arbre d'une dynamo M'

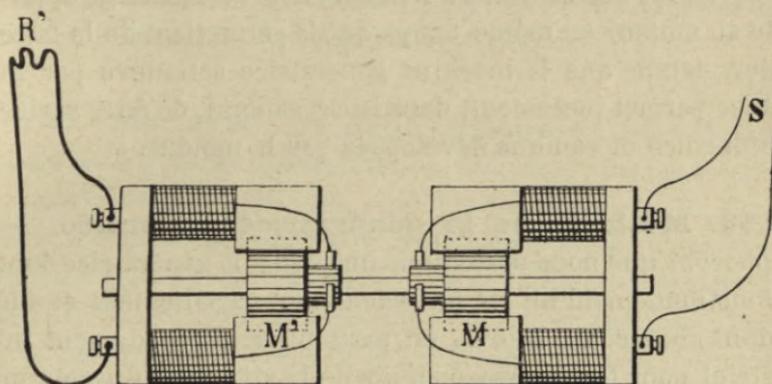


Fig. 17. — Emploi d'une génératrice pour absorber le travail produit par un électromoteur.

fonctionnant comme génératrice. Le circuit extérieur de cette dernière est formé par un rhéostat R' dont on peut à volonté faire varier la résistance; suivant la grandeur du courant qu'elle produit, cette génératrice absorbe en tournant une puissance mécanique plus ou moins grande que lui fournit le moteur électrique actionné par sa source S. On voit que cette dynamo génératrice remplace le frein de Prony. La réaction de ses inducteurs sur l'induit, en vertu de la loi de Lenz, ou, si l'on aime mieux, le *frottement* de l'induit sur le champ magnétique inducteur, est substitué au frottement des mâchoires du frein sur la poulie du moteur; c'est l'inducteur

de la génératrice qui joue le rôle de mâchoires, la poulie étant l'induit. Alors que le frein à friction proprement dit exige des soins particuliers pour fonctionner convenablement et qu'on ne peut éviter, malgré toutes les précautions, les variations du coefficient de frottement et les oscillations qui en résultent, la machine génératrice est toujours prête à fonctionner comme frein, on obtient immédiatement l'équilibre du moteur et cet équilibre se maintient indéfiniment, ce qui facilite singulièrement les mesures.

152. — Toutefois, il est bon d'observer que le frein de Prony ou les autres freins à friction *mesurent* la charge appliquée au moteur en même temps qu'ils permettent de la faire varier, tandis que la machine génératrice actionnée par le moteur permet seulement, dans le cas général, de faire varier la puissance mécanique développée par le moteur.

153. Méthode de la génératrice étalonnée. — Supposons que nous possédions une dynamo génératrice dont le fonctionnement ait été précédemment parfaitement étudié et dont nous connaissions, en particulier, le rendement industriel pour les diverses valeurs de la vitesse et du courant produit. Relions, comme plus haut (**151**), l'arbre de cette génératrice M' à l'arbre du moteur étudié M et alimentons ce dernier au moyen d'une source électrique S , machine électrique, ou batterie d'accumulateurs. Non seulement nous pourrons, en faisant varier la résistance R' du circuit extérieur de la génératrice, faire développer au moteur des puissances mécaniques différentes, mais encore il nous sera facile de connaître ces puissances mécaniques et d'en déduire par suite le moment résistant utile, par exemple.

Il suffit pour cela de mesurer, au moyen d'un ampèremètre, le courant i' produit par la génératrice dans son circuit extérieur et, au moyen d'un voltmètre, la différence de potentiel D' entre ses bornes. La puissance électrique développée par la génératrice dans son circuit extérieur est alors

D' i' et, si on désigne par η'_i le rendement industriel de la génératrice, dans les conditions de son fonctionnement, la puissance mécanique dépensée pour la faire tourner, c'est-à-dire la puissance mécanique utile développée par le moteur étudié, est exactement

$$p_u = \frac{D' i'}{\eta'_i}.$$

154. — Une telle dynamo génératrice, que nous pourrions dire *étalonnée*, puisqu'elle peut servir de point de comparaison dans l'étude des autres machines, remplace intégralement et avec avantage un dynamomètre à friction.

155. Méthode des deux machines identiques couplées mécaniquement. — Souvent, dans les ateliers de construction, on dispose, en outre du moteur étudié, d'une autre machine *identique*. On peut encore alors, mais d'une manière approchée seulement, étudier le fonctionnement du moteur, en utilisant exclusivement des mesures électriques et la mesure de la vitesse; la méthode que nous indiquons ici est due à M. Fontaine.

Les arbres des deux machines étant toujours reliés d'une manière invariable, on utilise l'une d'elles M comme moteur, en l'alimentant au moyen d'une source auxiliaire S; la seconde machine M' agit alors comme génératrice et produit un courant dans un circuit extérieur dont la résistance R' est variable à volonté (*fig. 17*).

Désignons par D, i , η_i , la différence de potentiel aux bornes, l'intensité du courant arrivant aux bornes et le rendement industriel pour le moteur, et par D', i' , η'_i , la différence de potentiel aux bornes, le courant extérieur et le rendement industriel pour la génératrice.

La puissance électrique dépensée dans le moteur est

$$P = D i.$$

Cette puissance correspond à une puissance mécanique utile

$$p_u = Di \times \eta_i.$$

Cette puissance mécanique appliquée à la génératrice est convertie en une puissance électrique utile qui n'en est qu'une fraction égale au rendement industriel η'_i . Cette puissance électrique utile $p_u \times \eta'_i$ développée par la génératrice est, d'autre part, égale à $D' i'$. On a donc

$$p_u \times \eta'_i = D' i'.$$

Or les deux machines sont supposées identiques ; elles tournent à la même vitesse. Si on admet qu'elles ont le même rendement industriel, c'est-à-dire si on suppose

$$\eta'_i = \eta_i,$$

on peut alors remplacer η'_i par sa valeur tirée de l'équation précédente et on trouve

$$p_u^2 = Di \times D' i'$$

On trouverait aussi, par l'élimination de p_u

$$\eta_i^2 = \frac{D' i'}{Di}.$$

156. — L'hypothèse, sur laquelle on s'appuie, de l'égalité des rendements n'est pas toujours vérifiée.

Examinons d'abord le cas d'une machine excitée en série et servant successivement de moteur et de génératrice.

Lorsqu'elle tourne comme moteur avec un courant i , la force contre-électromotrice étant e , le rendement industriel est (43)

$$\eta_i = \frac{ei - p_f}{ei + p_c}$$

p_f étant la puissance absorbée par les effets parasites et p_c la puissance absorbée par l'échauffement des conducteurs.

Si la même machine tourne comme génératrice à la même vitesse que précédemment et si le circuit extérieur est tel que le courant produit soit encore i , la force électromotrice est encore égale à e , puisque le champ magnétique inducteur est le même dans les deux cas. D'ailleurs les puissances p_f et p_c conservent aussi les mêmes valeurs. Or, pour une machine génératrice, le rendement industriel peut s'écrire

$$\eta'_i = \frac{ei - p_c}{ei + p_f}$$

Les deux rendements ne sont identiques que si p_c est égal à p_f , ce qui n'est approximativement réalisé que pour les machines puissantes, parce qu'alors ces deux puissances ont toutes deux des valeurs relatives assez faibles pour que leur différence soit négligeable. Il est bon toutefois de faire remarquer que le plus souvent, dans les machines bien construites, la puissance p_f quoique peu différente de p_c lui est néanmoins inférieure, de sorte que, si les rendements sont approximativement identiques, celui du moteur est plutôt supérieur.

157. — Supposons maintenant que nous ayons affaire à une machine excitée en dérivation.

Tout d'abord, on voit aisément qu'une machine excitée en dérivation ne peut avoir, en tournant comme génératrice, une force électromotrice égale à la force contre-électromotrice développée à la même vitesse par cette même machine employée comme moteur, si l'on veut en même temps que le courant dans l'induit soit le même dans les deux cas, à moins qu'on n'apporte des modifications dans le circuit de la machine suivant son mode de fonctionnement, qu'on ne change, par exemple, la résistance de la dérivation qui comprend les inducteurs, ou que la machine ne soit excitée séparément.

En effet, pour que la force électromotrice fût la même dans les deux cas, en même temps que la vitesse et le courant

i_a dans l'induit, il faudrait que le courant inducteur i_a fût identique. Mais, si le circuit inducteur n'a pas été modifié, le courant inducteur ne peut avoir la même valeur dans les deux modes de fonctionnement que pour la même valeur de la différence de potentiel aux bornes D. Or, dans le cas de la génératrice, la force électromotrice est $D + i_a r_a$, r_a étant la résistance de l'induit, tandis que, pour le moteur, la force contre-électromotrice est $D - i_a r_a$ (83). Ces forces électromotrices ne peuvent être approximativement identiques que dans le cas particulier d'une résistance r_a d'induit très faible, ou d'un courant i_a dans l'induit de très faible intensité.

158. — Avec cette hypothèse d'une résistance r_a très faible, les rendements, qui sont, pour la machine employée comme réceptrice,

$$\eta_i = \frac{ei_a - p_f}{ei_a + p_c}$$

et, pour la machine fonctionnant en génératrice,

$$\eta'_i = \frac{ei_a - p_c}{ei_a + p_f},$$

auront encore sensiblement la même valeur, si ces rendements sont mesurés dans les conditions de fonctionnement que nous allons indiquer :

- 1° Vitesse identique ;
- 2° Courant dans l'induit de même intensité.

L'intensité inductrice et, par suite, la force électromotrice sera identique dans les deux cas. Il faut, en effet, remarquer qu'une machine excitée en dérivation et à résistance d'induit très faible, comme nous le supposons ici, tournant à la vitesse V comme génératrice, donne aux bornes une différence de potentiel D' constante, quelle que soit l'intensité du courant produit ; inversement pour faire tourner la même machine comme moteur à cette même vitesse V, il faut lui appliquer

aux bornes une différence de potentiel D sensiblement égale à D' , quelle que soit la charge du moteur et le courant dans l'induit.

159. — Lorsque la résistance de l'induit n'est pas négligeable, ce qui est le cas le plus général, les forces électromotrices ne pouvant plus être identiques, pour la même vitesse et le même courant dans l'induit, ainsi que nous l'avons montré, lorsque la machine est employée successivement comme génératrice et comme réceptrice, on ne peut plus rien affirmer au sujet de l'égalité des rendements, si les machines sont utilisées sans modifications dans leur excitation.

Mais on peut alors exciter la machine séparément, ou intercaler sur le circuit des inducteurs un rhéostat de réglage.

Supposons que, dans ces conditions, le courant inducteur ayant une valeur i_a , on actionne la machine comme réceptrice et qu'elle tourne à une vitesse V pour un courant i_a dans l'induit. Employons la machine comme génératrice, faisons-la tourner à la vitesse V , réglons le courant inducteur à la valeur précédente i_a et agissons sur le circuit extérieur de manière que le courant dans l'induit soit encore i_a . Le rendement de la machine, ou, plus exactement, de l'induit sera approximativement identique dans les deux cas.

160. — En résumé, nous pourrions admettre que le rendement d'une machine est approximativement le même lorsqu'elle fonctionne comme réceptrice ou comme génératrice, à la condition que, dans les deux cas, la vitesse, le courant inducteur et le courant dans l'induit soient identiques. Lorsqu'il en est ainsi, la puissance mécanique utile développée par le moteur est approximativement égale à la puissance électrique utile de la génératrice, et la puissance électrique totale absorbée par le moteur à la puissance mécanique absorbée par la génératrice.

161. — Mais il n'en peut être de même lorsque deux machines identiques ont leurs axes couplés, comme nous l'avons indiqué (155), de manière que l'une employée comme moteur fournisse à la seconde l'énergie mécanique nécessaire pour la faire fonctionner comme génératrice; la puissance de cette génératrice est toujours notablement inférieure à celle du moteur.

Si les deux machines sont excitées en série, on ne peut faire en sorte que le courant produit par la génératrice soit égal au courant lancé dans la réceptrice; car alors la puissance électrique totale développée par la génératrice serait égale à la puissance électrique absorbée par la rotation de la réceptrice, tandis qu'en réalité elle doit lui être inférieure de la somme des puissances absorbées par les effets parasites tant dans la génératrice que dans la réceptrice. Le courant produit par la génératrice sera inférieur à celui de la réceptrice.

Si les machines sont excitées en dérivation, pour une même excitation des inducteurs, le courant dans l'induit sera plus petit dans la machine génératrice.

On voit donc qu'il n'est pas légitime d'affirmer que les rendements sont égaux pour les deux modes de fonctionnement. On peut dire, tout au plus, que le rendement d'une machine puissante bien construite variant peu, en général, aux environs de sa puissance normale maximum, *il est probable* que pour les grandes puissances le rendement de la génératrice est assez voisin de celui de la réceptrice. Pour les faibles puissances la différence entre les rendements est toujours accusée, parce que les effets parasites acquièrent une importance relative plus grande. En prenant un exemple à la limite, supposons qu'on lance dans le moteur un courant d'une intensité assez faible pour que la vitesse V à laquelle les machines sont essayées ne puisse être maintenue qu'à la condition d'ouvrir le circuit extérieur de la génératrice, c'est-à-dire de rendre nulle sa puissance électrique utile. Le rendement industriel de cette génératrice est alors nul, tandis que le

moteur, produisant au moins comme travail extérieur les frottements de la machine génératrice, a un rendement industriel faible, mais pas nul.

162. Méthode précédente modifiée. — Lorsqu'on applique la méthode que nous venons d'exposer (155), au lieu de considérer comme identiques les rendements industriels des deux machines reliées mécaniquement et dont l'une fonctionne comme moteur, l'autre comme génératrice, il est plus rationnel de supposer identiques les puissances absorbées par les effets parasites. En particulier, dans le cas de machines excitées en dérivation, ou dont l'excitation est faite séparément, en donnant au courant inducteur la même valeur pour les deux machines, ce qu'il est alors toujours possible de réaliser au moyen de rhéostats d'excitation convenables, comme, d'autre part, la vitesse est la même pour le moteur et la génératrice, les effets parasites seront presque absolument identiques. On pourra très légitimement regarder comme négligeable la petite différence dans la réaction d'induit due à l'infériorité du courant dans l'induit de la génératrice. Voici comment se fait alors le calcul de la puissance mécanique p_u développée par le moteur. Nous avons déjà dit que la puissance $e i_a$ absorbée pour la rotation du moteur est égale à la somme de la puissance mécanique p_u et de la puissance p_f absorbée par les effets parasites (83)

$$e i_a = p_u + p_f.$$

D'autre part, la puissance mécanique p_u , appliquée à la machine génératrice, est égale à la puissance électrique totale développée par celle-ci, augmentée de la puissance absorbée par les effets parasites qui s'y développent. En désignant par e' et i'_a la force électromotrice et le courant dans l'induit de la génératrice et en supposant que les effets parasites sont les mêmes dans les deux machines, on a donc

$$p_u = e' i'_a + p_f.$$

On déduit de là, ou bien

$$p_u = \frac{e i_a + e' i'_a}{2},$$

ou bien

$$p_f = \frac{e i_a - e' i'_a}{2}.$$

On voit, en passant, qu'il y a là un moyen de mesurer la puissance p_f absorbée par les effets parasites, pendant que le moteur est en charge, et d'obtenir, par suite, des valeurs plus exactes que lorsqu'on fait cette détermination à vide (146).

163. — REMARQUE. — On peut, d'ailleurs, comme nous l'avons déjà fait remarquer plus haut (148), rendre encore plus parfaite l'identité des effets parasites dans le moteur et la génératrice, en agissant sur les courants d'excitation, non plus pour les rendre égaux, mais pour donner des valeurs égales aux forces électromotrices du moteur et de la génératrice. Nous rappelons que la force électromotrice de la génératrice est

$$e' = D' + i'_a r_a,$$

D' étant la différence de potentiel aux balais.

La force contre-électromotrice du moteur est, au contraire

$$e = D - i_a r_a.$$

L'excitation du moteur restant fixe, on agira sur le circuit d'excitation de la génératrice de manière à obtenir pour e' une valeur égale à e . Dans le cas où la résistance r_a de l'induit est très faible, ce résultat sera très approximativement obtenu en faisant D' égale à D .

164. Méthode des machines identiques couplées mécaniquement et électriquement. — La méthode qui précède (155) exige, outre les deux machines

identiques soumises aux essais, dont l'une est employée comme moteur, et l'autre comme génératrice, une source d'électricité destinée à actionner le moteur électrique. Cette source, machine électrique ou batterie d'accumulateurs, doit être d'une puissance supérieure à la puissance maximum pour laquelle on veut faire l'essai du moteur électrique. L'essai des machines puissantes serait donc impossible dans les ateliers ne possédant ni une batterie d'accumulateurs, ni un moteur à vapeur de puissance comparable, puisque toutes les méthodes dont nous nous sommes occupés jusqu'à présent offrent les mêmes exigences au point de vue de la source électrique. Aussi a-t-on combiné un certain nombre de méthodes permettant l'essai des machines avec une source de puissance bien inférieure à la leur. Nous donnons ici l'une de ces méthodes.

165. — Supposons, comme nous l'avons déjà fait (155), que deux machines électriques M et M' aient leurs axes reliés mécaniquement de telle manière que si l'une d'elles M est actionnée comme moteur électrique par une troisième machine électrique S ou une autre source auxiliaire, l'autre M' est entraînée à la même vitesse et fonctionne comme génératrice. Au lieu de faire passer dans un circuit spécial, composé de résistances inertes, le courant produit par cette génératrice, on peut diriger ce courant dans le moteur M , de telle manière qu'il concoure à faire tourner ce moteur en même temps que le courant de la source S . Il est clair qu'alors la source S n'ayant plus à fournir à elle seule toute la puissance nécessaire à la rotation du moteur, pourra être considérablement réduite. Supposons que l'excitation des deux machines M et M' soit faite d'une manière indépendante. Soit i_s et i'_m les courants produits par les machines S et M' ; soit i_m le courant passant dans le moteur M ; on a la relation

$$i_s + i'_m = i_m.$$

Soient, d'autre part, D_m la différence de potentiel aux bornes

du moteur M et D'_m la différence de potentiel aux bornes de la génératrice M'. La puissance électrique absorbée par le moteur M (non comprise la puissance demandée pour l'excitation) est $D_m i_m$. Cette puissance électrique se transforme en une puissance mécanique utile p_u dont la valeur est

$$p_u = D_m i_m \times \eta_m,$$

η_m étant le rendement industriel de l'induit de la machine M.

Cette puissance mécanique employée à faire tourner la génératrice M' permet à celle-ci de produire une puissance électrique utile $D'_m i'_m$ reliée à la puissance p_u par la relation

$$p_u \times \eta'_m = D'_m i'_m,$$

η'_m étant le rendement industriel de l'induit de la génératrice M'. En combinant les deux relations précédentes, il vient

$$p_u^2 = D_m i_m \times D'_m i'_m \times \frac{\eta_m}{\eta'_m}.$$

Si les deux machines M et M' sont identiques, on pourra encore supposer égaux les rendements industriels des deux induits, mais toutefois avec les réserves que nous avons faites plus haut (156), il vient alors

$$p_u^2 = D_m i_m \times D'_m i'_m.$$

On aurait pareillement, en désignant par η_i la valeur commune du rendement industriel

$$\eta_i^2 = \frac{D'_m i'_m}{D_m i_m}.$$

On peut d'ailleurs faire en sorte que les différences de potentiel D_m et D'_m soient identiques; il suffit pour cela de relier les deux machines M et M' par des conducteurs de résistance négligeable. Soit D la différence de potentiel commune. La machine S auxiliaire ne fournit que la puissance élec-

trique $D i$, différence entre la puissance électrique $D i_m$ absorbée par le moteur et la puissance électrique utile $D i'_m$ développée par la génératrice; cette différence est la puissance absorbée par l'échauffement des induits M et M' , par les courants de Foucault, l'hystérésis et les frottements dans les deux machines, c'est-à-dire peu de chose relativement à la puissance totale des deux machines.

166. — Si les deux machines sont identiques, il faut, pour que le courant de la génératrice M' puisse passer dans le moteur M , que l'excitation de ce dernier soit inférieure à celle de la première; sinon les vitesses de rotation étant les mêmes, les forces électromotrices seront identiques pour la même excitation et, comme elles sont opposées, la machine génératrice M' ne pourra alimenter le moteur. L'excitation séparée que nous avons indiquée permet d'ailleurs facilement d'obtenir cette différence d'excitation. Voici d'ailleurs comment peuvent être reliées les trois machines S , M et M' .

167. — Les deux machines à essayer identiques, dont les arbres sont reliés mécaniquement, ont leurs induits M et M' associés en quantité et reliés aux bornes d'une troisième machine S auxiliaire (*fig. 18*). Les trois machines sont excitées par des dérivations prises sur la machine S et leurs électro-aimants inducteurs sont représentés en E_m , E'_m et E_s . Le rhéostat R , intercalé sur le circuit des induits, est destiné à faire varier la différence de potentiel aux bornes des machines M et M' et en outre à permettre le démarrage sans accident. Un second rhéostat R' est placé sur le circuit de l'un des inducteurs E_m de manière à pouvoir réduire l'excitation de la machine correspondante. Un voltmètre v permet de mesurer la différence de potentiel aux bornes commune à M et M' ; un ampèremètre a mesure, grâce au commutateur C , soit l'intensité i_m passant dans la machine M , soit l'intensité i'_m de la machine M' , ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte sans autre explication. Des ampèremètres et des volt-

mètres non représentés sur la figure servent à mesurer les courants d'excitation des machines M et M' et les différences de potentiel aux extrémités de leurs inducteurs, afin d'en déduire la puissance absorbée par l'excitation.

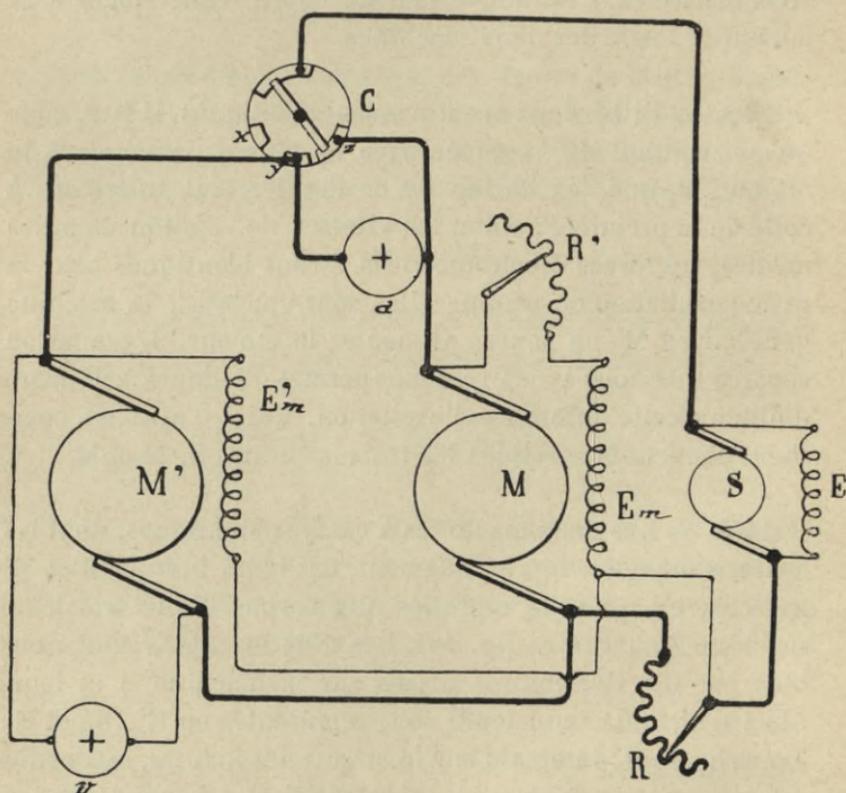


Fig. 18. — Méthode des machines identiques couplées mécaniquement et électriquement.

168. — Voici comment on procède pour un essai. Le rhéostat R étant d'abord introduit tout entier dans le circuit des inducts et le commutateur C ayant été manœuvré de manière à ce que sa lame de contact appuie sur la touche *x*, ce qui interrompt les communications de la machine S avec les machines M et M', la machine S est mise en marche à une vitesse convenablement choisie de manière à pouvoir sou-

mettre les machines M et M' à la différence de potentiel pour laquelle on veut faire l'essai, quand on aura diminué la résistance du rhéostat R . Il y a là, on le conçoit, un réglage préparatoire à chercher. La vitesse de la machine S ayant été choisie, elle devra, d'ailleurs, rester constante pendant la durée des essais.

Les machines M et M' sont ensuite excitées et on donne, au moyen du rhéostat R' , au courant inducteur de M une valeur un peu inférieure à celle du courant inducteur de M' . On met alors le commutateur C sur l'une des touches de contact y ou z . Les machines M et M' se mettent à tourner. On règle, au moyen du rhéostat R , la différence de potentiel aux bornes des machines lue sur le voltmètre v et, au moyen du rhéostat R' l'intensité du courant traversant les induits M et M' .

Si l'on veut opérer pour une valeur donnée à l'avance du courant dans l'induit des machines, on agit sur le rhéostat de manière que le courant passant en M soit un peu plus grand que le courant choisi et que le courant en M' soit un peu plus petit, la différence entre les deux étant toujours d'ailleurs le courant fourni par la machine S .

Pour mesurer le courant i_m passant en M , on porte le commutateur sur la touche y , et pour lire le courant passant en M' , on met ce commutateur en z .

Cette disposition a pour objet de lire les deux intensités avec le même instrument, de manière que dans les différents essais les mesures restent aisément comparables entre elles. Si l'on a pour but de déterminer le rendement des machines, on voit même qu'il suffit d'employer un ampèremètre dont les déviations soient proportionnelles aux intensités, sans que l'on ait besoin de connaître l'intensité absolue correspondant à une déviation particulière, c'est-à-dire la constante de l'instrument.

169. Séparation des pertes par hystérésis, par frottements et par courants de Foucault. — Nous

avons vu déjà (146) comment on peut, par un essai du moteur à vide, déterminer la puissance absorbée par les effets parasites, pour une vitesse et une excitation déterminées. Il est possible aussi de distinguer, dans cette puissance perdue, la part provenant des courants de Foucault de celle due à l'hystérésis et aux frottements proprement dits; voici la méthode de M. Gisbert Kapp qui permet de faire aisément ces déterminations.

Nous avons vu qu'on peut mettre la puissance p_f absorbée par les effets parasites sous la forme (50)

$$p_f = a\Phi'^2 V^2 + b\Phi' V + cV,$$

a, b, c étant des coefficients dépendant de la machine particulière employée et relatifs aux courants de Foucault, à l'hystérésis et aux frottements proprement dits. Nous pouvons écrire cette relation, avec M. Gisbert Kapp,

$$p_f = FV^2 + HV,$$

F et H dépendant alors du flux de force Φ' .

Il est clair que la part de la puissance parasite due aux courants de Foucault est

$$p_f \times \frac{FV^2}{FV^2 + HV} = p_f \times \frac{FV}{FV + H};$$

celle due à l'hystérésis et aux frottements est

$$p_f \times \frac{H}{FV + H}.$$

Tout revient donc à déterminer les rapports $\frac{FV}{FV + H}$ et

$\frac{H}{FV + H}$, puisque nous savons déjà, par la méthode de l'essai à vide, trouver p_f .

Or, lorsque le moteur tourne à vide à la vitesse V , avec un courant dans l'induit i'_a et une excitation des inducteurs

produisant un flux Φ' , le moment de rotation du moteur est égal au moment résistant parasite et on a

$$\frac{nN\Phi' i'_a}{\pi \times 10^8} = \frac{30 \times (FV + H)}{\pi}$$

Conservons la même excitation des inducteurs et faisons passer dans l'induit du moteur un courant i''_a tel que le moteur ne tourne pas, mais soit juste sur le point de se mettre en mouvement; la vitesse V étant nulle, nous aurons pour ce nouvel équilibre

$$\frac{nN\Phi' i''_a}{\pi \times 10^8} = \frac{30 \times H}{\pi}$$

En écrivant cette seconde relation, nous supposons implicitement que, pour la même excitation des inducteurs, le flux Φ' est resté le même que lorsque le moteur tournait à la vitesse V , ce qui entraîne la même valeur dans les deux cas pour le coefficient H . Cette hypothèse ne serait absolument exacte que s'il n'y avait pas de réaction d'induit; en réalité, il y a toujours une réaction d'induit, mais comme les courants i'_a et i''_a sont faibles, les réactions qu'ils amènent sont faibles et la différence entre ces réactions est généralement négligeable, de sorte que l'hypothèse sur laquelle on s'appuie est approximativement vraie. Nous verrons d'ailleurs comment on peut et doit vérifier qu'il en est ainsi.

On tire des deux relations que nous venons d'écrire

$$\frac{H}{FV + H} = \frac{i''_a}{i'_a}$$

et

$$\frac{FV}{FV + H} = \frac{i'_a - i''_a}{i'_a}$$

Par conséquent, la puissance absorbée par les effets parasites ayant été mesurée, comme nous l'avons indiqué (146), à la vitesse V et pour l'excitation des inducteurs choisie, au

moyen de l'observation du courant i'_a exigé pour la rotation, il suffit, pour séparer la puissance absorbée par les courants de Foucault de celle absorbée par l'hystérésis et les frottements, de mesurer en outre le courant i''_a qui, pour la même excitation des inducteurs, commence à produire un mouvement appréciable.

170. — Si le flux de force Φ' reste identique, pour la même excitation des inducteurs, quel que soit le courant i'_a lancé dans l'induit tournant à vide, c'est-à-dire quelle que soit la vitesse de rotation, ainsi que nous avons été amenés à le supposer, la relation précédemment écrite entre le moment moteur et le moment résistant peut s'écrire

$$K i'_a = FV + H.$$

Il en résulte que la courbe obtenue en considérant i'_a et V comme deux variables est une droite. Par conséquent, si on

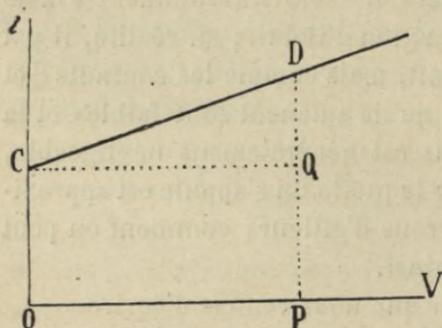


Fig. 19. — Séparation des pertes par hystérésis et courants de Foucault.

mesure expérimentalement les différentes valeurs du courant dans l'induit correspondant à diverses vitesses à vide et si on prend comme abscisses les vitesses et comme ordonnées les intensités, les points ainsi déterminés doivent être sur une ligne droite. C'est là une vérification préalable

qu'il faut faire avant d'appliquer la méthode que nous venons d'indiquer. Le tracé de la droite dont nous venons de parler permet d'ailleurs de déterminer plus aisément et plus exactement que directement l'intensité du courant i''_a nécessaire pour produire un commencement de mouvement du moteur. Soit en effet AB la droite ainsi établie (fig. 19) par quelques

observations d'intensités de courant faites à des vitesses suffisamment différentes ; cette droite prolongée coupe l'axe des intensités en un point C dont l'ordonnée CO mesure l'intensité i''_a du courant correspondant à une vitesse nulle. On voit d'ailleurs aussi que si le point D est celui obtenu à la vitesse V pour laquelle on fait l'essai du moteur, l'ordonnée DP représente le courant i'_a et la longueur DQ la différence $i'_a - i''_a$. Ces longueurs CO, DP et DQ sont, par suite, respectivement proportionnelles à H, FV + H et FV.

171. — Lorsqu'on a calculé, comme nous venons de le dire, la portion de la puissance p_f absorbée par les effets parasites, correspondant à l'hystérésis et aux frottements mécaniques, on peut encore séparer ces deux derniers effets, au moins lorsqu'on possède deux machines identiques. Il suffit pour cela de relier mécaniquement les arbres des deux machines et d'alimenter l'une d'elles comme moteur électrique, ainsi d'ailleurs que nous l'avons indiqué à plusieurs reprises (155). La seconde machine tourne sans excitation, sur un circuit extérieur ouvert. Le moteur en tournant n'a donc à vaincre, en plus de ses propres effets parasites, que les frottements mécaniques de la machine qu'il entraîne. Si donc on mesure le courant i''_a nécessaire pour obtenir la vitesse V, l'excitation du moteur étant la même que dans la précédente détermination de la puissance p_f absorbée par les effets parasites et si on déduit, par le calcul indiqué (146), la puissance p'_f absorbée par les effets parasites du moteur et les frottements mécaniques de la machine qu'il entraîne, on a, pour la puissance absorbée par ces derniers seuls, la valeur $p'_f - p_f$.

§ 2. — Applications des méthodes de mesure.

172. Généralités. — Nous avons, dans ce qui précède, étudié séparément les principales méthodes de mesure qui

permettent de déterminer les éléments intéressant le fonctionnement d'un moteur électrique. Nous allons maintenant appliquer à quelques cas particuliers l'ensemble de ces mesures, nous efforçant de bien faire ressortir la manière d'opérer et montrant par des exemples numériques l'exactitude plus ou moins grande que l'on peut atteindre.

ÉTUDE D'UN MOTEUR EXCITÉ EN SÉRIE, FONCTIONNANT SOUS DIFFÉRENCE DE POTENTIEL CONSTANTE, AU MOYEN D'UN FREIN DE PRONY

173. Disposition des essais. — Le moteur à essayer est mis en relation, par exemple, avec une machine électrique

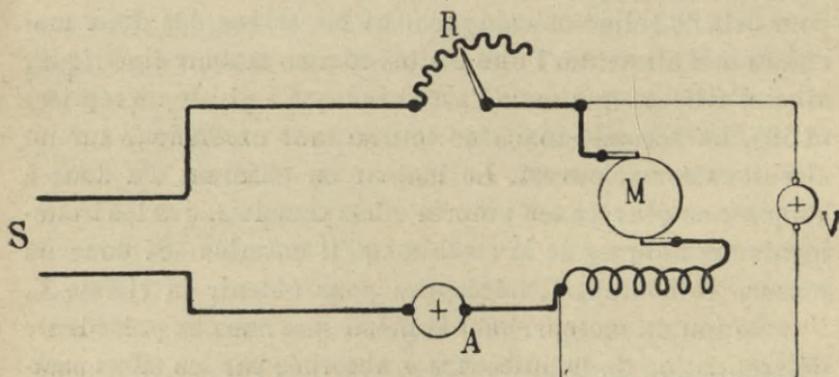


Fig. 20. — Essai d'un moteur en série au frein de Prony.

à excitation compound presque exactement autorégulatrice de la différence de potentiel entre ses bornes, pour une vitesse de rotation constante. Le fonctionnement du moteur devant être étudié pour une différence de potentiel constante entre ses bornes, un rhéostat R est intercalé entre le moteur M et la source S (fig. 20) de manière à pouvoir corriger les variations dans la différence de potentiel aux bornes du moteur produites par les changements de vitesse de la dynamo servant de source, ou les variations de la chute de potentiel dans les

conducteurs de liaison. Le rhéostat est aussi utilisé pour le démarrage. Un ampèremètre A est intercalé sur l'un des conducteurs et un voltmètre V est placé en dérivation entre les bornes du moteur ; ces deux instruments ont été d'ailleurs préalablement contrôlés.

Un tachymètre Buss est commandé par l'arbre du moteur M ; ses indications peuvent et doivent même être contrôlées par celles d'un compte-tours, soit pendant la série des essais, soit peu de temps auparavant. Nous supposons dans ce qui suit que cet étalonnage de tachymètre a été fait déjà et nous porterons comme vitesse les nombres observés au tachymètre corrigés d'après les indications comparatives du compte-tours.

Enfin un frein de Prony à leviers parallèles (137) est monté sur une poulie calée sur l'arbre du moteur électrique.

174. Manière d'opérer. — Quatre observateurs sont utiles ; l'un d'eux observe le voltmètre et manœuvre le rhéostat de réglage R, un deuxième lit l'ampèremètre, le troisième mesure les vitesses et le dernier manœuvre le frein. Ces quatre observateurs peuvent, il est vrai, être réduits à deux, l'un observant les deux instruments électriques, l'autre manœuvrant le frein et lisant la vitesse. Nous avons vu en effet, qu'avec un frein bien conditionné l'équilibre obtenu peut se maintenir pendant quelques instants et permettre ainsi plusieurs observations par le même opérateur. Mais il vaut toujours mieux faire simultanément les diverses observations ; les essais sont toujours alors plus rapides et plus exacts. On conçoit en effet qu'un équilibre même fugitif puisse être *saisi* par quatre observateurs veillant les quatre appareils, alors que son instabilité eût donné beaucoup de peine avec un nombre plus restreint d'observateurs.

175. — Le circuit étant d'abord maintenu ouvert au moyen d'un interrupteur, on intercale toute la résistance du rhéostat R (*fig. 20*). On a tout d'abord déterminé la vitesse

de rotation de la dynamo-source S permettant d'obtenir entre les bornes de cette machine une différence de potentiel un peu supérieure à la différence de potentiel D que l'on veut maintenir constante entre les bornes du moteur. La source est mise en marche à cette vitesse et celle-ci doit rester sensiblement constante pendant toute la durée des essais. Ceci d'ailleurs n'est qu'un ordre général pour la conduite de la source et les observateurs n'auront à se préoccuper de la vitesse de la source, pendant la durée des essais, que s'ils constatent l'impossibilité d'obtenir aux bornes du moteur la différence de potentiel voulue D , malgré la manœuvre du rhéostat R . Il est bien évident qu'une batterie d'accumulateurs remplacerait avantageusement, comme source électrique, une dynamo même à enroulement compound, par suite de la constance de sa force électromotrice ; il faudra y avoir recours de préférence, lorsqu'on le pourra.

Les écrous de réglage du frein (137) sont d'abord serrés modérément de manière que le frottement des mâchoires soit plutôt faible. Le poids placé à l'extrémité du levier est au début notablement supérieur à celui qu'il sera nécessaire d'y mettre pour obtenir l'équilibre lorsque le moteur sera mis en marche sous la différence de potentiel D ; cela afin d'éviter les chocs du levier contre son butoir supérieur au moment du démarrage. En d'autres termes, il est bon, pour le début des essais, de donner un serrage modéré aux écrous et d'immobiliser le frein en bas, par un poids suffisant.

L'interrupteur est alors fermé et le moteur se met en marche progressivement ; on diminue peu à peu la résistance du rhéostat R . La différence de potentiel aux bornes du moteur et sa vitesse de rotation augmentent ; il y a lieu tout d'abord de s'assurer, par l'observation du tachymètre que la vitesse ne dépasse pas la vitesse maximum pour laquelle on veut opérer et qui dépend de la solidité mécanique du moteur. Dans le cas où l'on s'aperçoit que la vitesse semble devoir prendre des valeurs dangereuses, on cesse de diminuer la résistance du rhéostat et on augmente un peu le serrage des

écrous du frein de façon à accroître le frottement. Après quelques tâtonnements sur lesquels nous n'insisterons pas davantage, on arrive aisément à obtenir pour le moteur une vitesse acceptable après avoir diminué la résistance du rhéostat jusqu'à obtenir au moteur une différence de potentiel voisine de celle D pour laquelle on fait les essais ; ceux-ci commencent alors véritablement. On voit qu'avec cette manière d'opérer, on débute par les efforts résistants et, par suite, les intensités de courant les plus faibles. Cette façon de faire nous semble préférable en ce que l'effort demandé au moteur à vapeur qui actionne la dynamo-source étant alors progressif, on ne s'expose pas à se heurter tout d'abord à une insuffisance de ce moteur à vapeur ou de la chaudière qui l'alimente, comme cela pourrait avoir lieu si on avait débuté par des efforts supérieurs à l'effort normal qui sera imposé au moteur. De plus, si l'on doit mesurer la résistance, ou plutôt la température des diverses parties du moteur pendant le courant des essais (131), il faut évidemment commencer par les équilibres du moteur correspondant aux courants les plus faibles.

176. — Voici maintenant comment se font les observations relatives à un équilibre du moteur.

L'observateur du voltmètre règle la différence de potentiel aux bornes du moteur à la valeur D en agissant dans le sens convenable sur la résistance du rhéostat R. Il prévient, par un signal convenu fréquemment répété que la différence de potentiel est égale à D, ou très voisine. L'observateur du frein diminue progressivement le poids appliqué à l'extrémité du levier jusqu'à voir celui-ci quitter le butoir inférieur et osciller ; quand il estime que l'équilibre est obtenu, il fait un signal définitif ; à ce moment les quatre observateurs notent : la différence de potentiel D aux bornes du moteur, l'intensité i du courant, la vitesse V et enfin le poids placé à l'extrémité du levier du frein d'où on déduira le moment résistant utile. Les observations sont bonnes, si la différence de potentiel est égale à la valeur qu'on s'est proposé de main-

tenir constante, ou si elle en est très voisine. On parviendra, d'ailleurs aisément, en répétant plusieurs fois l'opération, à obtenir la coïncidence nécessaire de l'équilibre du frein et d'une différence de potentiel aux bornes convenable.

Cette première série de nombres obtenue, l'observateur du frein serre davantage les écrous de réglage de manière à augmenter l'effort résistant et, par suite, l'intensité du courant. Le réglage de la différence de potentiel se fait comme ci-dessus; il faudra, le plus souvent, diminuer la résistance du rhéostat pour compenser la perte de potentiel plus grande due à l'accroissement du courant. L'équilibre s'obtient, comme ci-dessus, par la manœuvre du poids placé sur le levier du frein et les lectures se font de même.

On obtient ainsi successivement des équilibres correspondant à des efforts résistants et des courants plus grands. On s'arrête lorsque l'on juge être arrivé au courant maximum que le moteur peut supporter, ou lorsque la source électrique devient insuffisante.

Les équilibres successifs doivent être naturellement plus rapprochés les uns des autres au voisinage du fonctionnement que l'on a l'intention d'adopter comme normal pour le moteur, c'est-à-dire en général entre le maximum de la puissance utile et le maximum du rendement industriel.

Quand on a ainsi opéré par courants et efforts résistants croissants, on peut recommencer en procédant par efforts décroissants et l'on va jusqu'à la vitesse maximum que peut supporter le moteur.

177. Calcul des éléments du moteur au moyen des données des observations. —

Les observations donnent directement la différence de potentiel aux bornes D , l'intensité du courant i et la vitesse V . Du poids placé pour l'équilibre à l'extrémité du levier, on déduit comme nous l'avons indiqué (135) le moment résistant utile T_u , si l'on a préalablement taré le frein. Voici ensuite les formules permettant de calculer successivement les éléments du moteur,

connaissant la résistance des inducteurs r_g et de l'induit r_a
(56)

Force contre-électromotrice,

$$e = D - i(r_a + r_g).$$

Puissance électrique totale dépensée dans le moteur,

$$P = D i.$$

Puissance électrique dépensée pour l'échauffement des conducteurs,

$$p_c = (r_g + r_a) i^2.$$

Puissance électrique absorbée par la rotation du moteur,

$$p = P - p_c = e i.$$

Puissance mécanique utile développée par le moteur,

$$p_u = \frac{\pi V T_u}{30}.$$

Puissance absorbée par les effets parasites,

$$p_f = p - p_u.$$

Moment de rotation,

$$T = \frac{30 p}{\pi V}.$$

Moment résistant parasite,

$$T_f = \frac{30 p_f}{\pi V} = T - T_u.$$

Rendement électrique,

$$\eta_e = \frac{p}{P}.$$

Rendement industriel,

$$\eta_i = \frac{p_u}{P}.$$

Le tableau suivant renferme les valeurs correspondantes des éléments d'un moteur en série mesurés ou calculés, comme nous venons de le dire.

La résistance $r_a + r_g$ du moteur est égale à 3,7 ohms.

178. Essais au frein de Prony d'un moteur en série.

V.	D.	i.	e.	P.	p_c .	p .	p_u .	p_f .	T.	T_u .	T_f .	η_c .	η_f .
TOURS par minute.	VOLTS.	AMPÈRES.	VOLTS.	WATTS.	WATTS.	WATTS.	WATTS.	WATTS.	JOULES.	JOULES.	JOULES.	—	—
1230	402	9	368,3	3618	304	3314	1472	1842	25,72	11,43	14,29	0,91	0,46
950	399	12	354,6	4788	533	4225	3018	1937	42,77	30,33	12,44	0,89	0,63
680	400	22	318,6	8800	1791	7009	5888	1128	91,42	82,68	15,74	0,79	0,67
520	400	40	252	16000	5920	10080	8096	1984	185,10	148,67	36,43	0,63	0,51
390	401	53,5	203	21453	10653	10800	8317	2483	264,43	203,64	60,79	0,53	0,38
310	399	64,5	161,4	25735	15325	10410	7360	3050	320,06	226,71	93,45	0,40	0,29
250	400	71,5	135,5	28600	18912	9688	6256	3462	370,00	238,95	131,05	0,34	0,22
110	401	88	75,4	35288	28653	6635	2870	3765	575,97	249,09	326,88	0,19	0,08
0	400	108,5	0	43400	43400	0	0	0	»	»	»	0	0

179. Autre application. — Nous donnons encore les résultats des essais au frein de Prony d'un moteur pour tramway électrique excité en série employé avec une différence de potentiel constante aux bornes soit de 100 volts, soit de 50 volts.

Chacune des observations a été répétée 3 fois. On peut ainsi se rendre compte des variations qui se produisent pendant une mesure.

Nous avons porté dans le tableau qui suit exclusivement les résultats des observations, le tableau pouvant d'ailleurs être complété par le calcul, ainsi que nous l'avons indiqué précédemment (177).

La colonne portant en titre : *poids du frein* renferme les poids mis à l'extrémité du levier du frein auxquels on a ajouté la tare de ce frein lui-même (135). Le moment résistant utile T_u s'obtiendra en multipliant les chiffres de cette colonne par le bras de levier du frein que nous indiquons au bas du tableau.

TABLEAU.

180. Essai au frein de Prony d'un moteur en série pour tramway.

100 VOLTS AUX BORNES.				50 VOLTS AUX BORNES.			
V.	D.	i.	POIDS du frein en kilo- grammes.	V.	D.	i.	POIDS du frein en kilo- grammes.
—	—	—		—	—	—	
tours par minute.	Volts.	Ampères.		tours par minute.	Volts.	Ampères.	
112	103	81	32,92	92	50,5	40,5	7,92
110	100,5	80	"	94	51	41	"
113	100	80	"	"	"	"	"
122	100	69	24,92	146	52	28,5	3,92
124	100,5	70	"	148	51	28	"
120	99,5	70	"	"	"	"	"
138	99	50,5	18,92	194	50,5	21,5	2,92
144	103	60	"	190	50	21	"
140	100	60	"	"	"	"	"
168	101,5	50	13,92				
170	103	50	"				
162	99	50	"				
200	102	42	9,92				
206	104,5	42	"				
194	99	42	"				
248	97	34	5,92				
244	99	34	"				
246	101	35	"				

Longueur du bras de levier du frein : 1,65 mètre.
 Résistance de l'induit : 0,459 ohm } à chaud.
 Résistance de l'inducteur 0,188 ohm }

ÉTUDE D'UN MOTEUR EN SÉRIE FONCTIONNANT SOUS DIFFÉRENCE
DE POTENTIEL CONSTATE, AU MOYEN DE LA BALANCE DYNAMOMÉTRIQUE RAFFARD

181. Disposition des essais. — La disposition des essais est la même que précédemment (**173**) et on opère d'une manière identique, sauf que, avec la balance Raffard, l'augmentation de l'effort résistant se fait par l'accroissement du poids p appliqué sur la sangle de la poulie calée (**141**). Dans un autre modèle de balance dynamométrique, M. Raffard a du reste remplacé le poids p par un ressort dont la tension est réglée par un écrou. Voici, pour un petit moteur en série présentant pour la résistance de l'inducteur et de l'induit une somme égale à 1,185 ohm, le tableau des nombres observés, ou calculés comme nous l'avons indiqué (**177**).

TABLEAU.

182. Essais au frein Raffard d'un moteur en série fonctionnant sous différence de potentiel constante.

V.	D.	i.	e.	P.	p_c .	p .	p_u .	p_f .	T.	T_u .	T_f .	η_o .	η_i .
TOURS par minute.	VOLTS.	Ampères.	VOLTS.	WATTS.	WATTS.	WATTS.	WATTS.	WATTS.	JOULES.	JOULES.	JOULES.	—	—
900	100	10,0	88,2	1000	118,0	882,0	735,7	146,3	9,36	7,81	1,55	0,882	0,736
902	100	10,0	88,2	1000	118,0	882,0	736,6	145,4	9,34	7,81	1,53	0,882	0,736
875	100	10,5	87,6	1050	130,2	919,8	787,7	132,1	10,04	8,59	1,45	0,876	0,750
865	100	11,3	86,6	1130	151,4	978,6	848,6	130,0	10,80	9,37	1,43	0,866	0,752
863	100	11,3	86,6	1130	151,4	978,6	846,6	132,0	10,80	9,37	1,43	0,866	0,750
795	100,3	13,0	84,9	1304	200,3	1103,7	974,1	129,6	13,25	11,70	1,55	0,846	0,746
754	100	13,3	84,2	1330	210,1	1119,9	985,9	134,0	14,18	12,49	1,69	0,842	0,742
690	101	15,0	83,0	1515	270,0	1245,0	1128,1	116,9	17,23	15,61	1,62	0,822	0,745

183. REMARQUES. — Ainsi qu'on le voit sur le tableau précédent, le moteur n'a été étudié qu'au voisinage du rendement industriel maximum et pour des vitesses supérieures à celle correspondant au maximum de la puissance mécanique utile.

Le rendement industriel maximum de ce moteur atteint 0,75, tandis que le rendement d'un moteur précédent ne dépassait pas 0,68 (**178**). Il n'est pas sans intérêt de rechercher la cause de cette supériorité d'un moteur sur l'autre.

Le rendement industriel peut se mettre sous la forme

$$\eta_i = \frac{P - p_c - p_f}{P}.$$

La faiblesse de ce rendement tient donc à une exagération, soit de la puissance p_c absorbée par l'échauffement des conducteurs, soit de la puissance p_f absorbée par les effets parasites.

Or, pour le moteur étudié précédemment (**178**), on a respectivement

$$\begin{aligned} p_c &= 0,20 P, \\ p_f &= 0,12 P, \end{aligned}$$

dans les conditions du rendement maximum, tandis que nous trouvons, pour le moteur dont nous venons de nous occuper,

$$\begin{aligned} p_c &= 0,134 P, \\ p_f &= 0,115 P. \end{aligned}$$

On voit que dans les deux moteurs la puissance absorbée par les effets parasites est proportionnellement la même, tandis que la puissance absorbée par l'échauffement des conducteurs est bien plus grande pour le premier moteur. On doit, d'ailleurs, à priori, trouver un peu grande la valeur que nous avons donnée pour la résistance de l'induit et les inducteurs de ce moteur. Il est vrai que, si le rendement en est quelque peu diminué, cette grande résistance empêche le courant

d'atteindre des valeurs exagérées au démarrage. Ainsi le courant au démarrage n'atteint qu'une intensité 4 fois environ plus grande que celle correspondant au rendement maximum, tandis que, pour le second moteur étudié, la résistance de 1,185 ohm conduirait, sous une différence de potentiel de 100 volts, à un courant de démarrage égal à 84 ampères, c'est-à-dire environ 8 fois plus grand que celui correspondant au rendement maximum. Il faut ajouter que le second moteur, avec sa faible résistance, sera proportionnellement plus volumineux et plus pesant que le premier.

ÉTUDE D'UN MOTEUR EXCITÉ EN SÉRIE, AU MOYEN DE LA BALANCE DYNAMOMÉTRIQUE DE M. RAFFARD, L'INTENSITÉ DU COURANT ÉTANT MAINTENUE CONSTANTE

184. Disposition des essais. — Le moteur à essayer M est mis en relation avec une source électrique S, par l'intermédiaire d'un rhéostat R destiné à faire varier la différence de potentiel aux bornes du moteur (*fig. 20*). Un ampèremètre A, un voltmètre V en dérivation aux bornes et un interrupteur complètent l'installation électrique.

Un tachymètre, ou un compte-tours, permettra de mesurer la vitesse. Une balance de Raffard est reliée à l'arbre du moteur.

185. Manière d'opérer. — Trois observateurs sont utiles ici ; l'un d'eux observe le voltmètre et manœuvre le rhéostat R, le deuxième lit l'ampèremètre, le troisième lit la vitesse et manœuvre le frein.

On donne au poids p placé à l'extrémité de la sangle passant sur la poulie calée et au poids P placé à l'extrémité du fléau des valeurs telles que le moment résistant utile $(P-p)r$, r étant le rayon des poulies, soit faible (**141**).

Le circuit du moteur a été jusque-là maintenu ouvert et

toute la résistance du rhéostat R intercalée. La source électrique S est quelconque; la seule qualité requise est un fonctionnement régulier.

L'interrupteur étant fermé, on diminue la résistance du rhéostat R, jusqu'à ce que le moteur se mette en marche; on s'assure que la vitesse ne dépasse pas une limite qu'on s'est imposée à l'avance. Si le moteur prenait une vitesse trop grande lors de la fermeture du circuit, avec le rhéostat entier intercalé, il faudrait employer un rhéostat de résistance plus grande, ou diminuer la source S, ou bien encore commencer l'essai du moteur avec un moment résistant plus considérable, ce qui s'obtiendra en augmentant la différence $P - p$ des poids. La vitesse obtenue étant plus petite que la limite, augmenter ou diminuer le poids porté par le fléau, jusqu'à ce que ce dernier soit horizontal. L'appareil est alors réglé pour une série de mesures.

Lire sur le voltmètre la différence de potentiel D aux bornes du moteur, sur l'ampèremètre l'intensité i du courant passant dans le moteur, sur le tachymètre la vitesse V et noter les poids P et p .

Diminuer ou augmenter la résistance du rhéostat R afin d'augmenter ou de diminuer la différence de potentiel D; la vitesse du moteur augmente, ou diminue; mais, si l'on ne touche pas aux poids du frein, l'intensité i reste à peu près constante.

Lorsque le nouvel équilibre est établi, lire de nouveau D, i , V.

En diminuant progressivement la résistance du rhéostat, ou en l'augmentant, on a une série de mesures dans lesquelles l'intensité est sensiblement constante, la différence de potentiel et la vitesse augmentant ou diminuant toutes les deux. On s'arrête quand on arrive à une vitesse estimée dangereuse.

D'autres séries de mesures sont obtenues en donnant à la différence $P - p$ des poids du frein des valeurs plus grandes et en opérant comme précédemment.

Dans chaque série, l'intensité reste sensiblement cons-

tante, mais cette valeur constante varie d'une série à l'autre en même temps que le moment résistant appliqué au moteur.

Le moment résistant utile est calculé par la formule

$$T_u = (P - p)r,$$

r étant le rayon des poulies du frein.

Dans les freins de Raffard, on donne aux poulies des rayons tels que la circonférence soit égale à 1 mètre, ou 0,50 mètre.

Les autres grandeurs intéressant le moteur seront calculées comme il a été dit plus haut (177).

Voici le résultat des essais d'une perceuse par ce procédé.

Nous avons indiqué dans le tableau ci-après, à la colonne intitulée : *poids du frein*, la différence $P - p$ des poids sur la sangle de la poulie calée et sur le fléau de la balance. Nous donnons au bas du tableau les résistances des inducteurs et de l'induit et la circonférence de la poulie.

On peut voir sur ce tableau que l'intensité est très sensiblement maintenue constante.

TABLEAU.

186. Résultats des essais d'un électromoteur en série, fonctionnant à intensité constante.

V. — TOURS par minute.	D. — Volts.	<i>i</i> , — Ampères.	POIDS du frein en kilo- grammes.	V. — TOURS par minute.	D. — Volts.	<i>i</i> , — Ampères.	POIDS du frein en kilo- grammes.
496	18	6,9	1	528	34	15,1	5
1432	36	6,9	"	366	29	15	"
1196	29,5	7,2	"	858	45	15,1	"
1000	26	7	"	550	35	15	"
766	22	6,9	"	1162	54	15,1	"
504	17	6,9	"	1340	60	15	"
392	14,5	6,8	"	878	45	15,3	"
335	14	6,8	"	1312	59	15,3	"
				1064	51	15,3	"
402	23	11,5	3				
544	27	11,5	"	921	55	19,3	7
660	31	11,7	"	460	40	19	"
784	34,5	11,7	"	636	46	19	"
970	38,5	11,5	"	1063	62	19	"
1100	42	11,5	"	1318	71	19	"
1246	46	11,5	"				

Circonférence de la poulie du frein. . . 0,5 mètre.
 Résistance de l'induit du moteur. . . 0,487 ohm.
 Résistance de l'inducteur. 0,633 ohm.

*ÉTUDE D'UN MOTEUR EXCITÉ EN DÉRIVATION PAR LA MÉTHODE
DES MACHINES IDENTIQUES COUPLÉES MÉCANIQUEMENT*

187. Disposition des essais. — Nous choisissons des machines en dérivation pour appliquer la méthode que nous avons précédemment exposée (155). Nous avons vu, en effet, qu'en raison de la facilité qu'on a pour exciter séparément ces machines, ou tout au moins pour modifier à volonté le

courant d'excitation dérivé, les machines excitées en dérivation se prêtent mieux que les autres à la réalisation des conditions dans lesquelles l'application de la méthode est légitime (162).

La figure 21 représente schématiquement la disposition

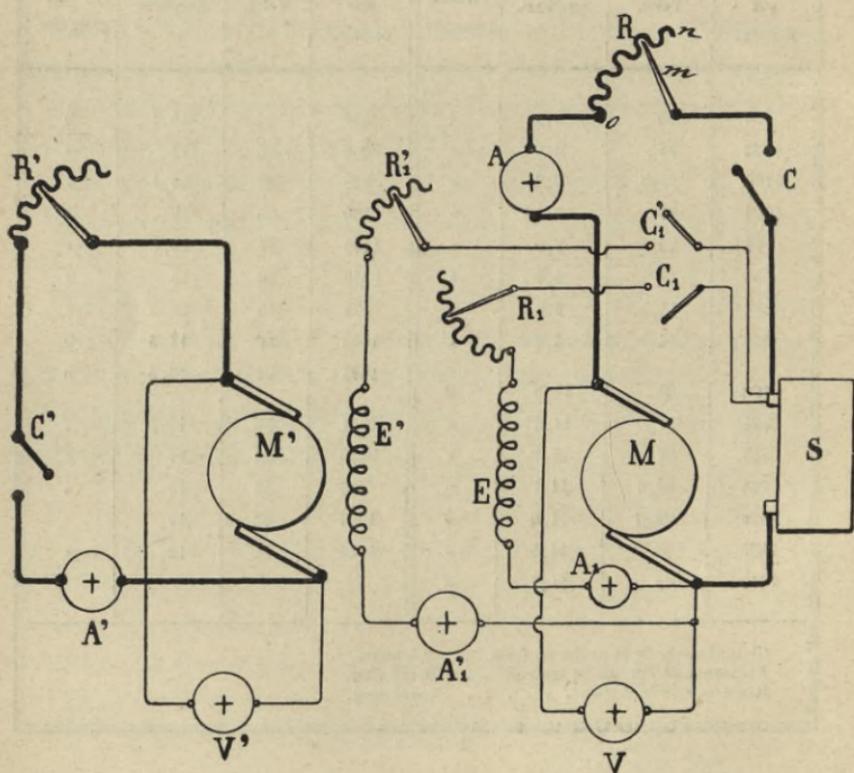


Fig. 21. — Méthode des machines identiques couplées mécaniquement.

des circuits. Les deux machines essayées M et M' ont leurs inducteurs E et E' excités séparément. A cet effet, la source électrique S est choisie autant que possible autorégulatrice de la différence de potentiel entre ses bornes. Deux dérives partant de ces dernières alimentent séparément les inducteurs des deux machines; des rhéostats R_1 et R'_1 sont d'ailleurs intercalés sur les circuits d'excitation afin de faire

varier celle-ci à volonté. Des ampèremètres A_1 et A'_1 mesurent le courant d'excitation.

Les arbres des deux induits sont reliés mécaniquement, de manière que leurs vitesses soient identiques.

L'induit M est relié électriquement à la source S , avec interposition sur le circuit d'un rhéostat R et d'un ampèremètre A . La machine M fonctionne donc comme moteur électrique et entraîne la machine M' qui fonctionne comme génératrice.

L'induit M' fait partie d'un circuit comprenant un rhéostat R' et un ampèremètre A' .

Des voltmètres V et V' sont établis en dérivation entre les balais des deux induits.

Enfin des interrupteurs C, C', C_1, C'_1 permettent de couper ou de fermer les circuits des induits et les circuits d'excitation.

188. Manière d'opérer. — Les interrupteurs étant tous ouverts à l'origine des essais, fermer les interrupteurs C_1 et C'_1 des circuits d'excitation et régler, au moyen des rhéostats R_1 et R'_1 , l'intensité d'excitation, en se guidant sur l'observation des ampèremètres A_1 et A'_1 , à une valeur voisine de celle qu'une expérience préalable ou le plan de construction a donnée comme normale. Ce réglage n'est d'ailleurs que provisoire ; on veut seulement ici se soustraire aux tâtonnements trop nombreux, ou aux avaries qui pourraient survenir, si l'on agissait sans précaution, par exemple en lançant dans les inducteurs un courant trop intense capable d'en échauffer le fil outre mesure.

Donner alors à la résistance du rhéostat R' placé sur le circuit de la génératrice M' une valeur moyenne et à la résistance du rhéostat R placé sur le circuit du moteur M sa plus grande valeur.

Fermer les interrupteurs C' , puis C . Ces interrupteurs peuvent d'ailleurs faire partie intégrante des rhéostats R' et R et être manœuvrés en même temps qu'eux.

Le moteur se met en marche entraînant la génératrice à la même vitesse. On peut alors, si on veut, diminuer la résistance du rhéostat R.

189. — Toutes ces opérations constituent la préparation des mesures. Pour procéder à celles-ci, on a égard aux observations suivantes :

1° La manœuvre du rhéostat R, en prenant pour guide la lecture du voltmètre V, permet de faire varier la différence de potentiel aux balais du moteur M ; la différence de potentiel augmente, la source électrique restant constante, quand on diminue la résistance du rhéostat en portant la manette m de n vers o . En diminuant cette résistance, on augmente la vitesse de rotation, toutes autres choses restant d'ailleurs dans leur état antérieur. Si l'on doit faire les essais sous différence de potentiel constante, on peut, par suite, au moyen du rhéostat R, réaliser cette condition malgré les variations de la source électrique. Toutefois, il sera plus commode, dans la pratique, d'employer une source autorégulatrice de la différence de potentiel, et de choisir cette source de manière que toute la résistance du rhéostat R étant supprimée on ait aux balais du moteur M la différence de potentiel pour laquelle on fait l'essai. On réalise aisément ce desideratum avec une machine électrique comme source en agissant sur sa vitesse de rotation, ou avec une batterie d'accumulateurs en prenant un nombre convenable d'éléments en tension. Cela établi, si la source est parfaitement autorégulatrice de la différence de potentiel, il n'y a plus à toucher au rhéostat R qui conserve une résistance nulle pendant tout le cours des essais. Si la source varie, on agit alors directement sur elle pour corriger ses variations. Quelle que soit la manœuvre choisie, un observateur spécial en est toujours chargé et le voltmètre V lui sert de guide.

2° La manœuvre du rhéostat R_1 commandant l'excitation du moteur M permet de donner au courant d'excitation telle valeur que l'on veut, valeur indiquée par l'ampèremètre A_1 .

Une augmentation dans le courant d'excitation, toutes choses égales d'ailleurs, entraîne une diminution de la vitesse de rotation (248). Si l'on veut conserver au courant d'excitation une valeur constante et si la source est exactement autorégulatrice de la différence de potentiel entre ses bornes, l'intensité d'excitation est réglée une fois pour toutes. Si la source a des variations, un réglage est nécessaire avant chaque mesure. Un opérateur est alors chargé de manœuvrer le rhéostat R_1 en observant l'ampèremètre A_1 .

3° On règle pareillement l'excitation de la génératrice M' au moyen du rhéostat R'_1 en se basant sur l'observation de l'ampèremètre A'_1 . De l'excitation des inducteurs de M' dépend la différence de potentiel aux balais de cette machine mesurée par le voltmètre V' . On peut, suivant les circonstances, ou bien maintenir pour M' un courant d'excitation égal à celui admis pour M , ou bien maintenir aux balais de M' la même différence de potentiel que celle établie par la source aux balais de M ; ou bien encore on règle l'excitation de la génératrice M' de manière que sa force électromotrice soit égale à celle du moteur M (163). L'observateur chargé du réglage de l'excitation de M peut aussi régler l'excitation de M' . Trois instruments, A_1 , A'_1 et V' , sont consultés par lui.

4° La manœuvre du rhéostat R' fait varier l'intensité du courant produit par la génératrice M' et, par suite, l'effort résistant utile demandé au moteur M . La variation de l'intensité de ce courant mesuré par l'ampèremètre A' entraîne une variation correspondante de l'intensité du courant passant dans le moteur M et mesuré par l'ampèremètre A . Un même observateur peut manœuvrer le rhéostat R' et observer les ampèremètres A' et A .

5° Un quatrième observateur note la vitesse de rotation commune au moteur et à la génératrice.

190. — Voici maintenant l'ordre dans lequel les divers réglages indiqués ci-dessus doivent s'opérer. Nous suppose-

rons, pour préciser, que l'essai se fasse à potentiel constant et que l'on veuille maintenir aux balais de la génératrice la même différence de potentiel qu'aux balais du moteur :

1° L'observateur chargé du rhéostat R' le manœuvre jusqu'à donner au courant produit par la génératrice une intensité voisine d'une de celles pour lesquelles on veut faire l'essai ; cette manœuvre effectuée, le rhéostat ne sera plus touché que pour un autre essai.

2° L'observateur du voltmètre V lit la différence de potentiel aux balais du moteur ; il agit sur le rhéostat R , ou donne des ordres à la source, s'il y a lieu, pour que cette différence de potentiel ait la valeur constante pour laquelle la série d'essais est effectuée. Ce réglage de la différence de potentiel aux balais doit d'ailleurs être pour ainsi dire continu jusqu'à la fin de l'essai.

3° On donne à l'excitation des inducteurs E du moteur M la valeur qu'on s'est proposée, valeur qui dépend d'ailleurs de la vitesse de rotation que l'on veut obtenir et qu'un essai préalable a permis de déterminer. Cette excitation sera maintenue constante pendant toute la durée des essais.

4° Il ne reste plus qu'à agir sur le rhéostat R'_1 commandant l'excitation des inducteurs E' de la génératrice M' , de façon que la différence de potentiel aux balais de cette génératrice ait, par exemple, la même valeur que celle maintenue constante aux balais du moteur.

5° A un signal donné par l'observateur du voltmètre V , les divers observateurs lisent simultanément :

Pour le moteur,

La différence de potentiel aux balais Δ ;

L'intensité du courant dans l'induit i_a ;

L'intensité du courant d'excitation i_d ;

Pour la génératrice,

Les grandeurs correspondantes Δ' , i'_a , i'_d ;

La vitesse commune de rotation V .

6° En modifiant la résistance du rhéostat R' de la généra-

trice, on recommence un autre essai, pour une nouvelle charge du moteur.

191. Calcul des éléments des machines au moyen des données des observations. — Voici les formules permettant de calculer les divers éléments des deux machines en fonction des données des observations énumérées ci-dessus. Nous désignerons par r_a et r_d la résistance de l'induit et des inducteurs de la machine employée comme moteur; par r'_a et r'_d les mêmes données pour la machine génératrice.

Force contre-électromotrice du moteur,

$$e = \Delta - i_a r_a.$$

Force électromotrice de la génératrice,

$$e' = \Delta' + i'_a r'_a.$$

Puissance électrique totale dépensée dans l'induit et les inducteurs du moteur,

$$P = \Delta i_a + r_d i_a^2.$$

Puissance électrique dépensée pour l'échauffement des conducteurs du moteur,

$$p_c = r_a i_a^2 + r_d i_a^2.$$

Puissance électrique absorbée par la rotation du moteur,

$$p = e i_a.$$

Puissance absorbée par les effets parasites supposés identiques dans le moteur ou la génératrice (162),

$$p_f = \frac{e i_a - e' i'_a}{2}.$$

Puissance mécanique utile développée par le moteur,

$$p_u = \frac{e i_a + e' i'_a}{2}.$$

Moment de rotation du moteur,

$$T = \frac{30p}{\pi V}.$$

Moment résistant parasite,

$$T_f = \frac{30p_f}{\pi V}.$$

Moment résistant utile,

$$T_u = \frac{30p_u}{\pi V}.$$

Rendement électrique du moteur,

$$\eta_e = \frac{p}{P}.$$

Rendement industriel du moteur,

$$\eta_i = \frac{p_u}{P}.$$

Puissance électrique totale développée par la génératrice,

$$P' = e' i'_a.$$

Puissance électrique absorbée par l'échauffement des conducteurs de la génératrice,

$$p'_c = r'_a i'^2_a.$$

Puissance électrique utile développée par la génératrice,

$$p'_u = \Delta' i'_a.$$

Rendement électrique de la génératrice,

$$\eta'_e = \frac{\Delta'}{e'}.$$

Rendement industriel de la génératrice. Il convient d'ajouter à la puissance mécanique p_u développée par le moteur, et

appliquée à cette génératrice, la puissance dépensée pour l'excitation de ses inducteurs ; on a alors, pour le rendement industriel,

$$\eta_i' = \frac{p_u'}{p_u + r_d' i_d'^2}$$

Le tableau suivant renferme les résultats des essais, exécutés suivant la méthode que nous venons d'exposer, sur deux machines de 60 chevaux, système Rechniewski. Nous avons porté les données directes des observations et quelques grandeurs calculées, comme nous venons de l'indiquer.

192. Température. — On a tenu compte, dans les calculs, de la température prise par les machines. Des observations faites à ce sujet ont donné les résultats suivants :

Température extérieure : 22° C.,

Température de l'induit à pleine charge : 55° C.,

Température de l'inducteur à pleine charge : 36° C.

La résistance de l'induit et de l'inducteur ayant été mesurée à la température ambiante, par exemple, on a calculé ces résistances pour le fonctionnement à pleine charge, et, par interpolation, pour les fonctionnements sous des charges inférieures.

TABLEAU.

193. Essais de deux machines Rehniewski de 60 chevaux par la méthode des machines accouplées mécaniquement.

M O T E U R.										G É N É R A T R I C E.								
V.	Δ .	i_a .	i_d .	e.	P.	P.	P_u .	P_f .	T_u .	η_i .	η_{ii} .	Δ' .	i_a' .	i_d' .	e'.	P'.	P_u' .	η_{ii}' .
Tours par minute.	Volts.	Ampères.	Ampères.	Volts.	Watts.	Watts.	Watts.	Watts.	Joules.	—	—	Volts.	Ampères.	Ampères.	Volts.	Watts.	Watts.	—
555	244	218	4,0	234	54200	51000	48300	2700	830	0,940	0,894	239	184	4,5	248	45600	44000	0,890
535	240	188	"	232	46100	43600	41000	2600	729	0,945	0,889	233	160	"	240	38400	37300	0,886
540	238	162	4,0	231	39500	37400	35050	2350	619	0,947	0,887	240	132	4,5	246	32790	31700	0,876
540	240	172	"	233	42300	40100	38100	2000	673	0,947	0,900	241	146	"	247	36100	35200	0,897
540	241	150	4,0	235	37100	35250	33000	2225	583	0,950	0,889	243	124	4,5	248	30800	30100	0,885
545	240	142	"	234	35100	33200	30450	2750	533	0,946	0,897	247	110	"	252	27700	27200	0,862
536	240	114	"	235	28300	26800	24450	2350	440	0,947	0,864	247	88.	"	251	22100	21700	0,849
505	240	75	"	237	19000	17800	16150	1650	305	0,936	0,850	247	58	"	250	14500	14300	0,839
505	240	66	4,0	237	16800	15640	13600	2020	257	0,930	0,809	240	48	4,5	242	11600	11500	0,782
505	239	48	"	237	12450	11380	9300	2075	175	0,914	0,747	240	30	"	241	7230	7200	0,692
505	239	34	"	238	9100	8090	5860	2220	111	0,889	0,644	241	15	4,5	242	3630	3620	0,590
505	239	15	"	238	4560	3570	1785	1785	33,7	0,782	0,391	240	0	4,5	240	0	0	0
505	239	10	4,0	239	3370	2390	605	1785	41,4	0,709	0,179	0	0	0	0	0	0	0

Résistance de l'induit : $r_a = 0,039$ ohm, à 22° C.

Résistance des inducteurs, y compris le rhéostat d'excitation : $r_d = 61$ ohms, à 36° C.

Résistance de l'induit :

$r_a' = 0,039$ ohm, à 22° C.

Résistance des inducteurs : $r_d' = 54,2$ ohms, à 36° C.

194. Remarques sur le tableau précédent. —

1° On peut vérifier sur le tableau précédent relatif aux essais d'un moteur en dérivation que les variations de la vitesse de rotation sont faibles malgré de grandes variations dans la charge (89). Celle-ci variant de 48300 watts, c'est-à-dire plus de 65 chevaux, à 605 watts, c'est-à-dire moins de 1 cheval, la vitesse n'éprouve guère que des variations de 10 p. 100 au maximum. Encore faut-il observer que ces variations de la vitesse doivent être attribuées principalement à ce que la différence de potentiel aux bornes du moteur n'a pu être maintenue rigoureusement constante.

2° Les dernières lignes du tableau comprennent les observations et les calculs relatifs au cas où la génératrice *étant excitée* à son circuit extérieur ouvert et à celui où cette génératrice tourne à vide *sans excitation*. Dans le premier cas, la puissance utile développée par le moteur sert à vaincre les frottements mécaniques de la génératrice augmentés des frottements dus à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans cette génératrice, frottements que nous avons supposés identiques pour le moteur. La puissance utile p_u du moteur est donc égale à p_r , et chacune de ces puissances est la moitié de p .

Dans le second cas, le moteur a seulement à vaincre les frottements mécaniques de la génératrice. Si on suppose, ce qui est rationnel, que les effets parasites du moteur sont les mêmes dans les deux cas, la puissance p absorbée par la rotation du moteur est alors égale à p_r donnée par l'observation précédente augmentée de la puissance absorbée par les frottements mécaniques de la génératrice à la vitesse observée. On peut donc déduire cette dernière puissance par l'opération $p - p_r$. Le résultat est d'ailleurs égal aussi à p_u . Nous avons précédemment (171) indiqué comment on peut ainsi séparer les frottements mécaniques des autres frottements.

Ainsi, dans le cas actuel, les frottements parasites de toutes espèces absorbant une puissance de 1785 watts, la part due aux frottements mécaniques est de 605 watts, les courants de Foucault et l'hystérésis absorbant 1180 watts.

§ 3. — Étude graphique des moteurs électriques.

195. Courbes caractéristiques. — Les tableaux que nous avons donnés précédemment des divers éléments d'un moteur électrique, tels qu'ils résultent des mesures, ou des calculs effectués sur ces mesures, permettent d'étudier les variations des diverses grandeurs en fonction de l'une d'elles. Mais on peut mettre plus clairement en évidence ces variations en construisant les courbes qui ont pour coordonnées les valeurs correspondantes de deux quelconques des grandeurs des tableaux. Ces courbes prennent le nom générique de *caractéristiques*. Il résulte de ce que nous avons dit, en divers endroits, du nombre des relations et des grandeurs intéressant un moteur électrique (58), que ces caractéristiques ne peuvent avoir de signification que si elles sont construites pour une valeur constante d'une des grandeurs. Ainsi, on aura la caractéristique donnant le moment de rotation en fonction de la vitesse, *pour une différence de potentiel constante aux bornes*. Les caractéristiques se rapportant aux éléments électriques du moteur s'appellent *caractéristiques électriques*; celles relatives aux grandeurs mécaniques sont les *caractéristiques mécaniques*. Il est évident que ces dernières sont de beaucoup les plus importantes puisqu'il s'agit, en définitive, d'applications mécaniques du moteur; les caractéristiques électriques peuvent cependant être utilisées pour résoudre certains problèmes de construction ou de transformation des moteurs.

I. — CARACTÉRISTIQUES D'UN MOTEUR EXCITÉ EN SÉRIE FONCTIONNANT SOUS DIFFÉRENCE DE POTENTIEL CONSTANTE

196. Caractéristiques électriques. — La figure 22 donne en $H e D$ la force contre-électromotrice en fonction de l'intensité pour le moteur excité en série, dont nous avons

donné les résultats d'essais au n° 178 et alimenté sous une différence de potentiel de 400 volts. Cette caractéristique est une droite. On voit que la force électromotrice augmente constamment à mesure que l'intensité du courant diminue (62). Nulle quand le moteur est immobilisé et que le courant atteint son maximum OH, la force électromotrice tend vers une valeur OD égale à la différence de potentiel maintenue aux bornes du moteur. La droite horizontale DCD représente les différences de potentiel en fonction de l'intensité.

Cette première caractéristique étant tracée, on peut y retrouver les divers éléments électriques du moteur.

Ainsi la différence CA entre la différence de potentiel aux bornes CB et la force électromotrice AB correspondant à une intensité OB étant le produit $i(r_a + r_g)$ de l'intensité du courant par la somme des résistances de l'induit et des inducteurs (56), cette dernière est représentée par la tangente de l'angle α que fait avec l'axe OB une droite OK joignant à l'origine le point K, tel que KB soit égal à CA.

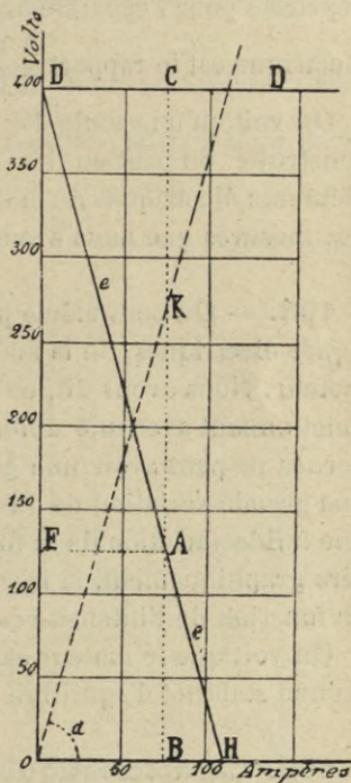


Fig. 22. — Caractéristiques électriques d'un électromoteur en série sous différence de potentiel constante.

197. — La puissance électrique totale P dépensée dans le moteur, qui est le produit $D i$, est représentée par la surface du rectangle D O B C; on voit qu'elle augmente constamment à mesure que l'intensité du courant augmente.

La puissance électrique p absorbée par la rotation et dont l'expression est ei est, de même, représentée par la surface du rectangle $F O B A$; elle passe par un maximum.

La surface $D F A C$ mesure la puissance électrique p_c dépensée pour l'échauffement des conducteurs. Le rendement électrique est le rapport $\frac{A B}{C B}$.

On voit qu'une seule des caractéristiques électriques étant construite, on peut en tirer les valeurs correspondantes des éléments électriques du moteur, sans avoir recours au tableau des mesures que nous avons donné, ou au calcul.

198. — On peut même préjuger, sur le vu des caractéristiques électriques, de la stabilité d'équilibre possible pour le moteur. Nous avons dit, en effet (**63**), qu'un moteur en série fonctionnant avec une différence de potentiel constante aux bornes ne peut avoir une grande stabilité d'équilibre que si une grande variation de l'intensité du courant correspond à une faible variation de la force contre-électromotrice, c'est-à-dire graphiquement, si la courbe des forces électromotrices en fonction de l'intensité est peu inclinée sur l'horizontale.

On voit que le moteur essayé ne pourra jamais présenter qu'une stabilité d'équilibre peu considérable.

199. Caractéristiques mécaniques. — Comme caractéristique mécanique, nous donnons, dans la figure 23, la courbe $O p_u$ des puissances mécaniques utiles développées par le moteur p_u en fonction de la vitesse de rotation V . On voit que la puissance p_u passe par un maximum.

Nous avons également tracé sur cette figure la courbe $M P$ donnant la puissance électrique totale P en fonction de la vitesse.

Le rendement industriel η_i correspondant à une vitesse $O B$ est le quotient $\frac{A B}{C B}$ de la puissance utile à la puissance totale dépensée. On peut donc sur cette caractéristique étudier la

variation de ce rendement. Nous avons d'ailleurs tracé en $O\eta_i$ la courbe du rendement industriel. On peut vérifier ainsi le sens des variations que nous avons indiquées dans l'étude théorique des moteurs en série fonctionnant sous différence de potentiel constante (60).

200. — Le moment résistant utile étant, à un facteur près, égal au quotient $\frac{p_u}{V}$, c'est-à-dire pour une valeur OB de la vi-

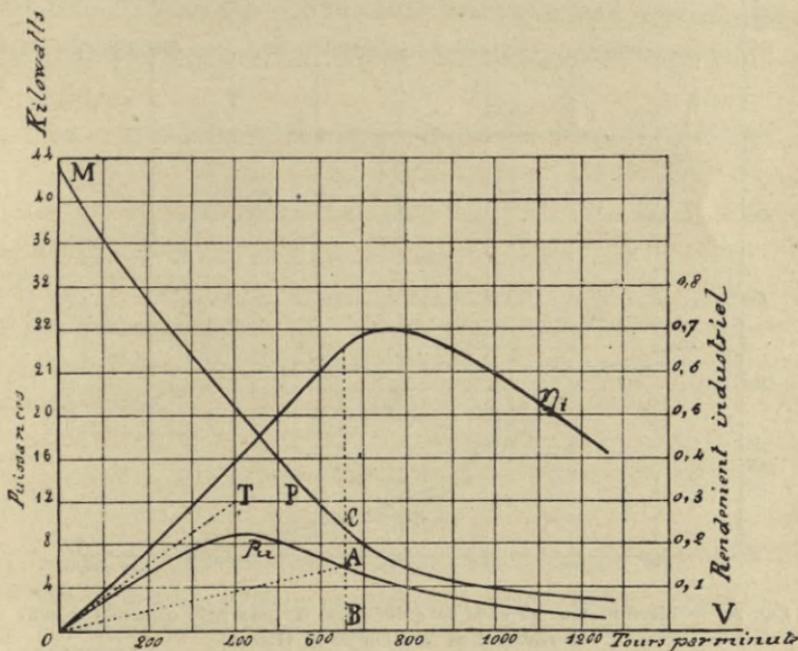


Fig. 23. — Électromoteur en série sous différence de potentiel constante ; puissances et rendement en fonction de la vitesse.

tesse, à $\frac{AB}{OB}$, est proportionnel à la tangente de l'angle α que fait avec l'axe OB la droite OA, joignant à l'origine le point A de la courbe des puissances correspondant à la vitesse choisie OB. On peut donc suivre aisément les variations de la vitesse en fonction de ce moment résistant utile. On voit ainsi que pour les grandes valeurs de la vitesse, c'est-à-dire

pour les plus faibles valeurs du moment résistant utile, de faibles variations de ce dernier entraînent de grandes variations de la vitesse et qu'il en est de même pour les faibles vitesses. Ce dernier résultat n'est pas en contradiction avec ce que nous avons dit ailleurs (63). Ici, les effets parasites sont assez importants ; le moment parasite décroît quand la vitesse augmente (178) assez rapidement pour neutraliser en partie la diminution assez rapide du moment moteur.

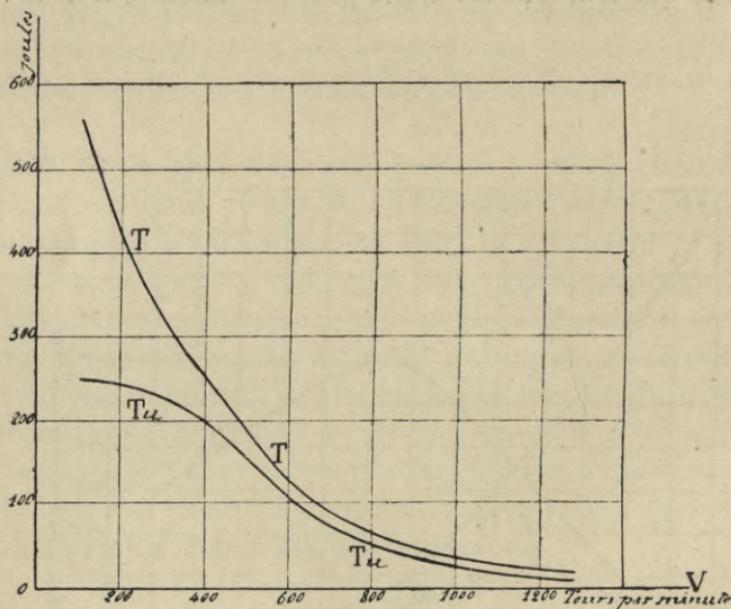


Fig. 24. — Électromoteur en série sous différence de potentiel ; moments moteur et résistant en fonction de la vitesse.

La stabilité d'équilibre du moteur est donc très faible pour les grandes et les petites valeurs du moment résistant utile ; elle est passable pour les valeurs moyennes.

201. — Nous donnons d'ailleurs, dans la figure 24, la courbe des moments T_u en fonction de la vitesse ; l'on peut y retrouver les observations qui précèdent. Nous avons également tracé sur cette figure 24 la courbe des moments de rotation T .

On voit sur la figure 23 que la valeur maximum du moment résistant utile pour laquelle le moteur se met en marche correspond à la valeur de l'angle que fait avec l'axe des vitesses la droite OT tangente à l'origine à la courbe des puissances utiles p_u . L'étude graphique des moteurs montre donc, comme le calcul et l'expérience, que pour un moment résistant utile supérieur à une certaine valeur, le moteur ne démarre pas.

202. Caractéristiques pour diverses valeurs de la différence de potentiel maintenue constante aux bornes. — Les essais du moteur pour tramway rela-

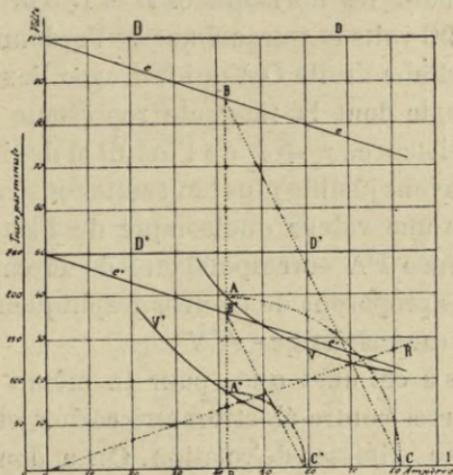


Fig. 25. — Électromoteur en série, sous différence de potentiel constante; vitesse en fonction de l'intensité pour deux valeurs de la différence de potentiel.

tés au n° 180 nous permettent de comparer les caractéristiques correspondant à diverses valeurs de la différence de potentiel maintenue constante aux bornes, ce moteur ayant été essayé pour 100 et pour 50 volts.

203. VITESSE EN FONCTION DE L'INTENSITÉ. — Dans la figure 25 sont représentées, en VA la courbe des vitesses en fonction de l'intensité du courant pour 100 volts maintenus aux bornes, et en V'A' la courbe des vitesses pour 50 volts.

Étant donnée l'une de ces caractéristiques, on peut aisément construire l'autre par points ; autrement dit, les essais d'un moteur ayant été faits pour une certaine différence de potentiel maintenue constante aux bornes, on peut en déduire, au moins en partie, les essais du moteur pour une autre valeur de la différence de potentiel.

Supposons connue la caractéristique des vitesses AV à 100 volts (*fig. 25*). Traçons sur la figure des droites e et e' dont les ordonnées représentent les valeurs des forces électromotrices correspondant aux diverses valeurs de l'intensité, pour 100 et pour 50 volts. Nous savons que ces droites e et e' s'obtiennent en traçant d'abord les horizontales D et D' correspondant à 100 volts et à 50 volts et retranchant de l'ordonnée constante les ordonnées d'une droite OR qui fait avec l'axe des intensités OI un angle dont la tangente représente en ohms la somme des résistances $r_a + r_g$ de l'induit et des inducteurs du moteur. Nous avons justifié plus haut cette construction (196).

Considérons une valeur quelconque de l'intensité OP et traçons l'ordonnée PA correspondante de la caractéristique AV ; nous nous proposons de trouver graphiquement l'ordonnée A'P de la caractéristique A'V'.

Remarquons à cet effet que, pour la même intensité de courant, les forces contre-électromotrices du moteur sont proportionnelles aux vitesses de rotation. On a donc, en considérant le fonctionnement du moteur à 100 et à 50 volts, pour la même intensité OP,

$$\frac{A'P}{AP} = \frac{B'P}{BP}.$$

Il suit de là que l'ordonnée A'P pourra se déterminer graphiquement de la manière suivante :

Reporter en PC l'ordonnée PA ; joindre B et C ; tracer B'C' parallèle à BC. La longueur PC' représente l'ordonnée cherchée qu'on reporte en PA'. On voit que pour la même intensité, ou le même moment moteur, les vitesses à 50 volts sont plus faibles qu'à 100 volts.

204. MOMENTS MOTEUR ET RÉSISTANT EN FONCTION DE L'INTENSITÉ. — Nous avons tracé dans la figure 26, en fonction de l'intensité du courant, les moments moteur T et résistant utile T_u du moteur fonctionnant sous 100 volts et les mêmes grandeurs T' et T'_u pour le moteur fonctionnant sous 50 volts. Deux remarques sont suggérées par l'observation de ces caractéristiques.

D'abord, on voit que la différence $T - T_u$, c'est-à-dire le

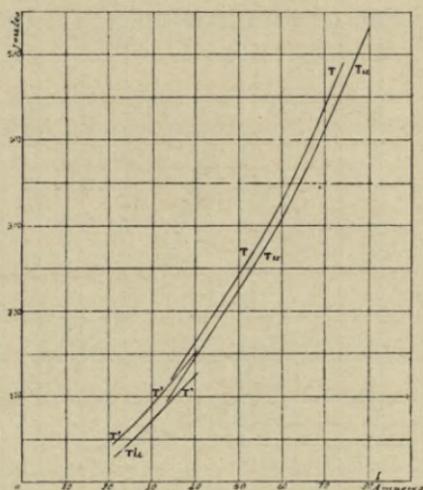


Fig. 26. — Électromoteur en série, sous différence de potentiel constante; moments en fonction de l'intensité, pour deux valeurs de la différence de potentiel.

moment résistant parasite, est sensiblement constant, ce qui ne peut avoir lieu que si ce moment parasite est dû presque entièrement aux frottements proprement dits.

En second lieu, on remarque que les courbes correspondant à 50 volts sont à peu près le prolongement des courbes correspondant à 100 volts. L'étude que nous avons faite des moteurs en série (60) montre, en effet, que le moment moteur ne dépend que du flux inducteur et du courant dans l'induit, c'est-à-dire, en somme, exclusivement de ce dernier. Comme la portion du moment parasite due aux courants de

Foucault est très réduite, le moment parasite prend également toujours la même valeur pour la même intensité du courant. Il en sera donc de même de la différence $T - T_f$, ou T_u .

205. MOMENTS MOTEUR ET RÉSISTANT EN FONCTION DE LA VITESSE. — Enfin, pour juger de la stabilité d'équilibre du moteur, nous avons tracé dans la figure 27, en fonction de la vitesse, les moments moteur T et résistant utile T_u pour 100

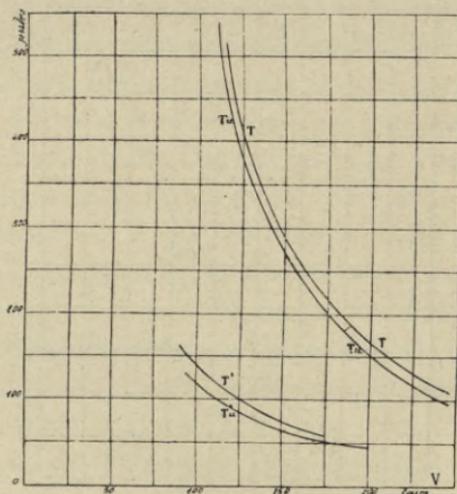


Fig. 27. — Électromoteur en série, sous différence de potentiel constante; moments en fonction de la vitesse, pour deux valeurs de la différence de potentiel.

volts, ainsi que les moments moteur T' et résistant utile T_u' pour 50 volts.

206. STABILITÉ D'ÉQUILIBRE. — On voit aisément sur la figure 27 que, pour une même vitesse, la courbe T_u étant moins inclinée sur l'horizontale que la courbe T_u' , la stabilité d'équilibre du moteur est moindre à 50 volts qu'à 100 volts.

Mais, si on compare les stabilités d'équilibre pour la même valeur du moment moteur, ou, ce qui revient au même, pour la même valeur de l'intensité du courant, on voit, en se

reportant à la figure 25, que les courbes des vitesses en fonction des intensités VA et $V'A'$ étant sensiblement parallèles, une même variation de l'intensité réclame dans les deux cas une même variation de vitesse. La stabilité d'équilibre est donc sensiblement la même, pour la même charge.

207. Caractéristiques pour une différence de potentiel constante en deux points séparés des bornes par une certaine résistance. — Nous supposons connues les caractéristiques du moteur fonctionnant

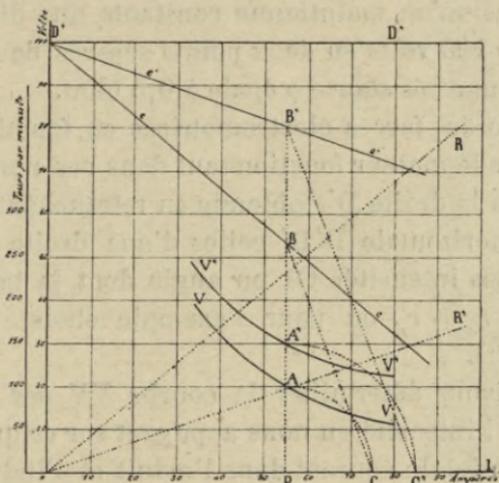


Fig. 28. — Électromoteur en série, sous différence de potentiel constante, avec résistance intercalaire; vitesse en fonction de l'intensité.

sous une différence de potentiel constante aux bornes et nous nous proposons de construire les caractéristiques du même moteur fonctionnant avec une différence de potentiel constante en deux points séparés des bornes par une résistance ρ . Nous supposons que la valeur de la différence de potentiel constante est la même dans les deux cas.

Soit $D'D'$ (fig. 28) une droite horizontale représentant la valeur constante de la différence de potentiel constante. La droite $D'e'$ représente les variations de la force électromotrice

du moteur en fonction de l'intensité du courant, lorsque la différence de potentiel est constante aux bornes. Cette droite peut être obtenue (196) en retranchant des ordonnées de $D'D'$, celles de la droite OR' qui fait avec l'axe OI un angle dont la tangente est égale à la résistance $r_a + r_g$ du moteur; dans l'exemple que nous avons choisi et qui est relatif au moteur pour tramway dont nous avons plus haut donné les essais (180), la différence de potentiel constante est 100 volts et la résistance $r_a + r_g$ est égale à 0,347 ohms. Soit $V'V'$ la courbe des vitesses obtenues en fonction de l'intensité du courant, pour 100 volts aux bornes.

Supposons qu'on maintienne constante une différence de potentiel de 100 volts en deux points séparés des bornes du moteur par une résistance ϱ égale à 0,5 ohm.

La courbe des forces électromotrices en fonction de l'intensité pour le moteur fonctionnant dans ces nouvelles conditions sera la droite $D'e$ obtenue en retranchant des ordonnées de l'horizontale $D'D'$ celles d'une droite OR faisant avec l'axe des intensités OI un angle dont la tangente soit égale à $\varrho + r_a + r_g$, ou pour l'exemple choisi 0,847 (71, équation 1^{bis}).

Nous pouvons déterminer la courbe VV des vitesses en fonction de l'intensité en nous appuyant sur ce que pour une même intensité du courant dans l'induit et l'inducteur d'un moteur, les forces électromotrices obtenues sont proportionnelles aux vitesses de rotation.

Pour une valeur quelconque OP de l'intensité, PA représentant la vitesse de rotation dans les nouvelles conditions que nous avons précisées plus haut, on a donc

$$\frac{PA}{PA'} = \frac{PB}{PB'}$$

On déduit de là la détermination graphique suivante du point A .

Reporter en PC' l'ordonnée PA' ; joindre $B'C'$; mener BC parallèlement à $B'C'$. La longueur PC représente la vitesse

cherchée ; il suffit alors de reporter PC en PA, pour trouver le point A de la courbe VV.

208. — Si on trace entièrement par points cette dernière courbe, on voit que la stabilité d'équilibre du moteur est moins grande avec 100 volts loin des bornes qu'avec 100

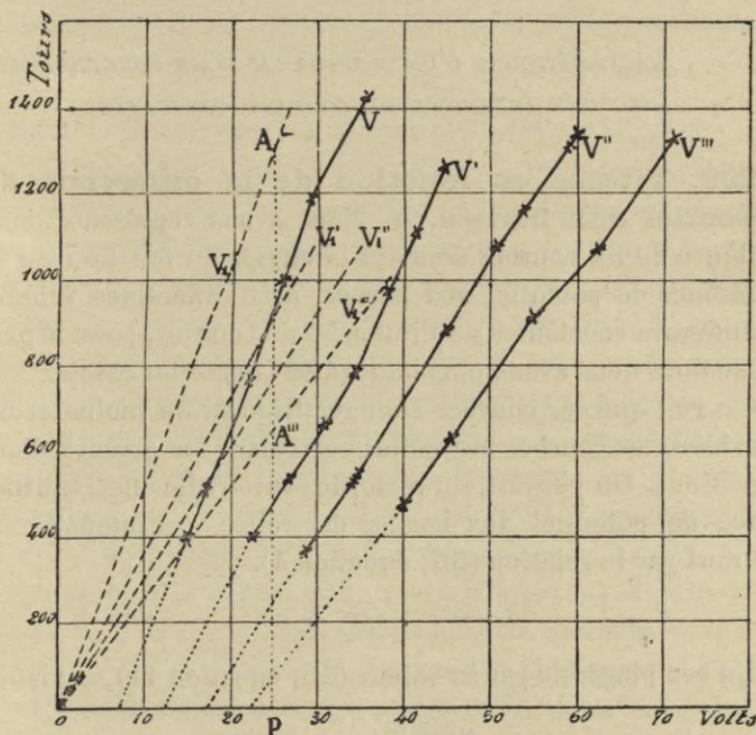


Fig. 29. — Électromoteur en série, intensité constante ; vitesse en fonction de la différence de potentiel.

volts aux bornes mêmes, puisque, la courbe VV étant plus inclinée sur l'horizontale que la courbe V'V', une variation plus grande de la vitesse est nécessaire pour obtenir une variation donnée de l'intensité du courant et du moment moteur.

Il est évident, d'ailleurs, que cette stabilité plus faible est due surtout à ce que la droite des forces électromotrices D'e

étant plus inclinée que la droite $D'e'$, l'intensité du courant varie moins vite avec la force électromotrice.

En somme, l'introduction de la résistance ρ revient à augmenter la résistance du moteur. On voit qu'un moteur en série de grande résistance n'aura, en général, qu'une faible stabilité.

II. — CARACTÉRISTIQUES D'UN MOTEUR EN SÉRIE FONCTIONNANT AVEC UNE INTENSITÉ DE COURANT CONSTANTE

209. Vitesse en fonction de la différence de potentiel aux bornes. — Nous avons représenté dans la figure 29 les courbes donnant la vitesse en fonction de la différence de potentiel aux bornes, avec différentes valeurs maintenues constantes de l'intensité du courant, pour la perceuse dont nous avons plus haut (186) relaté les essais.

On voit que ces courbes sont rectilignes, au moins si on considère les courbes moyennes corrigeant les erreurs d'observations. On pouvait, du reste, le prévoir. En effet, la différence de potentiel aux bornes est reliée à l'intensité du courant par la relation (56, équation 1).

$$D = e + i(r_a + r_g).$$

En remplaçant e par sa valeur (56, équation 11), il vient

$$D = \frac{nNV\Phi'}{30 \times 10^8} + i(r_a + r_g).$$

Pour une série de mesures où l'intensité du courant est maintenue constante, le flux Φ' est également constant (56, équation 12). L'équation reliant la différence de potentiel D à la vitesse est alors celle d'une droite.

Pour une vitesse nulle, on a

$$D = i(r_a + r_g).$$

Avec des intensités respectives de 6,9, de 11,5, de 15,2,

de 19 ampères, et une résistance $r_a + r_g$ égale à 1,12 ohm (186), on doit avoir des différences de potentiel de 7,7, de 12,8, de 17, de 21,3 volts.

On vérifie sur la figure 29 que les points de rencontre avec l'axe des différences de potentiel des courbes V, V', V'', V''' relatives à des intensités de 6,9, de 11,5, de 15,2, de 19 ampères, correspondent bien aux nombres de volts que nous venons d'indiquer. Les résultats de ces essais constituent donc une vérification de la théorie.

210. — En traçant les droites $OV_1, OV'_1, OV''_1, OV'''_1$, parallèles respectivement à V, V', V'', V''' , on a les caractéristiques représentant les variations de la vitesse en fonction des forces électromotrices du moteur, pour les différentes valeurs constantes essayées de l'intensité du courant. Si l'on passe d'une de ces caractéristiques V_1 à une autre V'_1 , on voit que pour une même valeur OP de la force électromotrice portée en abscisse, les valeurs correspondantes PA et PA''' de la vitesse ne sont pas inversement proportionnelles aux intensités 6,9 et 19 ampères pour lesquelles les caractéristiques OV_1 et OV'''_1 sont établies, quoique les formules 11 et 12 du n° 56 puissent le faire croire au premier aspect. Nous avons indiqué plus haut (63) que le coefficient A dans l'expression du flux n'est pas constant, mais diminue quand le flux, c'est-à-dire l'intensité du courant, augmente. La force électromotrice d'un moteur en série croît moins vite en réalité que l'intensité du courant, pour une même vitesse de rotation, ou, inversement, la vitesse décroît moins vite que l'intensité ne croît, pour une même force électromotrice.

III. — CARACTÉRISTIQUES D'UN MOTEUR EXCITÉ EN DÉRIVATION, LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL ÉTANT MAINTENUE CONSTANTE

211. Caractéristiques électriques. — Nous avons donné (193) un tableau d'essais pour deux machines excitées

en dérivation, dont l'une fonctionne comme moteur sous différence de potentiel constante. La figure 30 donne la force contre-électromotrice e du moteur en fonction de l'intensité du courant dans l'induit i_a . La différence de potentiel étant constante aux bornes et égale à 240 volts, on voit qu'on peut comme précédemment (196) obtenir la droite De des forces

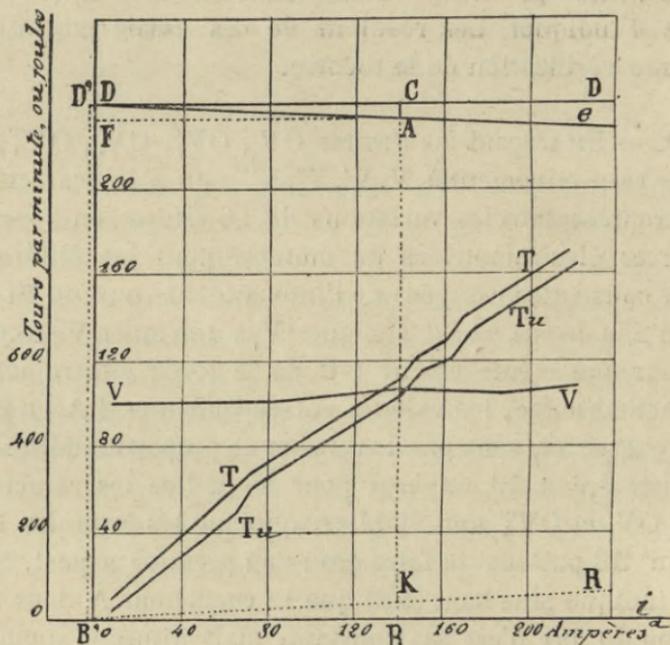


Fig. 30. — Électromoteur en dérivation, sous différence de potentiel constante ; caractéristiques électriques et mécaniques.

électromotrices en traçant la droite des différences de potentiel DD , parallèle à l'axe des abscisses et retranchant des ordonnées de cette droite celles d'une autre OR faisant avec l'axe des intensités Oi_a un angle α tel qu'on ait

$$\operatorname{tg} \alpha = r_a,$$

r_a étant la résistance de l'induit, que nous prendrons ici égale à 0,043 ohm pour tenir compte de l'élévation de température (192). Une ordonnée de cette droite OR , KB par exemple,

est, en effet, égale à $i_a r_a$; or, on sait qu'on a toujours (83, équation 2),

$$D - e = i_a r_a.$$

La différence des ordonnées CA est donc égale à KB.

212. — On peut retrouver sur la figure 30 la puissance électrique totale P absorbée par le moteur, la puissance p_e dépensée dans l'induit pour l'échauffement des conducteurs, ou dépensée dans l'inducteur et la puissance p absorbée par la rotation du moteur.

En effet, pour une valeur quelconque OB de l'intensité i_a dans l'induit, AB représentant la force contre-électromotrice et CB la différence de potentiel aux bornes, la puissance p absorbée par la rotation qui est égale à $e i_a$ (83, équation 6), est représentée par la surface du rectangle OFAB.

La puissance absorbée par l'échauffement des conducteurs de l'induit, égale à $r_a i_a^2$, peut aussi se mettre sous la forme $(D - e) i_a$, puisqu'on a (83)

$$D - e = i_a r_a.$$

Cette puissance $(D - e) i_a$ est donc représentée par la surface du rectangle FDCA. Si, d'ailleurs, on porte en OB' l'intensité du courant inducteur i_a , égale à 4 ampères pour le moteur dont nous nous occupons (193), la puissance constante $D i_a$ absorbée par l'échauffement des inducteurs est représentée par la surface du rectangle ODD'B'. La puissance p_e est donc la somme des rectangles FDCA et ODD'B'.

Enfin la surface B'D'CB représente la puissance totale P absorbée par le moteur, puisque cette puissance a pour valeur $D (i_a + i_a)$ et que BB' est égale à $i_a + i_a$.

Il suit de là que le rendement électrique du moteur est égal au rapport des surfaces des rectangles OFAB et B'D'CB.

213. — On peut donc sur cette seule caractéristique étu-

dier les variations des grandeurs dont nous venons d'indiquer la mesure et vérifier tout ce que nous avons dit déjà à ce sujet (84).

En particulier, on voit que le rendement électrique croît à mesure que l'intensité du courant dans l'induit, c'est-à-dire la charge du moteur, diminue, sans que cependant ce rendement puisse jamais devenir égal à 1. Cela tient à ce que, si le rectangle OFAB devient nul, quand l'intensité dans l'induit s'annule, le rectangle B'D'CB a pour valeur limite minimum B'D'DO.

214. Caractéristiques mécaniques. — Nous avons tracé sur la figure 30 les moments moteur T et résistant utile T_u en fonction de l'intensité du courant i_a . Le moment résistant parasite T_r est la différence $T - T_u$.

La courbe V représente les variations de la vitesse. Cette vitesse est sensiblement constante, comme notre étude théorique nous l'avait fait prévoir.

La légère diminution de vitesse avec l'intensité constatée aux essais (194) est due surtout à l'abaissement de la différence de potentiel aux bornes.

215. — Si on ne tenait pas compte de la réaction d'induit, la courbe T devrait être une droite, abstraction faite des variations de la différence de potentiel pendant les essais. En effet, le moment de rotation T est proportionnel au flux de force qui, sans la réaction d'induit, est constant pour une différence de potentiel aux bornes constante, et à l'intensité du courant dans l'induit (86). Cette droite devrait d'ailleurs passer par l'origine.

En tenant compte de la réaction d'induit, on voit que la courbe T doit présenter une légère concavité vers l'axe des intensités, puisque le flux n'est plus alors absolument constant, mais décroît légèrement quand l'intensité dans l'induit augmente.

Nous n'avons pas, à dessein, rectifié les courbes sur la

figure 30, afin de montrer le degré d'approximation possible dans les essais.

216. Modifications apportées dans les caractéristiques d'un moteur en dérivation par l'introduction en permanence d'une résistance dans son circuit. — Nous pouvons encore, comme nous l'avons fait

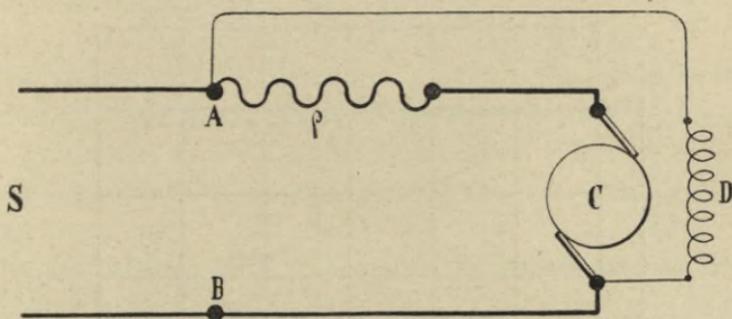


Fig. 31. — Électromoteur en dérivation ; résistance intercalée sur le circuit de l'induit seulement.

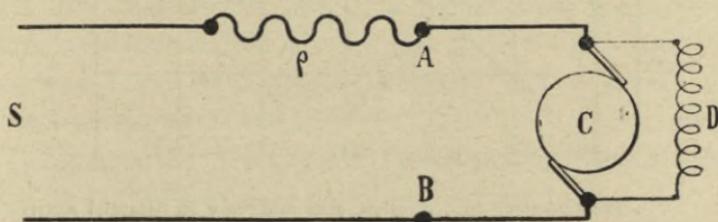


Fig. 32. — Électromoteur en dérivation ; résistance intercalée sur le circuit commun à l'induit et à l'inducteur.

pour un moteur en série (207), étudier les modifications dans les caractéristiques d'un moteur en dérivation qu'entraîne l'introduction d'une résistance dans le circuit. Nous distinguerons deux cas suivant que la résistance, supposée fixe d'ailleurs, est placée en ρ , sur le circuit de l'induit C seulement (fig. 31), ou que cette résistance est intercalée

(fig. 32) sur le conducteur commun amenant de la source S le courant à l'induit C et à l'inducteur D.

Si A et B sont les points où la différence de potentiel est maintenue constante par la source, on voit que le premier cas revient à supposer les bornes du moteur reportées en A et B, la résistance de l'induit étant supposée accrue de la résistance ρ .

Le second cas est celui étudié déjà (105), où la différence

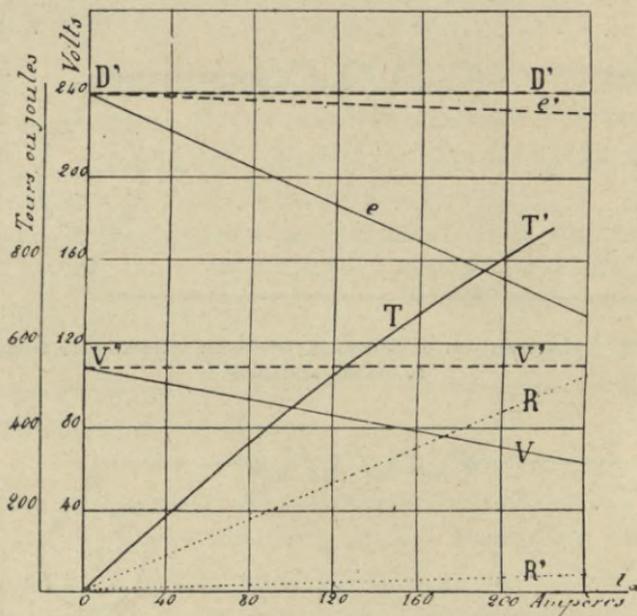


Fig. 33. — Électromoteur en dérivation, sous différence de potentiel constante, résistance intercalaire dans le circuit de l'induit seulement.

de potentiel est maintenue constante entre deux points séparés des bornes du moteur par une résistance ρ .

Nous prendrons comme exemple le moteur en dérivation dont nous avons déjà étudié les caractéristiques (211) et pour lequel nous avons relaté les essais (193).

217. — 1^{er} CAS. La résistance ρ est intercalée sur le circuit de l'induit seulement. Si, dans la figure 33, la droite

$D'D'$ représente la différence de potentiel constante aux points A et B, on obtiendra la droite $D'e$ des forces contre-électromotrices en fonction des intensités en retranchant des ordonnées de $D'D'$, celles d'une droite OR faisant avec l'axe des intensités Oi_a un angle dont la tangente soit égale à $r_a + \rho$. Dans l'exemple choisi, r_a est égal à 0,043 ohm et nous supposons qu'on donne à ρ la valeur 0,4 ohm.

On a en effet

$$e = D' - i_a (r_a + \rho).$$

Si on suppose la résistance ρ supprimée, on obtient la droite $D'e'$ des forces contre-électromotrices en retranchant des ordonnées de $D'D'$ celles d'une droite OR' , faisant avec l'axe des intensités un angle dont la tangente soit égale à r_a (211).

Si maintenant $V'V'$ représente la vitesse sensiblement constante quand aucune résistance intercalaire n'est introduite dans le circuit de l'induit, la courbe $V'V$ des vitesses obtenues avec une résistance intercalaire de 0,4 ohm se construira aisément par points, si l'on considère que l'excitation des inducteurs restant la même dans les deux cas, pour une même valeur du courant dans l'induit, les forces électromotrices sont proportionnelles aux vitesses. Nous avons à plusieurs reprises indiqué cette construction (203 et 207). La courbe $V'V$ est ici sensiblement une droite, à cause de la faiblesse de la résistance de l'induit.

La courbe T des moments de rotation reste la même dans les deux conditions (215).

On voit que la vitesse V obtenue avec la résistance intercalaire ρ est assez variable avec l'intensité du courant pour que la stabilité d'équilibre soit beaucoup moindre que lorsque la résistance ρ est supprimée.

218. — 2^e CAS. La résistance ρ est intercalée avant le branchement du courant dans l'induit et dans l'inducteur. Entre la différence de potentiel D' constante aux points A

et B (*fig. 32*) et la différence de potentiel D entre les bornes du moteur, où sont fixées les extrémités du circuit dérivé inducteur, existe la relation (105) :

$$D = D' - i \varrho$$

avec

$$i = i_a + i_d.$$

On en tire

$$D = D' - i_a \varrho - i_d \varrho.$$

Comme on a d'ailleurs (83, équation 3) :

$$i_d = \frac{D}{r_d},$$

il vient

$$D = (D' - i_a \varrho) \frac{r_d}{r_d + \varrho}.$$

Si donc $D' D'$ représente la différence de potentiel constante aux points A et B (*fig. 34*), l'intensité i_a dans l'induit étant portée en abscisses, la grandeur $D' - i_a \varrho$ s'obtiendra pour chaque valeur de l'intensité i_a en retranchant des ordonnées de $D' D'$ celles d'une droite $O \varrho$ faisant avec l'axe des intensités $O i_a$ un angle dont la tangente soit égale à ϱ . Soit $D' D_1$ la droite représentative des valeurs $D' - i_a \varrho$. Il suffira ensuite de réduire les ordonnées de cette droite dans le rapport $\frac{r_d}{r_d + \varrho}$ pour obtenir les diverses valeurs de la différence de potentiel D aux bornes, en fonction de l'intensité dans l'induit i_a . Dans l'exemple choisi on a

$$r_a = 0,043 \text{ ohm,}$$

$$r_d = 61 \text{ ohms,}$$

$$\varrho = 0,4 \text{ ohm.}$$

La droite $D' D$ se confond ici sensiblement avec $D' D_1$. On voit que la différence de potentiel aux bornes n'est plus constante, mais diminue notablement quand l'intensité, ou la charge du moteur, augmente.

La force électromotrice e du moteur étant toujours

$$e = D - i_a r_a,$$

on obtiendra la droite $D'e$ représentant les valeurs de cette force électromotrice en retranchant des ordonnées de la droite $D'D$, celles de la droite $O r_a$ faisant avec l'axe $o i_a$ un angle dont la tangente soit r_a .

D'ailleurs, on obtiendrait, comme précédemment, la droite

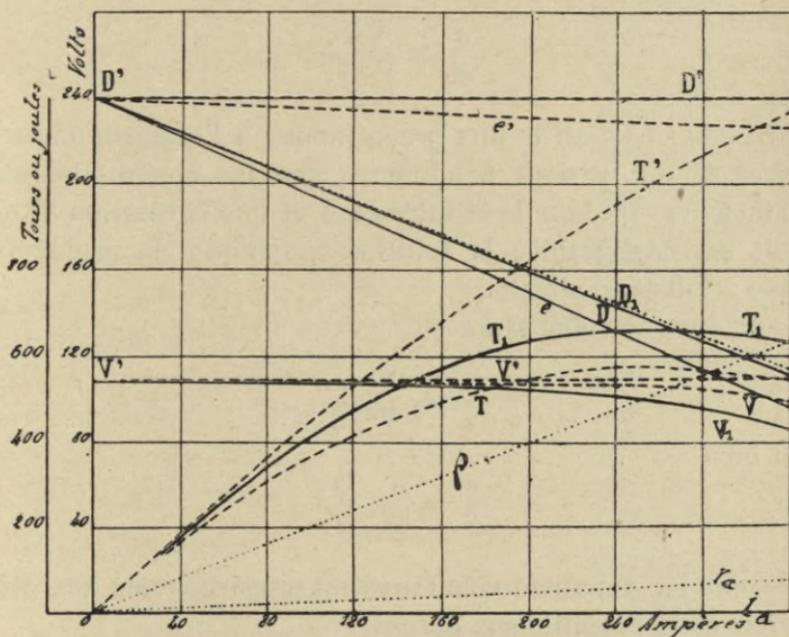


Fig. 34. — Électromoteur en dérivation, sous différence de potentiel constante, résistance intercalée dans le circuit commun à l'induit et à l'inducteur.

$D'e'$ des forces électromotrices, dans l'hypothèse où ρ est supprimée, en retranchant des ordonnées de $D'D'$ celles de la droite $O r_a$.

219. — Si $V'V'$ représente la valeur sensiblement constante de la vitesse lorsque ρ est supprimée, nous pouvons encore nous proposer de déterminer la courbe des vitesses

dans le cas qui nous occupe où la résistance ρ existe. Cette fois cependant, le problème est plus complexe, parce que l'excitation des inducteurs n'est pas constante, ni identique dans les deux conditions à comparer.

En désignant par V la vitesse obtenue avec la résistance intercalaire ρ , par V' la vitesse lorsque la résistance ρ est supprimée, par e et Φ la force électromotrice et le flux inducteur dans la première condition, par e' et Φ' les mêmes grandeurs dans la seconde condition, on a

$$\frac{e}{e'} = \frac{V\Phi}{V'\Phi'}$$

Si l'on supposait le flux proportionnel à l'intensité inductrice, ce qui revient à admettre que les électro-aimants inducteurs sont loin de la saturation et que la réaction d'induit est négligeable, la solution graphique du problème posé serait assez simple.

On aurait en effet alors

$$\frac{e}{e'} = \frac{V}{V'} \cdot \frac{i_d}{i_d'}$$

ou bien

$$\frac{e}{e'} = \frac{V}{V'} \cdot \frac{D}{D'}$$

puisque les courants inducteurs sont proportionnels aux différences de potentiel aux bornes.

On en tirerait

$$V = V' \cdot \frac{e}{e'} \cdot \frac{D'}{D}$$

On déterminerait alors la courbe des vitesses obtenues avec la résistance intercalaire ρ en réduisant les ordonnées de la droite $V'V'$ dans le rapport $\frac{e}{e'}$, puis dans le rapport $\frac{D'}{D}$. On trouverait ainsi la courbe $V'V$; cette courbe se con-

fond presque avec la ligne $V'V'$ pour les faibles valeurs de l'intensité, la vitesse V ne commence à être différente de V' que pour les grandes valeurs de i_a .

Mais le rapport des flux inducteurs n'est pas égal au rapport des courants, comme nous venons de le supposer. En effet, le flux Φ' qui devrait être constant puisque D' et i'_a sont constants, décroît quand l'intensité i_a augmente à cause de la réaction d'induit assez importante pour le moteur actuel, puisque l'autorégulation en est presque parfaite dans les conditions normales; d'autre part, le flux Φ diminue avec i_a ou D , mais moins vite qu'eux, et de plus il est diminué par la réaction d'induit d'autant plus que i_a est plus grand. Sans faire une étude plus complète de ces influences successives, on peut admettre que le rapport des flux doit être sensiblement plus faible que le rapport des courants inducteurs ou des différences de potentiel, de sorte que les vitesses V_1 réellement obtenues doivent être plus faibles pour la même intensité que les vitesses V déterminées comme nous l'avons indiqué plus haut; la courbe des vitesses réelles serait donc de la forme $V'V_1$.

220. — Si maintenant on désigne par T' le moment moteur dans l'hypothèse où la résistance ρ est supprimée et où par conséquent la différence de potentiel est maintenue constante aux bornes, puisque le moment moteur est proportionnel au produit du flux par l'intensité dans l'induit, T désignant le moment moteur lorsque la résistance ρ est intercalée, on aura pour la même intensité dans l'induit

$$\frac{T}{T'} = \frac{\Phi}{\Phi'}$$

En supposant encore les flux proportionnels aux courants inducteurs, on aurait

$$T = T' \cdot \frac{D}{D'}$$

On obtiendrait alors la courbe OT des moments moteurs, en réduisant les ordonnées de OT' dans le rapport $\frac{D}{D'}$.

Mais, comme nous l'avons indiqué plus haut, Φ' diminue quand l'intensité i_a augmente; d'autre part Φ diminue avec D moins vite qu'elle, mais il est aussi diminué par la réaction d'induit qui augmente avec i_a . Il en résulte que le rapport $\frac{\Phi}{\Phi'}$ est plus grand que le rapport $\frac{D}{D'}$; la véritable courbe des moments moteurs sera donc OT₁, dont les ordonnées sont plus grandes que celles de OT.

On voit d'ailleurs que la courbe OT₁ aussi bien d'ailleurs que la courbe OT tendent à passer par un maximum. Nous avons déjà vu, en effet (112), que lorsqu'on introduit une résistance ρ entre les bornes du moteur et les points où la différence de potentiel est maintenue constante, le moment moteur passe par un maximum, quand la résistance ρ est suffisamment grande.

221. — Nous pouvons maintenant comparer la stabilité d'équilibre obtenue, lorsque la résistance ρ est dans le circuit, avec celle que l'on a lorsque ρ est supprimée. La comparaison des courbes V' et V₁ montre d'abord que, pour le même courant dans l'induit, les vitesses V' et V₁ sont approximativement identiques, au moins pour les valeurs moyennes de i_a . Il n'en faut pas conclure cependant que la vitesse n'est jamais affectée par l'introduction de la résistance ρ , *la charge du moteur restant constante*. En effet, il est bien vrai que pour la même excitation des inducteurs, le courant i_a mesure approximativement le moment moteur ou le moment résistant utile, abstraction faite du moment parasite. Mais ici l'excitation des inducteurs n'est pas la même dans les deux inducteurs à comparer. Il faut mettre en parallèle les vitesses V' et V₁, non pas pour la même intensité, mais pour la même valeur du moment moteur. On voit alors aisément sur la figure 34 que dans le cas actuel, où la résistance de l'induit

est faible et où, par suite, la vitesse V' est sensiblement constante, pour les valeurs moyennes du moment moteur, V' et V_1 ont approximativement la même valeur, pour des valeurs égales de T' et T_1 (93). Mais cela n'aurait pas lieu pour un moteur en dérivation quelconque qui ne donnerait pas une vitesse constante V' sous une différence de potentiel aux bornes constante, ainsi qu'il est aisé de s'en rendre compte en supposant V' décroissant quand l'intensité augmente.

On verrait pareillement que si, pour l'exemple choisi, la stabilité d'équilibre est sensiblement la même, que la résistance ρ soit ou non dans le circuit, la stabilité d'équilibre serait beaucoup moindre avec la résistance intercalaire ρ , si la vitesse V' , au lieu d'être constante, décroissait notablement lorsque l'intensité i_a augmente.

CHAPITRE V

MOYENS DE GOUVERNER LES ÉLECTROMOTEURS

222. Généralités. — Gouverner un moteur électrique, c'est le rendre capable de s'adapter à toutes les exigences des applications auquel il est destiné.

Souvent, la vitesse de rotation des appareils entraînés par l'électromoteur devra être constante, malgré la variation des efforts résistants qui y seront appliqués. Il en devra être ainsi dans les ateliers, où les diverses machines-outils sont actionnées par des moteurs électriques. C'est encore une nécessité dans le cas des monte-charges et des cabestans électriques. Lorsqu'il s'agit du pointage électrique des canons ou des tourelles qui les portent, il est au moins avantageux de pouvoir compter sur une vitesse sensiblement constante, quels que soient les efforts résistants ; car, ces derniers dépendant de la position particulière de ces canons ou tourelles, varieront presque certainement et d'une manière indépendante de la volonté de l'opérateur.

Il est bon, toujours, et souvent nécessaire, que la valeur constante de la vitesse puisse être modifiée volontairement, suivant les circonstances. On conçoit, en effet, que les outils d'un atelier, quoique fonctionnant à la même vitesse pendant le cours d'un même ouvrage, doivent pouvoir fonctionner à des vitesses différentes suivant l'ouvrage particulier qu'ils effectuent.

Le pointage des canons se divise généralement en plusieurs périodes ; pendant les premières, on dégrossit le pointage, la vitesse peut être assez grande ; quand la ligne de mire est sur le point d'atteindre l'objet à viser, la vitesse doit être réduite pour faciliter l'achèvement du pointage.

Dans chaque période, la vitesse doit être constante, malgré la variation des efforts résistants, mais la vitesse doit pouvoir être modifiée volontairement d'une période à l'autre.

Le démarrage d'un électromoteur doit être facile et sans danger pour les conducteurs, ou pour le moteur.

Si la nature des applications exige des inversions de marche du moteur, ces inversions doivent pouvoir s'effectuer rapidement.

Enfin, il est quelquefois nécessaire, par exemple, dans le cas du pointage des canons, que l'appareil mû par le moteur, ou le moteur lui-même, puisse être arrêté instantanément.

Nous allons successivement examiner les moyens employés pour réaliser ces divers desiderata avec les électromoteurs excités en série ou en dérivation, fonctionnant sous différence de potentiel constante.

*MOTEURS EXCITÉS EN SÉRIE FONCTIONNANT SOUS DIFFÉRENCE
DE POTENTIEL CONSTANCE*

223. Maintien d'une vitesse constante, malgré les variations des efforts résistants. — Nous avons vu (65) que si la différence de potentiel est maintenue rigoureusement constante aux bornes d'un moteur excité en série, la vitesse est essentiellement variable avec l'effort résistant et que cette vitesse peut même prendre des valeurs dangereuses lorsque l'effort résistant devient très faible.

Si la différence de potentiel n'est pas maintenue constante entre les bornes elles-mêmes, mais entre deux points séparés des bornes par une certaine résistance fixe, la variation de la vitesse est encore plus accusée (74).

On ne pourra donc obtenir une vitesse constante avec un moteur en série, ou, plus exactement, on ne pourra corriger les variations de vitesse entraînées par les variations de l'effort résistant qu'en faisant varier la différence de poten-

tiel d'une façon judicieuse. Celle ci devra diminuer en même temps que l'effort résistant, puisqu'une réduction de ce dernier entraîne une augmentation de la vitesse, pour une valeur constante de la différence de potentiel.

On y parviendra, par exemple, en introduisant dans le circuit du moteur non pas une résistance constante, mais une résistance croissante, à mesure que l'effort résistant diminue.

224. — Il est facile de se rendre compte de l'effet produit par cette manœuvre.

L'équilibre étant établi, si l'effort résistant diminue, la vitesse tend à augmenter, parce que le moment moteur est alors plus grand que le moment résistant, jusqu'à ce que, par suite de cette augmentation de vitesse, l'intensité du courant ait été suffisamment réduite, ainsi que le moment moteur, qui en dépend. Mais si, à mesure que le moment résistant diminue, on introduit dans le circuit une résistance croissante, l'intensité du courant diminue et avec lui le moment moteur et la vitesse n'augmente plus autant qu'elle l'eût fait. On peut ainsi empêcher toute accélération du moteur.

On peut même, en introduisant une résistance suffisante, obtenir une diminution de la vitesse.

A mesure que le courant est ainsi réduit, le flux inducteur est lui-même diminué, de sorte que la force électromotrice décroît et que sa variation tend à s'opposer à la diminution qu'on veut provoquer dans le courant. Il est évident, dès lors, que ce réglage de la vitesse est plus facile, lorsque la force électromotrice est sensiblement constante ou croît quand l'intensité diminue, ce qui est le cas pour des inducteurs saturés.

225. — Une manœuvre analogue permet d'obtenir, pour le même moment résistant opposé au moteur, différentes valeurs de la vitesse, c'est-à-dire des régimes de marche différents.

226. — Il est clair que les corrections ainsi apportées à la vitesse par l'introduction de résistances variables, devront être moins importantes, si la source, au lieu de maintenir une différence de potentiel constante, est de telle nature que, sans rien changer aux résistances intercalaires, la différence de potentiel aux bornes du moteur diminue quand l'effort résistant, ou l'intensité du courant diminue lui-même. Cette remarque est applicable à tous les moteurs, quelle que soit leur excitation.

227. Démarrage. — Le démarrage d'un moteur en série exigera toujours la mise en circuit préalable d'une résistance suffisante pour réduire le courant à une valeur qui ne soit pas dangereuse. Cette résistance sera ensuite réduite, si la vitesse obtenue n'est pas jugée suffisante; on la diminuera encore, par la suite, ou on l'augmentera, comme nous l'avons dit plus haut, s'il est nécessaire, pour maintenir la vitesse constante, malgré les variations de l'effort résistant, ou même pour faire à l'occasion varier la vitesse correspondant à un même effort résistant.

228. Inversion du sens de la rotation. — Pour changer le sens de la rotation d'un moteur en série, il faut changer le sens du courant dans l'induit seulement, ou dans les inducteurs seulement (55).

D'autre part, les balais calés *en arrière* du mouvement primitif seront calés *en avant* du mouvement inverse et, par conséquent, donneront des étincelles nombreuses et fortes; d'ailleurs, si les balais étaient primitivement placés de manière que l'induit en tournant *tire* sur eux, celui-ci, après l'inversion, tend à les *rebrousser*, lorsqu'ils sont composés de fils ou lames flexibles. Il faut donc, à moins de supprimer le décalage des balais, et d'employer des balais qui ne puissent se rebrousser, modifier convenablement la position de ces derniers en même temps qu'on intervertit le courant dans l'induit, par exemple. Nous allons examiner successivement

le système de changement de marche avec manœuvre des balais et le système de changement de marche sans toucher aux balais.

229. Changement de marche avec manœuvre des balais. — Les dispositifs nombreux se ramènent à celui que nous donnons ici schématiquement. Si nous représentons (*fig. 35*) par des traits pleins, la position des balais

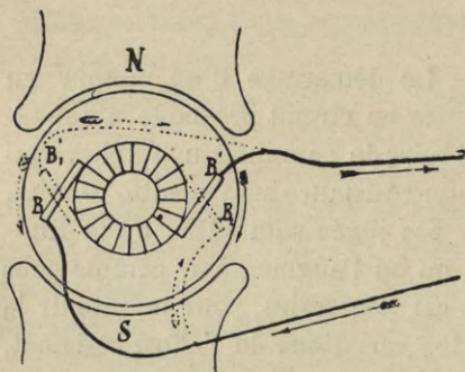


Fig. 35. — Inversion du courant dans l'induit par la manœuvre des balais.

B et B', C étant le collecteur, quand l'induit du moteur tourne dans le sens de la flèche pleine, avec un courant également indiqué par une flèche pleine, on voit qu'il faudra placer les balais dans la position pointillée, si on veut changer le sens de la rotation, le balai B venant en B_1 et B' en B'_1 .

On inverse ainsi, en effet, le courant dans l'induit en même temps que les balais restent calés dans le sens convenable et ne sont pas rebroussés.

230. — Pour faciliter cette manœuvre des balais, on en emploie deux paires qui appuient à tour de rôle sur le collecteur.

La figure 36 représente un inverseur de marche ainsi établi. Les deux balais B et B_1 qui doivent se remplacer sont fixés à un porte-balais commun qui peut tourner autour d'un axe et communique avec l'un des conducteurs amenant le courant. Il en est de même des deux autres balais B' et B'_1 . Un levier L permet, par l'intermédiaire d'une lame à ressort R et de galets G, de faire appuyer sur le collecteur soit les balais B et B', soit les balais B_1 et B'_1 .

231. Changement de marche sans toucher aux balais. — La position des balais n'a plus à être modifiée, lorsque le calage des balais a été rendu nul par une construction appropriée du moteur et qu'en outre des balais en charbon, par exemple, étant substitués aux balais ordinaires en fils ou lames de cuivre, leur rebroussement n'est plus à

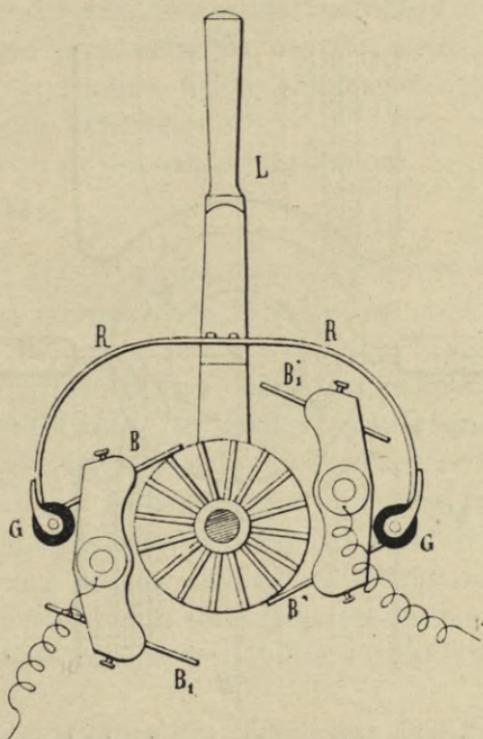


Fig. 36. — Inversion de marche, avec manœuvre des balais.

craindre. Les points de contact des balais restent alors constamment dans le plan de calage théorique, c'est-à-dire dans le plan normal à la ligne des pôles (16). L'inversion du sens de la rotation se fait alors simplement en changeant le sens du courant dans l'induit.

Les balais en charbon sont constitués par des dés de charbon de cornue, ou de charbon artificiel analogue au charbon

pour arc voltaïque, fixés à l'extrémité de porte-balais en laiton ou en bronze.

L'emploi des balais en charbon, outre qu'il permet l'immobilité des balais lors des changements de marche, diminue aussi l'importance des étincelles au collecteur, et ne provoque qu'une usure très faible de ce dernier.

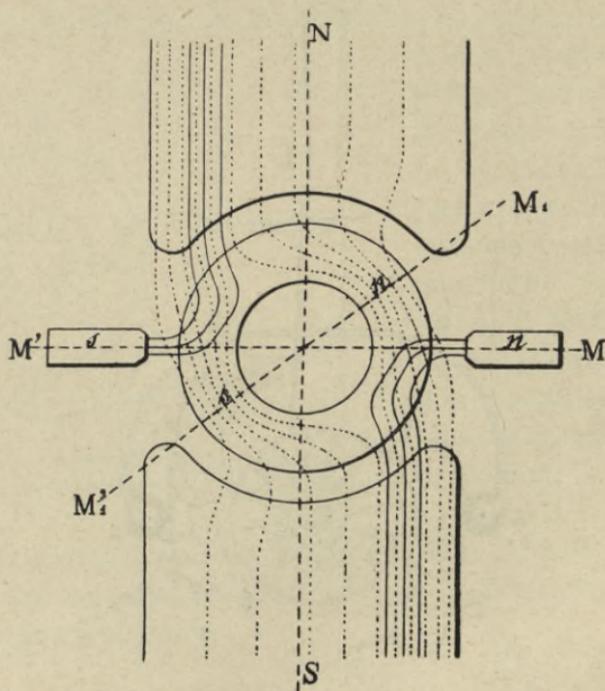


Fig. 37. — Champ magnétique redressé par l'emploi de pôles auxiliaires.

232. — Dans le but de rendre nul l'angle de calage des balais d'un moteur électrique, on a parfois recours à l'artifice suivant.

De chaque côté de l'induit, que nous supposons être un anneau Gramme, on place, en outre des électro-aimants formant les pôles inducteurs NS (fig. 37), d'autres électro-aimants donnant des pôles n et s dans un plan normal au plan des premiers. Le champ magnétique inducteur primitif

est représenté par les lignes de force pointillées avec sa distorsion due au fonctionnement du moteur dans le sens de la flèche, conformément à la figure 8. Les lignes de force du champ créé par les pôles auxiliaires n et s sont pleines. On voit qu'il résulte de la superposition des deux champs un accroissement du champ primitif à gauche et en haut, ou à droite et en bas, et par conséquent un redressement de ce champ. Avec des électro-aimants auxiliaires de puissance convenable, on peut redresser complètement le champ et faire que le maximum coïncide exactement avec le plan ns normal aux pôles inducteurs NS .

L'angle de calage des balais est alors nul.

MOTEURS EXCITÉS EN DÉRIVATION ; FONCTIONNEMENT
SOUS DIFFÉRENCE DE POTENTIEL CONSTANTE

233. Maintien d'une vitesse constante, malgré les variations de l'effort résistant. — Tout d'abord, rappelons que les électromoteurs en dérivation bien construits peuvent n'éprouver que de faibles variations de vitesse, pour de grandes variations de l'effort résistant, lorsque la différence de potentiel est maintenue constante *aux bornes*; nous avons traduit cette propriété des moteurs en dérivation en disant que leur stabilité d'équilibre est grande (89).

Lorsque la résistance de l'induit est très faible et que sa réaction est notable, les variations de la vitesse peuvent même être assez réduites pour qu'on puisse considérer le moteur comme pratiquement *autorégulateur de la vitesse* (90).

234. — Dans le cas général, le moyen à employer pour maintenir la vitesse constante, consiste à faire varier le moment moteur de manière à lui faire suivre les variations du moment résistant, de le diminuer, par exemple, quand le moment résistant diminue lui-même. Lorsque le moteur est

abandonné à lui-même, la rupture de l'équilibre entre le moment moteur et le moment résistant causée par une variation de ce dernier entraîne une variation de la vitesse et, en général, cette variation de la vitesse a pour conséquence une variation du moment moteur dans le sens convenable pour amener un nouvel équilibre. Mais on veut précisément ici éviter ces variations de la vitesse; et il faut agir directement sur le moment moteur pour les prévenir. Nous rappellerons que le moment moteur est, pour les moteurs en dérivation, représenté par l'expression

$$T = \frac{n N \Phi' i_a}{\pi \cdot 10^8}.$$

L'intensité i_a est elle-même donnée par la relation

$$i_a = \frac{D - e}{r_a}.$$

Pour faire varier le moment moteur, on peut donc agir soit sur le courant dans l'induit i_a , soit sur le flux inducteur Φ' .

Nous pouvons examiner les différents cas suivants :

235. — 1° La source maintient rigoureusement constante la différence de potentiel aux bornes du moteur; celui-ci a une faible résistance d'induit, avec une réaction suffisante.

La vitesse se maintient constante d'elle-même; le moteur est autorégulateur de la vitesse.

236. — 2° La source maintient constante la différence de potentiel aux bornes du moteur, mais celui-ci est quelconque.

Il faut alors prévenir ou corriger les variations de la vitesse provoquées par les variations du moment résistant, au moyen d'un *rhéostat de réglage* intercalé sur le circuit de l'induit seulement, ou bien d'un *rhéostat d'excitation* intercalé sur le circuit des inducteurs.

237. — Voici comment le rhéostat de réglage doit être manœuvré et comment s'explique cette manœuvre. Supposons l'équilibre établi, pour une certaine vitesse V , entre le moment moteur et le moment résistant. Si ce dernier diminue, la vitesse tend à augmenter, puisque le moment moteur est alors prépondérant. Mais si on *augmente* alors la résistance du rhéostat de réglage, le courant dans l'induit peut être diminué suffisamment par cette manœuvre, et avec lui le moment moteur, pour que la vitesse n'augmente pas sensiblement.

238. — Nous avons admis implicitement que le flux de force reste invariable. En réalité, à cause de la réaction d'induit, le flux de force augmente quand l'intensité dans l'induit est réduite par l'augmentation de la résistance du rhéostat de réglage. Il en résulte un double effet ; d'abord cet accroissement du flux tend à rendre moins rapide la diminution du moment moteur ; mais, d'un autre côté, la force contre-électromotrice augmentant aussi, le courant dans l'induit diminue plus qu'il ne l'eût fait si le flux fût resté invariable et il est facile de se rendre compte que la diminution du courant dans l'induit est toujours beaucoup plus importante que l'augmentation du flux qui l'a provoquée, si la résistance de l'induit n'est pas trop grande.

L'intensité du courant dans l'induit étant

$$i_a = \frac{D - e}{r_a},$$

la différence de potentiel D étant supposée constante, si le flux devient n fois plus grand, la force électromotrice augmente dans la même proportion et la nouvelle intensité i'_a dans l'induit est

$$i'_a = \frac{D - ne}{r_a}.$$

Le rapport $\frac{i'_a}{i_a}$ est alors

$$\frac{i'_a}{i_a} = \frac{D - ne}{D - e}.$$

L'intensité dans l'induit diminue plus vite que le flux n'augmente, quand on a

$$\frac{D - ne}{D - e} < \frac{1}{n},$$

d'où on tire

$$e > \frac{D}{n + 1}.$$

Si on remplace e par sa valeur

$$e = D - i_a r_a,$$

l'inégalité précédente devient

$$nD > (n + 1) i_a r_a.$$

Le nombre n a été supposé plus grand que 1. Plus il est grand, plus facilement est réalisable la condition précédente, puisque, pour n très grand, il vient

$$D > i_a r_a,$$

condition toujours remplie, si le moteur est en mouvement.

Nous nous placerons dans les conditions les plus défavorables en donnant à n une valeur très voisine de 1. La condition finale est alors

$$D > 2i_a r_a.$$

Traduite en langage ordinaire, cette inégalité signifie que le courant de fonctionnement de l'électromoteur est plus petit que la moitié du courant passant dans l'induit quand le moteur est immobilisé. Cette condition est toujours remplie, si la résistance de l'induit n'est pas trop grande, et le courant dans l'induit diminue alors plus vite que le flux n'augmente. On verrait évidemment de même que le courant augmente plus vite que le flux ne diminue.

Par conséquent, l'accroissement du flux de force résultant de la diminution de la réaction d'induit, loin de contrarier le réglage, y concourt encore.

239. — Enfin, pour compléter cette analyse des effets produits par la manœuvre du rhéostat de réglage, nous devons ajouter que l'augmentation du flux, conséquence de la réduction du courant dans l'induit, produite par l'augmentation de la résistance du rhéostat, entraîne un accroissement du moment résistant parasite (50) et concourt encore de cette manière à rendre plus rapide l'établissement de l'équilibre rompu par une diminution du moment résistant utile appliqué au moteur.

240. — Nous avons dit que le réglage de la vitesse pouvait être réalisé en agissant sur la résistance d'un rhéostat d'excitation placé sur le circuit des inducteurs. Cette fois, il faut *diminuer* la résistance du rhéostat, si l'on veut diminuer le moment moteur et lui permettre de faire de nouveau équilibre au moment résistant qui aura été réduit. Autrement dit, on diminue la résistance du rhéostat d'excitation, c'est-à-dire on augmente l'intensité du courant inducteur et le flux qui en dépend, pour empêcher la vitesse d'augmenter, ou pour la réduire, si elle s'est déjà accélérée. Ceci semble en contradiction avec l'expression du moment moteur, puisque celle-ci contient le flux en facteur et qu'il semble qu'une augmentation de ce dernier doit provoquer une augmentation du moment moteur et une accélération de la vitesse. Il est facile de se rendre compte qu'il n'y a là qu'une contradiction apparente; elle tombe d'elle-même, si l'on songe qu'on ne peut toucher au flux de force sans produire en même temps une variation de l'intensité dans l'induit en sens inverse de celle du flux.

L'équilibre étant obtenu, si le moment résistant utile vient à diminuer, la vitesse tend à augmenter. Pour empêcher cette accélération, on diminue la résistance du rhéostat d'excitation, ce qui augmente le flux inducteur. La force contre-électromotrice croissant alors, l'intensité dans l'induit diminue; nous avons vu précédemment (238) que dans les conditions normales le courant dans l'induit diminue plus vite

que le flux n'augmente et que, par suite, le moment moteur lui-même diminue; on peut ainsi le rendre assez petit pour qu'il fasse de nouveau équilibre au moment résistant réduit par la diminution du moment résistant utile. Le réglage est encore aidé par cette circonstance que, le flux augmentant, le moment résistant parasite est lui-même accru.

241. — Sans établir ici de comparaison entre les deux modes de réglage que nous venons d'examiner, nous pouvons dire cependant que le courant d'excitation étant beaucoup moins intense que le courant dans l'induit, le rhéostat d'excitation pourra être confectionné avec du fil moins gros que le rhéostat de réglage; il sera moins encombrant et les étincelles au commutateur de manœuvre seront moins destructives.

242. — 3° La source maintient une différence de potentiel constante non plus aux bornes, mais entre deux points A et B séparés des bornes par une résistance ρ .

Les extrémités du fil inducteur peuvent être alors reliées aux points A et B, après les avoir séparées des bornes ou des balais (216); on rentre alors dans les cas précédents. Il faut observer toutefois que si la résistance ρ , qui s'ajoute alors à celle d'induit est un peu importante, le moteur ne peut plus être autorégulateur de la vitesse et qu'il faut régler celle-ci au moyen d'un rhéostat de réglage sur le circuit de l'induit, ou d'un rhéostat d'excitation sur le circuit des inducteurs (236).

243. — 4° Il nous reste à examiner maintenant le cas où la différence de potentiel aux bornes de l'électromoteur n'est pas maintenue exactement constante; nous supposerons ou bien que la différence de potentiel diminue quand le courant dans l'induit diminue, ou bien que la différence de potentiel augmente quand cette intensité diminue.

Dans la première hypothèse, l'équilibre étant établi à un

moment donné, si l'effort résistant utile vient à diminuer, par exemple, la vitesse commence par croître et l'intensité du courant dans l'induit diminue, puisque la force électromotrice augmente.

Cette réduction de courant i_a entraîne, par hypothèse, une diminution de la différence de potentiel D aux bornes; l'intensité i_a éprouve de ce fait une nouvelle réduction. Il est vrai que le courant inducteur i_a diminue lui-même et que la force électromotrice e décroissant, tend à rehausser la valeur du courant dans l'induit i_a . Mais, en supposant même que le flux Φ' et la force électromotrice e varient dans la même proportion que D , les deux termes D et e de la fraction qui représente l'intensité i_a étant réduits proportionnellement, le courant i_a lui-même diminue certainement. Or, le flux diminue moins vite que le courant inducteur ou que D .

En définitive, on voit donc que le courant i_a dans l'induit et le flux Φ' diminuent tous deux; d'ailleurs, les diminutions de i_a et de D se répercutant successivement, on voit que le moment moteur peut décroître assez rapidement pour qu'on puisse obtenir un nouvel équilibre sans un accroissement important de la vitesse; celle-ci devra néanmoins toujours croître tout d'abord de la quantité nécessaire pour provoquer une diminution initiale du courant.

244. — Il y a là, on le voit, encore au moins une tendance à l'autorégulation du moteur; celle-ci pourra être presque parfaite dans certains cas. On obtient, par cette variation de la différence de potentiel aux bornes, un résultat analogue à celui fourni par les moteurs en dérivation à faible résistance d'induit et à réaction importante.

En tous cas, on achève le réglage, s'il y a lieu, en agissant sur le rhéostat d'excitation.

245. — La discussion précédente montre que si, au contraire, la différence de potentiel aux bornes croît quand l'intensité dans l'induit diminue, les variations de vitesse

doivent être plus accusées que si la différence de potentiel reste constante ; le réglage exige des variations plus grandes de la résistance du rhéostat de réglage ou du rhéostat d'excitation ; c'est le premier qui devra être employé de préférence. On se trouve, en particulier, dans les conditions que nous venons d'indiquer en dernier lieu, si une source donnant entre ses bornes une différence de potentiel constante est reliée au moteur par des conducteurs présentant une résistance notable, puisque la chute de potentiel dans ces conducteurs décroît quand l'intensité diminue. Nous avons d'ailleurs étudié d'une façon détaillée ce cas spécial (111 et 221) et indiqué que la stabilité d'équilibre, toujours réduite, peut même devenir nulle pour des valeurs un peu grandes du courant, si la résistance des conducteurs est importante. Nous avons dit précédemment que les inducteurs doivent alors être mis en dérivation entre les deux points où la différence de potentiel est constante.

246. Modification du régime de la vitesse. —

Supposons maintenant que nous voulions obtenir plusieurs régimes pour la vitesse, c'est-à-dire des vitesses différentes pour le même moment résistant utile opposé au moteur, la vitesse pouvant d'ailleurs rester constante, quand le moment résistant varie, si le moteur est autorégulateur, ou être maintenue constante par un réglage approprié.

On peut réaliser ce desideratum de diverses manières.

247. — 1° Le moment résistant restant fixe, on diminue le moment moteur et, par suite, la vitesse d'équilibre en augmentant la résistance du rhéostat de réglage intercalé sur le circuit de l'induit ; on augmente le moment moteur et la vitesse en diminuant la résistance du rhéostat.

Nous renvoyons à l'analyse détaillée que nous avons faite précédemment de l'action du rhéostat de réglage et du rhéostat d'excitation, pour la justification de la manœuvre que nous indiquons ici.

248. — 2° On diminue le moment moteur et la vitesse correspondant à un moment résistant utile déterminé, en diminuant la résistance du rhéostat d'excitation placé sur le circuit inducteur. On augmente la vitesse en augmentant la résistance du rhéostat. On le voit encore ici, la manœuvre du rhéostat d'excitation est l'inverse de celle du rhéostat de réglage.

249. — 3° On diminue le moment moteur, et par suite la vitesse d'équilibre, en diminuant la différence de potentiel aux bornes de l'électromoteur. On augmente la vitesse en augmentant la différence de potentiel. Pour faire ainsi varier la différence de potentiel aux bornes du moteur, on peut faire varier la force électromotrice de la source, augmenter ou diminuer la vitesse de rotation de cette source, si c'est une machine électrique, augmenter ou diminuer le nombre des éléments en tension, si c'est une pile. On peut aussi faire varier la résistance des conducteurs reliant la source à l'électromoteur. Nous avons vu que lorsque la résistance de l'induit est faible (**219**), l'effet de cette résistance sur la vitesse est très réduite au moins pour le fonctionnement moyen, si les inducteurs restent dérivés aux bornes.

Quand cela est possible, il est préférable de faire varier la différence de potentiel aux extrémités de l'induit, l'excitation des inducteurs restant identique.

250. — En particulier, la source peut être disposée de manière à maintenir constante une différence de potentiel D entre deux points A et B et une différence de potentiel D_1 entre deux points C et F. On peut alors relier le circuit inducteur aux points A et B et le circuit induit, soit aux points A et B, soit aux points C et F. On a ainsi deux régimes de vitesse différents, la vitesse pouvant d'ailleurs rester sensiblement constante, pour un choix de connexions donné, quel que soit le moment résistant.

251. Démarrage. — Le démarrage d'un moteur en dérivation exige l'introduction dans le circuit de l'induit d'une résistance suffisante pour réduire l'intensité du courant passant dans le moteur immobilisé à une valeur non dangereuse.

On intercale toujours à cet effet dans le circuit de l'induit un rhéostat dit *de démarrage*, qui se confond d'ailleurs avec le rhéostat de réglage, quand celui-ci existe.

Une fois le moteur en marche, la résistance du rhéostat de démarrage peut être successivement diminuée jusqu'à devenir nulle. La vitesse d'équilibre augmente alors progressivement. Nous avons dit comment on pouvait régler cette vitesse en conservant dans le circuit une partie de la résistance de démarrage (247).

252. — La valeur de la résistance introduite au démarrage doit être la plus grande possible, sans cependant que l'intensité du courant devienne assez faible pour rendre le moment moteur inférieur au moment résistant opposé au moteur, lors de ce démarrage, auquel cas le moteur ne se mettrait pas en marche.

Autrement dit, il faut s'arranger dans tous les cas de manière que le moteur se mette en marche, mais à petite vitesse, cette dernière étant ensuite progressivement augmentée par la diminution de la résistance de démarrage.

253. — Comme, en suivant exactement la prescription précédente, on est conduit à donner à la résistance de démarrage des valeurs différentes, suivant l'effort résistant opposé au moteur immobile, et que d'ailleurs cet effort résistant peut être très variable et souvent inconnu, on procédera généralement de la manière suivante.

La résistance du rhéostat de démarrage sera assez grande pour permettre le démarrage à petite vitesse, même pour un effort résistant très réduit.

Quel que soit l'effort résistant appliqué au moteur, lors du

démarrage, on introduit dans le circuit toute la résistance, mais en diminuant *très rapidement* cette résistance jusqu'à ce que le moteur se mette en marche lentement. La résistance qui reste alors est celle qu'il eût fallu introduire tout d'abord. On augmente ensuite peu à peu la vitesse en diminuant *plus lentement* la résistance.

254. Changements de marche. — L'inversion du sens de la rotation d'un moteur excité en dérivation se fait, comme pour un moteur en série, en changeant le sens du courant dans l'induit, ou dans les inducteurs, et en modifiant le calage des balais, si l'angle de calage n'est pas nul.

On pourra, comme nous l'avons indiqué, faire usage de balais en charbon (231) et rendre nul l'angle de calage par le moyen déjà étudié (232). Il suffira alors pour provoquer les changements de marche du moteur de changer, au moyen d'un commutateur ordinaire quelconque, le sens du courant dans l'induit, ou les inducteurs. Il y aura intérêt, d'ailleurs, à intervertir de préférence le courant inducteur, à cause de sa plus faible valeur.

255. Arrêt du moteur. — Pour arrêter un moteur quelconque, il faut d'abord interrompre le courant, soit dans l'induit, soit dans les inducteurs, soit dans les deux à la fois. Mais, en général, l'inertie de l'induit et des pièces mobiles qu'il commande prolongera, plus ou moins, le mouvement du moteur après la rupture du courant. Si l'on désire obtenir un arrêt instantané, coïncidant exactement avec la rupture du courant, il faut que le levier produisant l'interruption du courant applique en même temps un frein sur le moteur.

Dans le cas du moteur en série, on pourra faire usage d'un frein mécanique.

256. — Lorsqu'on a affaire à un moteur en dérivation, on peut avoir recours à un véritable frein électrique très efficace et dont l'application au moteur ne réclame aucune installation spéciale. Voici en quoi il consiste.

L'excitation des inducteurs H est permanente, même pendant les arrêts du moteur, à moins d'interruption complète dans l'emploi de ce dernier; ils sont à cet effet reliés constamment aux deux points A et B entre lesquels la source électrique S maintient, par exemple, une différence de potentiel constante (*fig. 38*). L'un des balais F de l'induit I est relié directement au point A, l'autre F' est relié au secteur de contact D d'un commutateur à manette C dont la lame de contact L peut être placée successivement sur les plots de

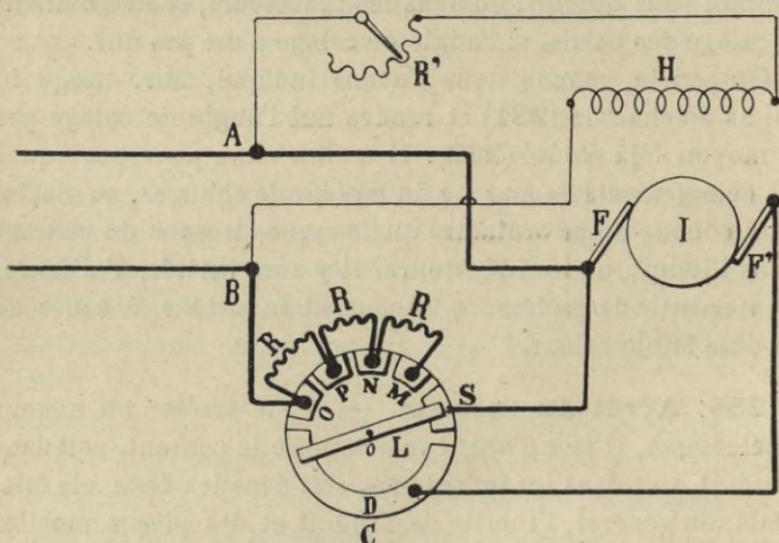


Fig. 38. — Arrêt d'un moteur en dérivation par la mise en court-circuit de l'induit.

contact S, M, N, P, Q. La position de repos est en S; le balai F étant relié à ce plot S, on voit que l'induit du moteur au repos est en court-circuit.

Pour le démarrage, la lame L est portée successivement sur les plots M, N, P, Q; le rhéostat de démarrage étant constitué par des résistances R intercalées entre deux plots consécutifs, la résistance totale intercalée dans le circuit de l'induit décroît à mesure qu'on va de M vers Q.

Nous avons représenté en R' le rhéostat d'excitation inter-

calé sur le fil des inducteurs, dont le rôle a été indiqué plus haut (240).

Lorsqu'on veut stopper le moteur, la lame de contact L est successivement ramenée de Q vers M, intercalant dans le circuit une résistance croissante et diminuant ainsi la vitesse; puis, la lame passant de M en S, le courant de la source est interrompu dans l'induit et en même temps l'induit est en court-circuit. En vertu de la loi de Lenz (7) si l'induit continue à tourner, grâce à son inertie, dans le champ magnétique constant créé par les inducteurs, il s'y développe des courants d'induction très énergiques qui s'opposent au mouvement. Comme aucune force ne vient cette fois entretenir celui-ci, la rotation s'arrête si rapidement que le stoppage peut être considéré comme instantané à partir du moment de la mise en court-circuit.

257. — Pendant sa rotation en court-circuit, si peu de temps qu'elle dure, l'induit fonctionne comme celui d'une machine génératrice. Le calage des balais, bon pour la réceptrice, n'est plus alors convenable; comme d'ailleurs le courant produit est, pendant un temps très faible il est vrai, de grande intensité, à cause du court-circuit, on aura, en général, une ou deux grosses étincelles aux balais.

ÉLECTROMOTEURS FONCTIONNANT A INTENSITÉ CONSTANTE

258. Impossibilité du réglage des moteurs excités en série. — L'intensité du courant étant constante, le moment moteur l'est aussi (76). Si donc le moment résistant appliqué au moteur diminue et entraîne une augmentation de la vitesse, il sera impossible de réduire celle-ci en diminuant à son tour le moment moteur. Or, nous avons vu que les électromoteurs excités en série ont une stabilité très faible, lorsqu'ils fonctionnent à intensité constante, c'est-à-

dire qu'une variation très faible du moment résistant entraîne une variation considérable de la vitesse.

259. Moteurs excités en dérivation. — L'intensité du courant entrant dans le moteur étant constante, on diminue le courant dans l'induit en augmentant le courant inducteur, par la réduction de la résistance d'un rhéostat placé sur le circuit inducteur. Or, le moment moteur est proportionnel au produit du flux par le courant dans l'induit (86). Si les inducteurs sont saturés, le flux étant approximativement indépendant du courant inducteur, en augmentant ce dernier on diminue sûrement le moment moteur. Si les inducteurs sont loin de la saturation et que le flux augmente à peu près proportionnellement au courant inducteur, comme celui-ci est inférieur dans ce cas au courant dans l'induit, pour un moteur construit suivant les bases ordinaires, le moment moteur augmente lorsque le courant inducteur augmente (117). Alors, si une diminution du moment résistant appliqué au moteur provoque une augmentation de la vitesse et si, pour réduire celle-ci, on diminue le courant inducteur et par suite le moment moteur, la vitesse diminuant, le courant inducteur diminue de nouveau entraînant une nouvelle réduction de la vitesse et ainsi de suite, jusqu'à ce que le moteur soit arrêté. On voit que le réglage n'est plus alors possible, puisque la moindre réduction initiale du courant inducteur provoque l'arrêt complet. Nous avons d'ailleurs déjà signalé l'instabilité complète d'un moteur fonctionnant dans ces conditions (117).

Le réglage d'un moteur en dérivation fonctionnant à intensité constante n'est donc possible que si les inducteurs sont saturés. La mise en marche sera d'ailleurs toujours assez compliquée. ①

CHAPITRE VI

TRANSMISSION ET DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE

§ 1. — Transmission de l'énergie mécanique.

260. Généralités. — Jusqu'à présent nous n'avons étudié les électromoteurs qu'au seul point de vue de la transformation en énergie mécanique de l'énergie électrique qu'ils consomment, sans avoir égard à la nature particulière de la source électrique qui les actionnent. Nous devons maintenant indiquer comment la nature de la source électrique est liée aux applications particulières des électromoteurs.

Les générateurs d'électricité employés actuellement sont les piles chimiques ou thermiques et les machines magnéto et dynamo-électriques actionnées mécaniquement.

Si l'on veut engendrer directement de l'énergie mécanique, la source d'électricité actionnant l'électromoteur devra être une pile. Mais dans l'état actuel de la science électrique, la production des courants électriques au moyen des piles est assez onéreuse pour que cet ensemble d'une pile et d'un électromoteur soit très inférieur, au point de vue économique, à un moteur à vapeur, pour la production d'une puissance mécanique déterminée. On n'aura donc recours aux piles actionnant des électromoteurs que pour des applications spéciales, où la question économique est tout à fait secondaire et où l'on recherche surtout la commodité.

On actionne, par exemple, avec des piles de petits électro-

moteurs destinés à produire, dans un laboratoire, un mouvement rapide et régulier. On peut faire mouvoir de cette manière de petits tours, des machines à coudre, des distributeurs dans la télégraphie multiple. Il est même possible d'obtenir ainsi la propulsion de petits bateaux, la traction de voitures légères, etc. Mais ces applications ne constituent pas une production industrielle de l'énergie mécanique.

261. — L'emploi industriel des électromoteurs a pour objet, d'une manière générale, de réaliser les desiderata suivants :

1° On dispose, en un certain lieu, d'une puissance mécanique, chute d'eau ou moteur à vapeur, et l'on veut utiliser cette puissance en un autre lieu éloigné du premier.

Au même titre que l'eau sous pression, l'air comprimé, ou les câbles télodynamiques, le courant électrique peut servir d'intermédiaire pour la *transmission* de la puissance mécanique. Une dynamo actionnée par la chute d'eau ou le moteur à vapeur produit un courant qui, lancé dans des conducteurs la reliant à une autre dynamo placée au lieu d'utilisation, fait tourner cette dernière comme électromoteur.

262. — 2° On veut actionner au moyen d'une puissance mécanique unique ou de puissances mécaniques réunies en un même lieu, des appareils mécaniques distribués dans un certain rayon. C'est le cas, par exemple, d'une usine, d'un atelier.

Les transmissions ordinaires par arbres, poulies, courroies résolvent le problème, mais entraînent des complications assez grandes, des frais d'installation souvent considérables et des pertes de puissance qui constituent une fraction fort importante de la puissance motrice. La solution électrique comporte une ou plusieurs machines génératrices actionnées par la puissance mécanique et distribuant le courant électrique qu'elles produisent dans un réseau de circuits alimentant un certain nombre d'électromoteurs commandant les

appareils à mettre en mouvement. Ici le courant électrique sert encore d'intermédiaire pour la *transmission* et aussi pour la *distribution* de la puissance mécanique.

263. — 3° Enfin la puissance mécanique dont on dispose étant fixe et travaillant pendant des temps déterminés, on désire l'utiliser en des lieux variables, toujours assez distants, et pendant des temps également variables qui ne seront pas nécessairement ceux pendant lesquels elle fonctionne.

On peut résoudre le problème en emmagasinant l'énergie mécanique au lieu et au temps de sa production, par exemple en comprimant de l'air dans des réservoirs, qui transportés ensuite en divers lieux, pourront actionner des moteurs à air comprimé. Mais on peut aussi, d'une manière analogue, charger, au moyen de machines électriques génératrices, des accumulateurs électriques qui entretiendront le mouvement d'électromoteurs au lieu et au temps qu'on aura choisi. C'est la solution générale de la navigation électrique et de la traction électrique des voitures. On ne peut, en effet, pour ces applications, si l'on suppose quelconque la route du bateau ou de la voiture, relier les moteurs qui les font mouvoir à la source d'énergie par des conducteurs électriques.

Dans le cas spécial des tramways électriques, où la route suivie est toujours la même, on peut encore avoir recours à la solution qui vient d'être indiquée par accumulateurs; on peut aussi, dans ce cas particulier, transmettre l'énergie mécanique au tramway, par l'intermédiaire d'une dynamo-génératrice et de conducteurs la reliant à un électromoteur placé sur la voiture.

Bien que les accumulateurs électriques soient en réalité des piles chimiques, on ne peut considérer le développement d'énergie mécanique des électromoteurs qu'ils actionnent comme une production directe, puisque les produits chimiques qui interviennent dans le fonctionnement des accumulateurs sont créés par un courant électrique dû à des dynamos actionnées mécaniquement.

264. — On voit donc, en résumé, que toutes les applications industrielles des électromoteurs se ramènent toujours à une *transmission* de la puissance mécanique. Cette transmission peut d'ailleurs être ou non compliquée de *distribution*.

La transmission est *directe*, si les machines génératrices du courant sont reliées par des conducteurs aux réceptrices. Elle est *indirecte*, si on emploie des accumulateurs comme intermédiaires.

Nous étudierons ce cas particulier de l'emploi des accumulateurs à propos de la navigation électrique.

Nous allons, dans ce chapitre, traiter de la transmission de l'énergie mécanique sans distribution, puis de la transmission avec distribution.

265. Rendement d'une transmission d'énergie mécanique au moyen d'une dynamo-génératrice et d'une dynamo-réceptrice. — On appelle *rendement électrique* d'une transmission d'énergie mécanique au moyen de deux dynamos, l'une génératrice et l'autre réceptrice, le rapport de la puissance électrique absorbée par la rotation de la réceptrice à la puissance électrique totale développée par la génératrice.

Désignons par E la force électromotrice de la génératrice et par I_a l'intensité du courant développé par l'induit de cette dynamo ; par e la force électromotrice de la réceptrice et par i_a le courant passant dans l'induit de cette réceptrice. La puissance électrique développée par la génératrice est EI_a ; la puissance absorbée par la rotation de la réceptrice est ei_a , de sorte que le rendement électrique η_e est

$$\eta_e = \frac{ei_a}{EI_a}.$$

Dans le cas particulier où les courants i_a et I_a sont égaux, le rendement électrique devient égal au rapport des forces électromotrices des deux dynamos.

Le *rendement industriel* η_i d'une transmission est le rap-

port de la puissance mécanique utile p_u disponible sur l'arbre de la réceptrice à la puissance mécanique P_m dépensée pour la rotation de la génératrice. On a donc

$$\eta_i = \frac{p_u}{P_m}.$$

Comme, d'ailleurs, la puissance p_u ne diffère de la puissance absorbée par la rotation de la réceptrice ei_a que par la puissance p_f absorbée par les effets parasites, et que pareillement la puissance mécanique P_m est égale à la puissance électrique totale Ei_a développée par la génératrice augmentée de la puissance parasite P_f , on a aussi

$$\eta_i = \frac{ei_a - p_f}{Ei_a + P_f}.$$

TRANSMISSION A L'AIDE DE DEUX MACHINES MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES
OU DE DEUX DYNAMOS A EXCITATION SÉPARÉE

266. Équilibre du moteur ; stabilité. — Nous commencerons l'étude du fonctionnement d'une transmission par le cas simple où les deux machines génératrice et réceptrice ont comme inducteurs des aimants permanents ou des électro-aimants excités séparément, de telle manière qu'on puisse encore considérer comme invariable leur aimantation. Le flux inducteur, tant pour la génératrice que pour la réceptrice, est alors constant, si la réaction d'induit est négligeable; ce flux augmente quand l'intensité dans l'induit diminue, si la réaction d'induit a une influence notable.

Les induits des deux machines sont directement reliés par des conducteurs et on peut supposer que ceux-ci sont assez bien isolés pour qu'aucune déperdition notable de courant ne se produise; le courant est donc le même dans les deux induits. Soit i ce courant; on a

$$i = \frac{E - e}{R_g + R_c + R_r}.$$

En désignant toujours par E et e les forces électromotrices de la génératrice et de la réceptrice ; par R_g , R_c et R_r la résistance de la génératrice, des conducteurs et de la réceptrice.

Admettons que la vitesse de la génératrice soit constante, ce qui revient à dire que sa force électromotrice est approximativement constante, ou augmente légèrement quand l'intensité du courant diminue, à cause de la réaction d'induit.

La différence de potentiel D aux bornes de l'électromoteur est

$$D = E - i(R_g + R_c).$$

Cette différence de potentiel augmente donc quand l'intensité du courant diminue, d'autant plus que la force électromotrice E augmente légèrement alors, à cause de la réaction d'induit.

Par suite, l'équilibre étant obtenu pour l'électromoteur avec une certaine charge correspondant à une intensité i du courant et à une vitesse V , si on diminue la charge, la vitesse augmente et l'intensité diminue.

Nous avons vu (84) que lorsqu'un électromoteur fonctionne avec un flux inducteur sensiblement constant, l'augmentation de la vitesse nécessaire pour amener une diminution suffisante du courant et du moment moteur est toujours modérée, dans le cas étudié où la différence de potentiel aux bornes du moteur est maintenue constante. Ici la différence de potentiel augmentant quand l'intensité diminue, l'accroissement de la vitesse sera plus considérable ; comme l'accroissement de la différence de potentiel D est d'autant plus grande que la résistance R_c des conducteurs reliant les dynamos est elle-même plus grande, on voit qu'on peut dire d'une manière générale que la stabilité du moteur sera d'autant plus faible que la distance qui le sépare de la génératrice est plus grande. Pour que la stabilité fût indépendante de la distance, il faudrait conserver dans tous les cas aux conducteurs la même résistance, en choisissant convenablement la sec-

tion. Mais il est clair qu'on serait conduit ainsi à des dépenses d'installation exagérées, pour peu que la distance fût un peu grande.

Dans tous les cas, pour une puissance donnée à transmettre, il y aura intérêt à employer des machines électriques à potentiel élevé, au point de vue de la stabilité de l'électromoteur. L'intensité du courant i étant alors réduite en même temps que E et D sont augmentées, la chute de potentiel dans les conducteurs devient moins importante d'une manière absolue et surtout relativement aux valeurs plus grandes de E et de D . Par suite, la différence de potentiel D aux bornes du moteur éprouve des variations moins grandes. On peut ainsi, en employant des machines électriques à potentiel d'autant plus élevé que la résistance des conducteurs est plus grande, obtenir la même stabilité pour le moteur, quelle que soit la résistance des conducteurs ou, par suite, la distance à laquelle on fait la transmission.

267. — Lorsque les deux dynamos sont identiques et que leurs excitations sont égales, la vitesse prise par la réceptrice, quelle que soit sa charge, est toujours inférieure à celle de la génératrice, puisque la force électromotrice e est toujours plus petite que E . Dans ce cas particulier, on voit donc que, quelle que soit la stabilité donnée à l'électromoteur, la vitesse ne prend jamais de valeurs exagérées, même lorsqu'on supprime toute charge.

268. Rendement. — Le rendement électrique de la transmission est

$$\eta_e = \frac{e}{E},$$

puisque le courant est supposé identique dans l'induit des deux machines électriques.

On voit que le rendement électrique de la transmission augmente en même temps que la force électromotrice e de

l'électromoteur, puisque la force électromotrice E de la génératrice tournant à vitesse constante est elle-même sensiblement constante.

Le rendement augmente donc à mesure que la charge du moteur diminue et que par suite sa vitesse augmente. Le rendement est nul quand le moteur est immobilisé et atteint son maximum quand toute charge est supprimée pour le moteur. La valeur maximum du rendement peut être très voisine de 1, sans jamais d'ailleurs atteindre cette limite, puisqu'alors, e prenant une valeur égale à E , le courant i serait nul ; il faudrait donc admettre que la rotation de l'électromoteur se produirait sans consommation d'énergie.

269. — La puissance ei absorbée par la rotation de la réceptrice, nulle quand le moteur est immobilisé, puisque e est alors nulle, croît d'abord quand la vitesse du moteur augmente ; mais comme e et i varient en sens inverse, le produit passe par un maximum ¹ pour une valeur de la vitesse donnant à la force électromotrice e la valeur $\frac{E}{2}$; la puissance ei redevient très faible pour les valeurs de la force électromotrice e voisines de E , c'est-à-dire pour les faibles valeurs de l'intensité i . Le rendement électrique a la valeur 0,50 quand la puissance absorbée par la rotation du moteur est maximum.

270. — Le rendement électrique peut s'écrire

$$\eta_e = \frac{Ei - (R_g + R_c + R_r)i^2}{Ei},$$

en mettant en évidence que la différence entre la puissance totale développée par la génératrice et la puissance absorbée par la rotation de la réceptrice, c'est la puissance absorbée

1. On suppose la force électromotrice E constante, c'est-à-dire qu'on fait abstraction de la réaction d'induit.

par les conducteurs intermédiaires et les induits des deux dynamos, conformément à la loi de Joule. On voit alors que pour une même résistance totale du circuit on augmentera le rendement en diminuant le courant i , et cela en employant des dynamos à potentiel élevé.

271. — Obtenir un grand rendement est toujours désirable, puisqu'on utilise alors une plus grande fraction de la puissance mécanique disponible. Mais il est tout aussi avantageux de chercher à réduire les frais d'installation de la transmission. Or, pour peu que la distance entre la génératrice et la réceptrice soit grande, les conducteurs qui les relient absorbent une partie considérable de la dépense primitive. Aussi cherche-t-on à diminuer leur coût. Pour une distance donnée et pour des machines déterminées, on y arrive en réduisant la section des conducteurs. Mais on augmente ainsi la densité du courant qui les traverse ; on augmente leur température et, par suite, leurs chances de détérioration, s'ils sont isolés ; on ne peut, en tous cas, descendre au-dessous d'une section minimum sans courir au moins le risque d'incendie. En outre, la résistance des conducteurs augmente et le rendement est ainsi diminué.

Si on augmente le potentiel des machines, l'intensité du courant nécessaire pour assurer la transmission d'une puissance donnée diminue ; on peut alors diminuer la section des conducteurs, tout en conservant une densité de courant convenable et augmenter ainsi la résistance du circuit sans trop diminuer le rendement.

272. — Ainsi l'emploi des potentiels élevés permet, pour une distance déterminée, d'obtenir un rendement élevé en employant de gros conducteurs, ou bien d'assurer encore un rendement convenable, tout en employant des conducteurs de faible section, c'est-à-dire peu coûteux. Nous étudierons plus loin une application numérique (**310**).

273. — Le rendement industriel, dans le cas particulier qui nous occupe, peut s'écrire

$$\eta_i = \frac{ei - p_f}{Ei + P_f}.$$

La puissance P_f absorbée par les effets parasites de la génératrice est sensiblement constante, puisque nous supposons constantes l'excitation et la vitesse de cette machine. La puissance parasite p_f de la réceptrice augmente avec la vitesse (50). On voit que le rendement industriel, nul quand la vitesse de la réceptrice est nulle, c'est-à-dire quand la force électromotrice e est nulle, est encore égal à 0 quand la vitesse s'étant accrue, la puissance ei devient égale à p_f . Il passe donc par un maximum. Si, d'ailleurs, on écrit le rendement industriel sous la forme

$$\eta_i = \frac{Ei - (R_g + R_e + R_r) i^2 - p_f}{Ei + P_f},$$

on voit qu'on peut appliquer au rendement industriel ce que nous avons dit de l'emploi des potentiels élevés.

274. Mise en marche. — Si l'on fait usage de machines magnéto-électriques, la mise en marche n'offre aucune difficulté, pourvu qu'on prenne les précautions ordinaires pour empêcher le développement d'un courant trop énergique au démarrage (227). Mais les machines magnéto-électriques ne sont guère en usage et nous n'avons prévu leur emploi que parce que leur fonctionnement est le même que celui des dynamos à excitation séparée.

Pour ces dernières, une difficulté se présente. Nous supposons, bien entendu, que l'excitation des inducteurs de la génératrice, comme aussi de la réceptrice, est obtenue à l'aide d'une dynamo excitatrice spéciale; la puissance mécanique qui fait tourner la génératrice commande aussi son excitatrice et il n'y a là aucune difficulté; la réceptrice,

d'autre part, une fois en mouvement, peut dépenser une partie de la puissance mécanique qu'elle développe pour entretenir le mouvement de son excitatrice, mais on peut se demander comment s'opérera la mise en marche, puisque l'électromoteur ne se met en mouvement qu'une fois excité et que l'excitatrice ne fournit de courant que lorsque l'électromoteur tourne et l'entraîne.

On résout la difficulté, par exemple, en disposant au poste récepteur d'une batterie d'accumulateurs chargés pendant le fonctionnement régulier de l'installation au moyen de l'excitatrice. Cette batterie est suffisante pour exciter la réceptrice et lui permettre de tourner en entraînant l'excitatrice, toute autre charge étant d'ailleurs supprimée. Quand l'excitatrice est à sa vitesse normale, on ferme son circuit sur les électro-aimants inducteurs du moteur, la batterie d'accumulateurs étant alors supprimée.

On peut aussi, comme l'a fait M. Marcel Deprez, exciter momentanément les inducteurs de la réceptrice par une dérivation du courant venant de la génératrice, jusqu'à ce que le moteur et son excitatrice s'étant mis à tourner, l'excitatrice soit à sa vitesse normale ; on ferme alors le circuit de cette dernière sur les inducteurs de l'électromoteur, après avoir rompu leur liaison avec le circuit de la génératrice.

TRANSMISSION AU MOYEN DE DEUX DYNAMOS EXCITÉES EN SÉRIE

275. Équilibre du moteur ; stabilité. — Supposons maintenant que la machine génératrice, comme la machine réceptrice, soit excitée en série, la machine génératrice tournant toujours à une vitesse constante.

La différence de potentiel D aux bornes de la réceptrice est

$$D = E - i(R_g + R_c),$$

E étant la force électromotrice de la génératrice, R_g sa résis-

tance et R_c la résistance des conducteurs reliant la génératrice à la réceptrice.

Lorsque la réceptrice est immobilisée, le courant passant dans le circuit est maximum. Son expression générale est, en effet,

$$i = \frac{E - e}{R_g + R_c + R_r},$$

e étant la force électromotrice de la réceptrice, grandeur nulle si la vitesse est nulle. Lorsque l'effort résistant appliqué à l'électromoteur est graduellement diminué, la vitesse de la réceptrice augmente et le courant diminue. Il est facile de se rendre compte du plus ou moins de stabilité d'équilibre de l'électromoteur.

276. — Lorsque la vitesse de la réceptrice est faible et que le courant a une valeur plus grande que celle correspondant à la saturation des inducteurs de la génératrice, la vitesse de cette dernière étant constante, sa force électromotrice l'est aussi, ou plutôt elle augmente quand l'intensité du courant diminue, par suite de la réduction de la réaction d'induit. Il en résulte donc que la différence de potentiel aux bornes de la réceptrice augmente quand l'intensité du courant diminue, c'est-à-dire quand la vitesse augmente. Nous avons vu (**63**) que la stabilité d'équilibre d'un électromoteur excité en série est assez grande, pour les grandes valeurs de l'intensité du courant ou du moment résistant appliqué au moteur, lorsque la différence de potentiel aux bornes est maintenue constante. Ici la stabilité sera moindre, puisque les variations de la différence de potentiel tendent à rendre plus grandes les variations de la vitesse. On peut dire aussi, puisque E est constante, que le moteur fonctionne sous une différence de potentiel constante entre deux points séparés du moteur par une résistance $R_g + R_c$ (**75**).

277. — Lorsque la vitesse de la réceptrice est grande et

que le courant a par suite une valeur bien inférieure à celle qui assure la saturation des inducteurs de la génératrice, la force électromotrice de cette dernière diminue quand l'intensité du courant diminue, puisque la vitesse est supposée constante. Comme d'ailleurs le flux inducteur et la force électromotrice sont alors à peu près proportionnels à l'intensité du courant, la différence de potentiel D aux bornes de la réceptrice diminue aussi quand l'intensité diminue. Or, nous avons vu (64) que la stabilité d'équilibre d'un électromoteur en série fonctionnant sous différence de potentiel constante aux bornes est faible pour les petites valeurs de l'intensité du courant ou de l'effort résistant. On voit que dans la transmission que nous examinons, cette stabilité devient plus grande, puisque la différence de potentiel diminue à mesure que le courant diminue lui-même et par conséquent contrarie les variations de la vitesse. Nous avons vu d'ailleurs (226) que la diminution de la différence de potentiel aux bornes d'un électromoteur à mesure que l'intensité du courant diminue est précisément un moyen de réglage pour cet électromoteur. On peut dire que la génératrice a une tendance à régulariser le fonctionnement de l'électromoteur, c'est-à-dire à rendre constante sa vitesse.

278. Autorégulation. — On peut même, par un choix judicieux des machines génératrice et réceptrice et des conducteurs qui les relie, obtenir une *autorégulation* presque parfaite de l'électromoteur. On conçoit, en effet, tout d'abord que si la résistance totale du circuit, génératrice, conducteurs et réceptrice, est petite, une très faible variation dans le numérateur $E - e$ de la fraction représentant l'intensité du courant entraîne une grande variation dans cette intensité et par suite dans le moment moteur. Or, la force électromotrice E de la génératrice varie pour les faibles valeurs de l'intensité du courant à peu près proportionnellement à cette intensité; il en est de même pour la force contre-électromotrice e de la réceptrice, pour une vitesse constante; si la vitesse de cette

dernière augmente, le numérateur $E - e$ varie donc plus rapidement que l'intensité du courant.

Supposons donc l'équilibre établi entre le moment résistant appliqué à la réceptrice et son moment moteur, et qu'on rompe cet équilibre en diminuant le moment résistant utile, c'est-à-dire la charge. La vitesse de la réceptrice commence par augmenter et en même temps sa force contre-électromotrice e . Le courant i diminue et le numérateur $E - e$ diminue proportionnellement, ce qui provoque une diminution nouvelle et importante de i . On voit qu'en vertu de ces répercussions successives des variations du courant i et de $E - e$, une très faible variation de vitesse de la réceptrice peut entraîner une grande diminution du courant et du moment moteur, c'est-à-dire, permettre l'établissement du nouvel équilibre.

279. — Si la résistance totale du circuit n'est pas faible, si en particulier, la distance des deux machines étant considérable, la résistance R_c des conducteurs qui les relie est grande, la stabilité d'équilibre sera toujours moindre que dans le cas précédent, avec les mêmes machines, mais restera grande encore. Elle pourra être augmentée, dans chaque cas particulier, par un choix judicieux des machines. Nous étudierons ce cas plus général de la manière suivante :

L'équilibre étant établi, la génératrice tourne à une vitesse constante V' et fournit un courant i avec une force électromotrice E . La réceptrice reçoit le courant i et tourne à la vitesse V en développant une force électromotrice e . Si l'on rompt l'équilibre par une diminution du moment résistant appliqué à la réceptrice, le moment moteur de cette dernière doit diminuer jusqu'à faire de nouveau équilibre au moment résistant réduit (51). Or, dans une réceptrice excitée en série, le moment moteur dépend uniquement de l'intensité du courant (61), le nouvel équilibre correspondra donc à une nouvelle intensité i_1 et nous voulons montrer qu'on peut choisir les machines de manière qu'on obtienne cette inten-

sité i_1 sans que la vitesse de la réceptrice ait dû pour cela augmenter beaucoup. A cette nouvelle valeur i_1 de l'intensité correspond, pour la génératrice, une nouvelle valeur E_1 de la force électromotrice, la vitesse restant, par hypothèse, égale à V' . La nouvelle valeur e_1 de la force contre-électromotrice de la réceptrice doit donc être telle qu'on ait

$$i_1 = \frac{E_1 - e_1}{R_g + R_c + R_r}.$$

Si la réceptrice est telle que cette valeur e_1 de la force électromotrice corresponde à i_1 , pour la même vitesse V qui donne e en même temps que i , elle continuera à tourner sensiblement à cette vitesse V ; il y aura bien un léger accroissement initial de vitesse, lors de la rupture de l'équilibre, mais il sera pratiquement négligeable. Si la réceptrice donne à la vitesse V , et pour l'intensité i_1 , une force électromotrice e'_1 inférieure à e_1 , sa vitesse devra augmenter jusqu'à la valeur V_1 qui donne e_1 en même temps que i_1 . Pour obtenir une vitesse sensiblement constante, on doit, connaissant les valeurs E , E_1 , etc., de la force électromotrice de la génératrice correspondant aux intensités i , i_1 , etc., pour la vitesse constante de rotation V' , choisir une réceptrice donnant, pour une vitesse constante V , des forces électromotrices e , e_1 , ..., correspondant aux intensités i , i_1 , ..., telles qu'on ait toujours

$$i = \frac{E - e}{R_g + R_c + R_r},$$

$$i_1 = \frac{E_1 - e_1}{R_g + R_c + R_r},$$

Graphiquement, cela revient à dire que si E est la caractéristique donnant la force électromotrice de la génératrice en fonction de l'intensité, à la vitesse V' (*fig. 39*), la caractéristique de la réceptrice donnant à la vitesse V sa force

électromotrice devra être e , telle qu'on ait toujours, pour une intensité quelconque OP ,

$$E - e = i(R_g + R_c + R_r).$$

La droite OR étant tracée de manière que la tangente de l'angle ROi soit égale à la résistance totale du circuit $R_g + R_c + R_r$, la différence AB des ordonnées AP et BP des caractéristiques E et e doit être égale à l'ordonnée CP de cette droite.

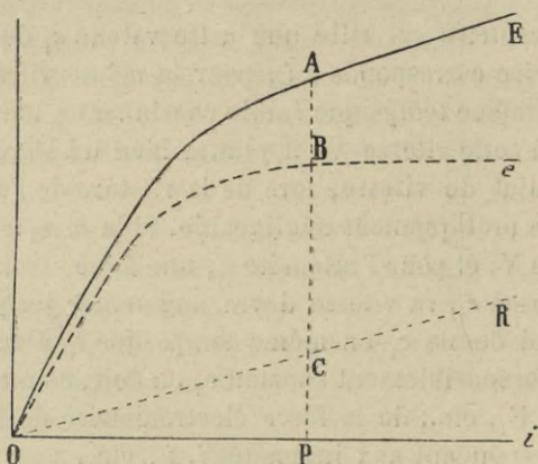


Fig. 39. — Transmission avec deux machines en série; caractéristiques.

280. — En résumé, on voit que la stabilité d'équilibre, dans une transmission au moyen de deux machines excitées en série, est plus faible, pour les grandes valeurs de l'intensité, que si la réceptrice est actionnée sous différence de potentiel constante, mais que la stabilité est, au contraire, considérablement augmentée pour les valeurs de l'intensité inférieures au courant de saturation. La vitesse ne prendra donc jamais de valeurs exagérées lorsqu'on diminuera beaucoup la charge du moteur et même lorsqu'on la supprimera complètement, comme c'était le cas dans les conditions examinées précédemment (65). Le réglage des électromoteurs sera donc toujours aisé.

281. — Il faut toutefois ne pas oublier que nous avons, dans ce qui précède, supposé constante la vitesse de la génératrice. Dans la pratique il faut songer qu'une diminution de la charge de la réceptrice entraînant une diminution de l'intensité du courant devra, au moins momentanément, provoquer une accélération de la vitesse de la génératrice et un accroissement de sa force électromotrice, ce qui ne peut que donner à la réceptrice des vitesses plus grandes qu'elle n'eût prises sans cela. Un bon régulateur de vitesse, sensible et rapide, est donc de rigueur pour la génératrice.

282. — On doit aussi remarquer que, si la génératrice et la réceptrice sont identiques, la vitesse de la réceptrice restera toujours inférieure à celle de la génératrice, puisque e est toujours plus petit que E . On voit encore ainsi que la vitesse de la réceptrice a pour limite la vitesse de la génératrice quand on supprime toute sa charge.

283. Rendement. — Le rendement électrique de la transmission a, comme précédemment (268), pour valeur

$$\eta_e = \frac{e}{E}.$$

Le rendement électrique, nul quand la réceptrice est immobilisée, croît constamment à mesure que la charge du moteur étant diminuée, sa vitesse augmente, que le courant diminue et que la force électromotrice e augmente. Il tend vers l'unité pour des valeurs très faibles du courant et de la charge.

Ce que nous avons dit (272) de l'emploi des potentiels élevés pour obtenir des rendements plus grands dans des conditions déterminées de circuit, ou pour réduire le capital d'installation, reste vrai ici, puisqu'on diminue toujours ainsi l'intensité du courant.

284. — Le rendement industriel, nul quand la vitesse

de la réceptrice est nulle, l'est encore lorsque toute charge est supprimée (273); il passe par un maximum. On peut lui appliquer la remarque précédente.

285. — La puissance électrique ei absorbée par la rotation de la réceptrice est nulle pour une vitesse nulle; elle prend aussi de faibles valeurs quand toute charge est supprimée, puisqu'alors l'intensité du courant devient très faible et que la force électromotrice e a pour limite E . Cette puissance passe donc par un maximum.

L'expression de cette puissance est

$$p = Ei - (R_g + R_c + R_r) i^2,$$

en écrivant qu'elle est égale à la puissance électrique totale développée par la génératrice diminuée de la puissance absorbée par l'échauffement du circuit total. On ne peut ici chercher le maximum en considérant i comme seule variable, puisque E n'est pas constante, au moins pour les valeurs de l'intensité ne saturant pas les inducteurs de la génératrice.

Voici comment on peut déterminer la valeur de l'intensité i pour laquelle p est maximum. Nous désignerons par R pour simplifier l'écriture, la résistance totale du circuit $R_g + R_c + R_r$; on a alors

$$p = Ei - Ri^2.$$

La génératrice tournant à vitesse constante, nous pouvons écrire

$$E = f(i),$$

d'où

$$p = if(i) - Ri^2.$$

Égalons à 0 la dérivée de p par rapport à l'unique variable i , il vient

$$f(i) + if'(i) - 2Ri = 0.$$

Si donc nous construisons les courbes

$$y = f(i) + if'(i)$$

et

$$y = 2Ri,$$

l'intensité i correspondant au maximum de p est l'abscisse du point de rencontre de ces deux courbes.

Si, dans la figure 40, la courbe OE représente la force

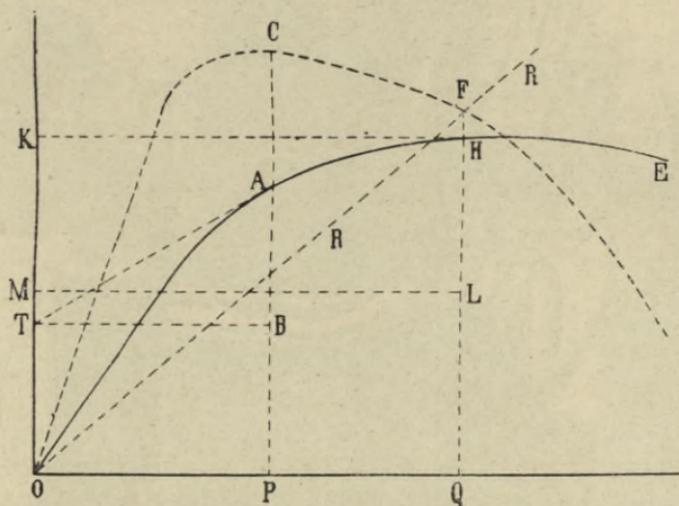


Fig. 40. — Transmission avec machines excitées en série; maximum de la puissance absorbée par la rotation de la réceptrice.

électromotrice E de la génératrice en fonction de l'intensité, en un point quelconque A, menons une tangente AT et tirons TB parallèle à l'axe des intensités OP. La tangente de l'angle ATB est $f'(i)$, puisque l'ordonnée AP est $f(i)$; on a donc

$$AB = TB \operatorname{tg} \text{ATB},$$

ou

$$AB = if'(i).$$

On construit donc la courbe

$$y = f(i) + if'(i)$$

en prolongeant l'ordonnée AP d'une quantité AC égale à AB. On a ainsi la courbe OCF.

D'autre part la courbe

$$y = 2Ri$$

est une droite OR faisant avec l'axe OP un angle dont la tan-

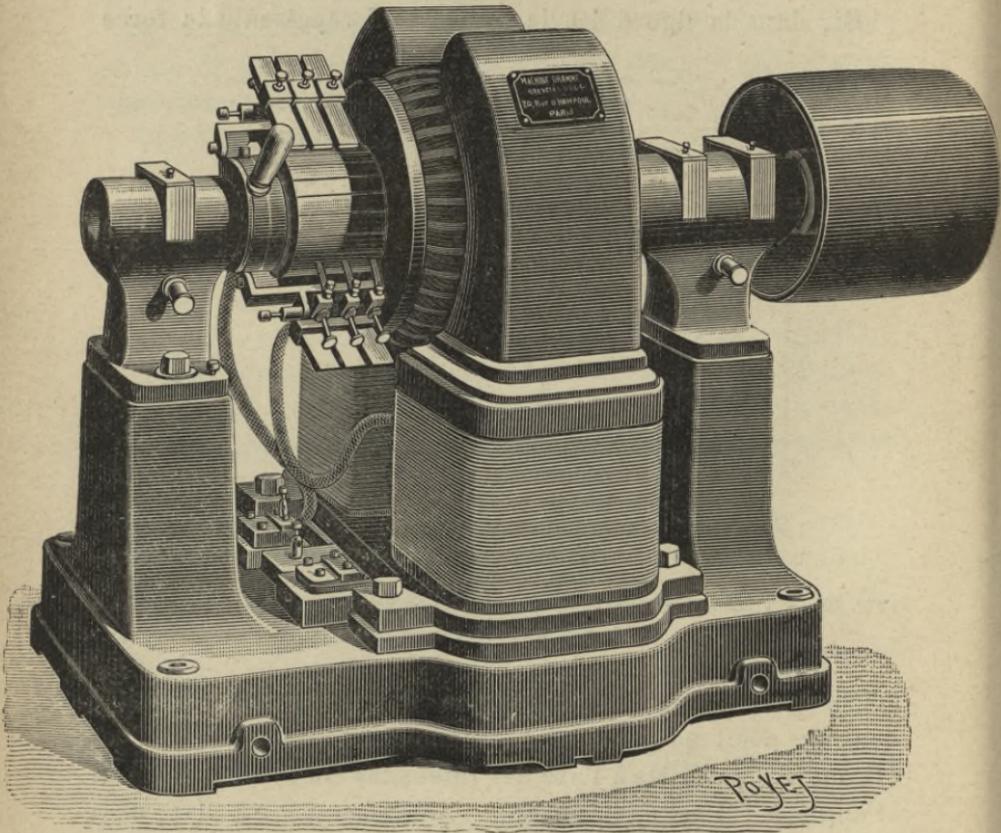


Fig. 41. — Machine Gramme, type supérieur.

gente est égale au double $2R$ de la résistance totale du circuit.

Le point de rencontre des deux courbes étant F, l'intensité correspondant au maximum de p est OQ.

La puissance électrique totale Ei développée par la géné-

ratrice est représentée par la surface du rectangle OQHK. Comme l'ordonnée FQ est égale à $2Ri$, la moitié QL est Ri et la surface du rectangle OQLM représente la puissance Ri^2 absorbée par l'échauffement des conducteurs du circuit. La puissance p absorbée par la rotation est donc représentée par le rectangle MLHK. Le rendement électrique de la transmission est donc inférieur à 0,50.

Ce problème graphique, dû à M. Hopkinson, peut servir de modèle à d'autres analogues.

286. Exemple de transmission avec deux machines excitées en série. — Nous donnerons comme exemple de transmission des expériences faites avec deux machines identiques établies par la Société Gramme, du type dit *supérieur* représenté par la figure 41 ; les noyaux des électroaimants, les masses polaires, les supports des axes et la plaque de fondation sont en fonte ; elles sont excitées en série.

Voici les données de construction et de fonctionnement normal de ces machines :

Vitesse normale (tours par minute).	1700			
Puissance en marche normale. . .	10	chev. vap.		
Induit.	{	Longueur	0,24	mètre.
		Diamètre	0,23	mètre.
		Résistance (en marche).	1,65	ohm.
		Diamètre du fil.	1,5	millim.
Inducteurs.	{	Résistance (en marche).	2,3	ohms.
		Diamètre du fil.	2,8	millim.
Longueur totale de la machine . . .		0,605	mètre.	
Largeur totale, poulie comprise. . .		0,865	mètre.	
Hauteur totale de la machine		0,570	mètre.	
Hauteur de l'axe		0,450	mètre.	
Poids total de la machine.	435		kilogr.	
Poids du cuivre	50		kilogr.	

Le tableau suivant donne les résultats d'expériences de transmission.

287. Expériences de transmission d'énergie mécanique avec deux dynamos excitées en série.

NOMBRES OBTENUS PAR DES MESURES DIRECTES.					NOMBRES CALCULÉS.						
GÉNÉRATRICE.			RÉCEPTRICE.		Généralités.		RÉCEPTRICE.		TRANSMISSION.		
Intensité du courant en ampères.	Différence de potentiel aux bornes en volts.	Vitesse en tours par minute.	Puissance mécanique absorbée en kilogrammes/s.	Vitesse en tours par minute.	Puissance mécanique utile développée en kilogrammes/s.	Conducteurs.	Force électromotrice en volts.	Différence de potentiel aux bornes en volts.	Force électromotrice en volts.	Rendement électrique.	Rendement industriel.
14,74	317	4200	638	980	369	0,4	375	315,5	287	0,685	0,578
11,8	300	4200	480	4050	275	0,4	347	298,8	252	0,726	0,573
8,7	286	4200	319	4140	179	0,4	320	285,4	251	0,784	0,560
14,74	416	1430	800	4200	505	0,4	474	414,5	356	0,751	0,631
14,74	393	1490	759	4240	467	0,4	451	394,5	333	0,738	0,615
14,74	392	1490	760	4110	418	2,1	450	361,0	303	0,673	0,550
11,8	368	1490	555	4295	338	0,4	415	366,8	320	0,771	0,609
14,75	440	1700	868	4480	550	0,4	498	438,5	380	0,763	0,630
11,8	432	1700	647	4575	412	0,4	479	430,8	384	0,801	0,638
5,2	300	1715	169	1500	78	40,3	321	246,4	225	0,704	0,460
8,8	400	1715	469	4080	169	15,3	435	265,4	228	0,524	0,360
14,86	544	1980	1072	1775	668	0,4	603	542,5	484	0,802	0,622

288. Remarques. — La force électromotrice de la génératrice indiquée comme calculée sur le tableau précédent est donnée par la relation

$$E = D' + iR_g,$$

qui exprime que la force électromotrice E de la génératrice est égale à la différence de potentiel entre ses bornes D' augmentée de la chute de potentiel dans la résistance R_g de cette génératrice.

On a la différence de potentiel D entre les bornes de la réceptrice en retranchant de la différence de potentiel D' aux bornes de la génératrice, la chute de potentiel iR_c dans les conducteurs reliant les deux dynamos, R_c étant la résistance de ces derniers.

Enfin, la force électromotrice e de la réceptrice s'obtient en retranchant de la différence de potentiel D' aux bornes de la génératrice, quantité donnée par la mesure, la chute de potentiel dans les conducteurs de résistance R_c et dans la résistance R_r de la réceptrice. On a, en effet,

$$i = \frac{D' - e}{R_c + R_r}.$$

Connaissant la différence de potentiel aux bornes de la réceptrice, l'intensité du courant, la puissance mécanique utile développée et la vitesse de rotation, on peut calculer, comme nous l'avons indiqué (56), les autres grandeurs intéressant la réceptrice.

Les rendements calculés sont les rendements électrique et industriel de la transmission, et non de la réceptrice seule (265).

289. — On peut vérifier sur le tableau précédent ce que nous avons dit en général des transmissions au moyen de dynamos en série.

En particulier, on fait les remarques suivantes :

1° Pour une même vitesse de rotation de la génératrice et

les mêmes conducteurs, le rendement électrique augmente quand le courant diminue. Le rendement industriel peut augmenter ou diminuer quand le courant diminue, puisqu'il passe par un maximum. Les nombres inscrits dans le tableau montrent d'ailleurs que les expériences ont été faites aux environs du rendement industriel maximum ; car les variations de ce rendement sont assez faibles pour des variations assez considérables de la puissance utile ou du courant ;

2° Pour la même vitesse de la génératrice et le même courant, mais pour des valeurs différentes de la résistance des conducteurs, la puissance mécanique absorbée par la génératrice restant la même, la puissance mécanique utile développée par la réceptrice est d'autant plus faible que la résistance des conducteurs est plus grande. Le rendement industriel varie avec cette résistance. Il faut observer cependant que la résistance des conducteurs variant de 0,1 à 2,1 ohms, le rendement industriel a baissé seulement de 0,615 à 0,550, la vitesse de la génératrice restant 1490 tours et l'intensité 14,74 ampères ;

3° Pour la même puissance développée et les mêmes conducteurs, le rendement augmente avec la vitesse de rotation de la génératrice, c'est-à-dire avec sa force électromotrice ;

4° En augmentant la vitesse de la génératrice, c'est-à-dire en employant pour la transmission des potentiels plus élevés, on peut obtenir le même rendement, malgré un accroissement de la résistance des conducteurs. On compare ici les expériences à 1200 tours, par exemple, avec les expériences à 1490 tours et une résistance des conducteurs de 2,1 ohms, au lieu de 0,1 ohm.

5° Quand les deux dynamos sont identiques, la vitesse de rotation de la réceptrice, tout en augmentant quand la charge diminue, reste toujours inférieure à la vitesse de la génératrice. La vitesse de la réceptrice augmente avec celle de la génératrice, pour la même charge.

290. — Nous compléterons le tableau d'expériences par l'analyse des causes de perte de puissance dans un des cas particuliers, analyse faite et relatée en même temps que les expériences elles-mêmes, par M. Hippolyte Fontaine, dans une étude sur les *Transmissions électriques*.

M. Fontaine a choisi l'expérience faite à la vitesse de 1700 tours pour la génératrice et avec une intensité de courant de 11,8 ampères, la résistance des conducteurs étant 0,1 ohm.

Voici le détail de la puissance perdue depuis les 647 kilogrammètres par seconde fournis à la génératrice, jusqu'aux 412 kilogrammètres par seconde développés par la réceptrice sur son arbre.

Puissance en kilogrammètres par seconde :

Absorbée par la courroie de la génératrice	16
Dépensée pour l'échauffement des conducteurs de la génératrice	56
Absorbée par les frottements mécaniques de la génératrice	22,6
Absorbée par l'hystérésis, les courants de Foucault dans la génératrice.	37
Dépensée pour l'échauffement des conducteurs reliant les deux dynamos	1,4
Dépensée pour l'échauffement des conducteurs de la réceptrice.	54
Absorbée par les frottements mécaniques de la réceptrice.	18
Absorbée par l'hystérésis, les courants de Foucault dans la réceptrice.	30
Utile développée sur l'arbre de la réceptrice et mesurée au frein.	412
Totale fournie à la génératrice.	647

EMPLOI POUR LES TRANSMISSIONS DE MACHINES EXCITÉES
EN DÉRIVATION ET A ENROULEMENT COMPOUND

291. Transmission avec deux dynamos excitées en dérivation. — Nous supposerons encore que la machine génératrice tourne à une vitesse constante. Dans ces conditions, la différence de potentiel aux bornes de la génératrice diminue quand l'intensité extérieure augmente, en vertu des propriétés particulières des machines excitées en dérivation.

La différence de potentiel aux bornes de la réceptrice, qui est égale à la différence de potentiel à la génératrice diminuée de la chute de potentiel dans les conducteurs réunissant les deux dynamos, diminue *à fortiori* quand l'intensité du courant augmente dans les conducteurs. Par conséquent, les variations de la différence de potentiel aux bornes de la réceptrice sont les mêmes que si cette réceptrice était reliée à deux points dont la différence de potentiel fût constante, par des conducteurs de résistance plus grande que ceux qui servent actuellement dans la transmission. Or nous avons vu (112) que dans ce cas le fonctionnement de l'électromoteur peut être instable, au moins pour les grandes valeurs de la charge, ou de l'intensité du courant dans l'induit.

292. — Si la génératrice est construite de façon à être sensiblement autorégulatrice de la différence de potentiel entre ses bornes, la cause d'instabilité n'en subsistera pas moins pour la réceptrice, si la résistance des conducteurs qui relie les dynamos n'est pas faible. Il faut alors, comme nous l'avons vu, ne pas appliquer au moteur, au démarrage, toute sa charge, mais seulement quand il s'est déjà mis en marche à une vitesse suffisante.

Même en utilisant la transmission en dehors des conditions d'instabilité que nous venons de signaler, la stabilité d'équilibre de l'électromoteur sera toujours moindre que lorsqu'une différence de potentiel constante est maintenue entre ses

bornes. En aucun cas on ne pourra obtenir l'autorégulation, c'est-à-dire une vitesse constante pour la réceptrice, malgré les variations du moment résistant qui lui est appliqué, si la résistance des conducteurs n'est pas négligeable.

293. — On remédie à ces inconvénients divers en agissant sur la génératrice de façon qu'elle maintienne aux bornes de la réceptrice une différence de potentiel constante ou même croissante avec l'intensité du courant, ce qui permettrait d'avoir l'autorégulation avec une réceptrice en dérivation quelconque. Ce résultat est obtenu en augmentant la vitesse de la génératrice, en réduisant la résistance d'un rhéostat d'excitation placé sur ses inducteurs, lorsque le courant augmente. Des organes automatiques peuvent d'ailleurs être installés pour effectuer ces diverses manœuvres.

294. Transmission avec une génératrice excitée en série et une réceptrice excitée en dérivation.

— Un cas intéressant, surtout au point de vue de la stabilité d'équilibre de l'électromoteur, est celui où la réceptrice étant une dynamo excitée en dérivation, la génératrice est excitée en série.

Tout d'abord supposons que l'équilibre entre le moment moteur de la réceptrice et le moment résistant qui lui est appliqué soit obtenu pour une certaine valeur i_a du courant dans l'induit avec un courant d'excitation i_d , une vitesse V et une différence de potentiel aux bornes D ; la génératrice tourne à la vitesse constante V' ; sa force électromotrice est E et le courant i qu'elle développe est égal à la somme $i_a + i_d$. On a toujours la relation

$$D = E - i(R_g + R_c),$$

R_g étant la résistance de la génératrice et R_c la résistance des conducteurs qui la relie à la réceptrice.

Lorsque l'intensité i est plus faible que celle qui sature les inducteurs de la génératrice, la force électromotrice E de

cette dernière diminue quand l'intensité diminue, de sorte que la différence de potentiel D entre les bornes de la réceptrice peut rester sensiblement constante malgré les variations de l'intensité i . Il est évident alors, si on se reporte à ce que nous avons dit (89) des électromoteurs excités en dérivation fonctionnant sous différence de potentiel constante, que la stabilité d'équilibre est toujours grande. La différence de potentiel D peut même, pour de certaines valeurs de la résistance $R_g + R_c$, diminuer avec l'intensité du courant ; il est clair qu'alors l'augmentation de la vitesse de la réceptrice provoquée par une diminution du moment résistant est combattue par la réduction de la différence de potentiel aux bornes (249).

295. — Mais le démarrage peut présenter certaines difficultés. La force électromotrice de la génératrice étant approximativement constante, pour les grandes valeurs de l'intensité du courant, l'électromoteur fonctionne dans les conditions étudiées (105) où la différence de potentiel est maintenue constante, non pas aux bornes du moteur, mais en deux points séparés des bornes par une résistance. Cette résistance est ici la somme assez grande de la résistance R_c des conducteurs reliant les dynamos et de la résistance R_g de la génératrice. Le moment moteur de la réceptrice n'est pas maximum au démarrage malgré la grandeur du courant dans l'induit, parce que le courant dérivé dans les inducteurs est faible. Ce moment moteur augmente d'abord, le démarrage effectué, avec la vitesse, et celle-ci doit donc s'accroître tout de suite assez considérablement. Une première conséquence est qu'on ne devra appliquer au moteur, pour le démarrage, que des efforts résistants très faibles ; pour mieux dire il devra démarrer à vide et n'être soumis que progressivement à des charges croissantes (112). C'est là déjà un inconvénient assez grave, pour certaines applications.

296. — De plus, comme nous venons de l'expliquer, la

vitesse prendra toujours dès le démarrage des valeurs considérables, parce que l'effort résistant appliqué est faible et que le moment moteur augmente avec la vitesse. Il en résultera donc une sorte d'emballement et il pourra se faire que la force électromotrice de la réceptrice augmentant rapidement sous l'influence de l'accroissement de la vitesse et aussi de l'augmentation du courant dérivé inducteur (107) devienne égale et même dépasse la différence de potentiel aux bornes établie par la génératrice.

Le courant changeant alors de sens momentanément tant dans l'induit de la réceptrice que dans les conducteurs qui la relie à la génératrice, les inducteurs de cette dernière seront inversés et le changement de sens du courant étant consolidé dès lors, la réceptrice s'arrêtera, puis se mettra à tourner en sens inverse de son mouvement primitif, parce que ses inducteurs conservent encore leur aimantation première à cause de leur grande self-induction. Ce mouvement inversé de l'induit de la réceptrice continuera jusqu'à ce que les inducteurs de cette machine aient eu aussi leur aimantation inversée par le courant venant de la génératrice. Alors la réceptrice s'arrêtant de nouveau reprendra son mouvement primitif, puisque le courant est inversé dans l'induit et les inducteurs. Mais alors, sauf l'inversion du sens du courant, on se retrouve dans les conditions du début ; la vitesse va donc s'accroître de nouveau jusqu'à provoquer une nouvelle inversion de courant, et ainsi de suite.

297. Emploi des machines à enroulement compound. — Le double enroulement des machines électriques a pour objet, la plupart du temps, quand ces machines sont destinées à alimenter directement des circuits, par exemple une installation d'éclairage par incandescence, de les rendre autorégulatrices de la différence de potentiel aux bornes. Encore faut-il observer que souvent, quand on alimente une installation d'éclairage où toutes les lampes sont en dérivation entre deux points séparés des bornes de la machine par

des conducteurs présentant une certaine résistance, on cherche à maintenir constante la différence de potentiel aux points de distribution et non plus aux bornes de la machine. On y parvient, lorsque la résistance des conducteurs n'est pas trop considérable, en *hypercompoundant* la dynamo, c'est-à-dire en donnant à l'enroulement en série une importance plus grande qu'à l'ordinaire, de telle sorte que la différence de potentiel aux bornes augmentant avec l'intensité du courant produit, on compense ainsi l'augmentation de la chute de potentiel dans les conducteurs.

298. — Quand il s'agit d'une transmission de puissance mécanique, on cherche encore à obtenir aux bornes de la réceptrice une différence de potentiel constante, ou mieux encore une différence de potentiel croissant avec l'intensité du courant. Ici, on n'a pas pour but d'assurer l'indépendance des appareils compris dans la distribution, comme dans l'installation d'éclairage que nous venons de citer, puisque la réceptrice est seule, ou que l'ensemble des réceptrices, si elles sont plusieurs, est disposé de manière qu'elles se comportent comme une seule ; on veut donner à la réceptrice une grande stabilité de fonctionnement, c'est-à-dire rendre sa vitesse peu variable, malgré de grandes variations possibles du moment résistant qui lui est appliqué. Nous avons vu, en effet, dans notre étude sur les divers modes d'excitation des électromoteurs et dans le chapitre consacré au réglage de ces appareils que la plus grande stabilité coïncidait toujours avec les conditions que nous venons d'indiquer comme desiderata pour la différence de potentiel (**226** et **244**).

299. — D'ailleurs, un cas déjà s'est présenté où nous avons indiqué comme possible l'autorégulation de la réceptrice, même excitée en série ; c'est celui où la génératrice, également excitée en série, fonctionne pour une intensité de courant inférieure au courant de saturation de ses inducteurs (**278**), et donne alors des forces électromotrices et même

des différences de potentiel aux bornes de la réceptrice croissantes avec l'intensité.

300. — Nous rappellerons, en passant, que le fonctionnement d'un électromoteur est toujours moins stable et même peut être instable, au démarrage, si la différence de potentiel entre ses bornes augmente lorsque l'intensité du courant diminue (**105**).

301. — Une génératrice à enroulement compound et autorégulatrice de la différence de potentiel entre ses propres bornes permettra d'avoir une différence de potentiel sensiblement constante aux bornes de la réceptrice, si la résistance des conducteurs reliant les deux machines est négligeable.

Lorsque la résistance des conducteurs, sans être trop considérable, a cependant une valeur notable, une génératrice un peu hypercompoundée permettra encore d'obtenir une différence de potentiel constante à la réceptrice.

Si la résistance des conducteurs est grande, l'hypercompoundage ne peut plus être réalisé dans des conditions satisfaisantes. Il faut agir sur la vitesse de la génératrice ou manœuvrer un rhéostat placé sur les conducteurs pour maintenir constante la différence de potentiel aux bornes de la réceptrice. Mais alors il est aussi commode d'employer une machine simplement excitée en dérivation comme génératrice et de faire varier son excitation.

Il résulte de là que l'emploi des génératrices à enroulement compound ne se justifie que pour les transmissions à faible distance.

302. — Avec une génératrice très hypercompoundée, où l'enroulement en série est alors prépondérant et une réceptrice en dérivation, on peut obtenir les renversements de marche que nous avons signalés comme possibles avec une génératrice en série (**296**).

Nous avons dit que l'emploi des machines à double enroulement comme réceptrices peut présenter certains avantages au point de vue de l'autorégulation, mais qu'il en résulte des complications pour la mise en marche (124).

ÉTABLISSEMENT D'UN PROJET DE TRANSMISSION ÉLECTRIQUE

303. Transmission en supposant nulle la résistance des conducteurs qui relient les deux machines. — Nous supposons qu'on fasse usage de deux machines excitées en série, placées à 10 kilomètres de distance et que la puissance mécanique disponible soit de 60 chevaux-vapeur. Comme on a intérêt, au double point de vue de l'économie dans l'installation et de l'accroissement du rendement (272), à employer des potentiels élevés, nous admettons que la force électromotrice de la génératrice soit égale à 2000 volts, ce qui est déjà un très haut voltage pratique pour les machines à courant continu du type Gramme actuellement construites.

Les deux machines génératrice et réceptrice sont identiques; leur résistance intérieure, induit et inducteurs, est supposée égale à 5 ohms.

304. — La génératrice absorbe une puissance mécanique de 60 chevaux ou 44160 watts; mais une partie est prise par les effets parasites.

Nous supposons que la puissance électrique totale développée par la génératrice soit égale à 0,92 de la puissance mécanique absorbée. La puissance électrique Ei développée est donc alors

$$Ei = 44160 \times 0,92 = 40627 \text{ watts.}$$

La force électromotrice E étant supposée égale à 2000 volts, on en déduit pour l'intensité du courant i

$$i = \frac{40627}{2000} = 20,31 \text{ ampères.}$$

La chute de potentiel, soit dans la génératrice, soit dans la réceptrice, est alors

$$20,31 \times 5 = 101,55 \text{ volts,}$$

de sorte que la différence de potentiel aux bornes de la génératrice est

$$2000 - 101,55 = 1898 \text{ volts.}$$

La force électromotrice e de la réceptrice est égale à la différence de potentiel aux bornes de la génératrice diminuée de la chute de potentiel dans les conducteurs de résistance ϱ reliant les deux machines et dans les conducteurs de la réceptrice

$$e = 1898 - 101,55 - 20,31 \times \varrho.$$

La puissance absorbée par l'échauffement de l'induit et des inducteurs de la génératrice est

$$5 \times 20,31^2 = 2062 \text{ watts.}$$

La puissance dépensée pour l'échauffement de la réceptrice est identique, si on suppose que les pertes du courant sur la ligne sont nulles.

L'intensité étant identique pour les deux machines, les vitesses sont entre elles comme les forces électromotrices.

La puissance perdue par les effets parasites dans la réceptrice est donc moins grande que dans la génératrice; nous admettrons qu'elle est réduite dans le rapport des vitesses ou des forces électromotrices.

305. — Nous supposerons d'abord que les deux machines sont réunies par des conducteurs de résistance nulle; voici quelles sont alors les conditions de la transmission.

Intensité du courant	20,31 ampères
Force électromotrice de la génératrice .	2000 volts

Différence de potentiel aux bornes.	1898 volts
Force électromotrice de la réceptrice.	1797 volts
Puissance mécanique fournie.	44160 watts
Puissance absorbée par les effets parasites de la génératrice.	3533 watts
Puissance électrique totale développée par la génératrice.	40627 watts
Puissance dépensée pour l'échauffement des conducteurs de la génératrice.	2062 watts
Puissance électrique totale utilisée par la réceptrice.	38565 watts
Puissance électrique absorbée pour l'échauffement de la réceptrice.	2062 watts
Puissance électrique absorbée par la rotation de la réceptrice.	36503 watts
Puissance absorbée par les effets parasites dans la réceptrice.	3174 watts
Puissance mécanique utile développée par la réceptrice.	33329 watts

Le rendement électrique de la transmission est alors (265)

$$\eta_e = \frac{36503}{40627} = 0,898.$$

Le rendement industriel de la transmission est

$$\eta_i = \frac{33329}{44160} = 0,754.$$

306. Influence de la résistance des conducteurs qui relient les machines. — Étudions maintenant l'influence, sur le rendement de la transmission, de la résistance des conducteurs reliant les machines.

On peut, ou bien se donner la résistance des conducteurs et calculer le rendement ; ou bien on part du rendement que l'on veut obtenir et on détermine la résistance des conduc-

teurs. Pour préciser, supposons qu'on veuille obtenir un rendement industriel égal à 0,50, c'est-à-dire rendre disponible sur l'arbre de la réceptrice une puissance mécanique utile égale à $44160 \times 0,50$ ou 22080 watts.

Quand la résistance du conducteur était nulle, la puissance mécanique utile était égale à 33329 watts; nous pouvons donc perdre $33329 - 22080$ ou 11240 watts dans les conducteurs.

L'intensité du courant étant toujours égale à 20,31 ampères, la résistance ρ des conducteurs est donnée par la relation

$$\rho \times \overline{20,31^2} = 11240,$$

d'où on tire

$$\rho = 27,25 \text{ ohms.}$$

La chute de potentiel dans les conducteurs est

$$27,25 \times 20,31 = 553,4 \text{ volts.}$$

307. — Les conditions de la transmission sont alors :

Génératrice.

Intensité du courant.	20,31 ampères
Force électromotrice.	2000 volts
Différence de potentiel aux bornes	1898 volts
Résistance (induit et inducteurs).	5 ohms
Puissance mécanique employée.	44160 watts
Puissance absorbée par les effets parasites	3533 watts
Puissance électrique totale développée. .	40627 watts
Puissance absorbée par l'échauffement	
de l'induit et des inducteurs.	2062 watts
Puissance électrique utile développée. .	38565 watts

Conducteurs.

Résistance.	27,25 ohms
Puissance absorbée par l'échauffement .	11240 watts

Réceptrice.

Force électromotrice.	1243 volts
Différence de potentiel aux bornes. . . .	1345 volts
Résistance (induit et inducteurs). . . .	5 ohms
Puissance électrique totale utilisée. . . .	27325 watts
Puissance absorbée par l'échauffement de l'induit et des inducteurs.	2062 watts
Puissance employée pour la rotation . . .	25263 watts
Puissance absorbée par les effets parasites	2196 watts
Puissance mécanique utile développée . .	23067 watts

Le rendement électrique de la transmission est $\frac{25263}{40627}$, ou 0,621.

Le rendement industriel est égal à $\frac{23067}{44160}$, ou 0,522.

Nous trouvons un rendement légèrement supérieur à celui que nous avons en vue, parce que nous avons, suivant nos conventions, réduit la puissance absorbée par les effets parasites de la réceptrice dans le rapport des forces électromotrices.

308. Prix des conducteurs. — Calculons maintenant la section des conducteurs, leur poids et leur prix.

Nous admettrons qu'on prenne pour confectionner les conducteurs du bronze siliceux de résistance spécifique α , à 20° C., égale à 1,86 microhm-centimètre.

La résistance ρ des conducteurs est

$$\rho^{\text{ohms}} = \frac{10 \times l^{\text{kilomètres}} \times \alpha^{\text{microhms-centimètre}}}{s^{\text{millim. carrés}}},$$

α étant la résistance spécifique,

l — la longueur des conducteurs,

s — la section des conducteurs.

Ici la distance des machines est supposée égale à 10 kilo-

mètres, ce qui donne une longueur de 20 kilomètres pour les deux conducteurs aller et retour. La résistance admise étant 27,25 ohms, on tire de la formule précédente

$$s = 13,8 \text{ millimètres carrés.}$$

Le poids des conducteurs est, pour une densité de 8,90,

$$P = 0,00138 \times 200000 \times 8,9 = 2456 \text{ kilogr.}$$

En admettant un prix de 2 fr. par kilogramme, on trouve, comme prix des conducteurs supposés nus, 4912 fr.

Le prix des machines peut être calculé, à raison de 200 fr. pour une puissance de 1000 watts, ou d'un kilowatt; on trouve ainsi, pour la génératrice et la réceptrice, environ 17000 fr.

Le prix des conducteurs est, on le voit, dans une proportion raisonnable avec le prix des machines.

309. — Nous ne voulons pas ici établir le devis d'une transmission réelle. Il faudrait alors faire entrer en ligne de compte, pour les conducteurs, les poteaux, les isolateurs et la pose; pour les machines, leur mise en place et surtout les constructions nécessaires pour les abriter; enfin il y aurait lieu de ne pas oublier la puissance mécanique elle-même que l'on veut transmettre, soit que cette puissance doive être fournie par une machine à vapeur, soit qu'on l'emprunte, *après aménagements convenables*, à une chute d'eau.

Ce n'est qu'en tenant compte des dépenses d'installation de toute espèce qu'on peut établir des comparaisons économiques entre les divers modes de transmission de la puissance mécanique et cela n'est possible que dans des conditions bien déterminées à l'avance.

Nous voulons seulement montrer comment varie le prix des conducteurs avec le rendement et la distance à laquelle se fait la transmission. Il suffit, pour cela, de refaire les calculs précédents en faisant varier le rendement, la distance et aussi la force électromotrice des machines.

Le tableau suivant renferme les résultats des calculs. Nous supposons toujours une puissance mécanique disponible de 60 chevaux-vapeur ; nous attribuons une résistance intérieure de 0,3 ohm aux machines de 500 volts et de 100 ohms aux machines de 10.000 volts.

310. Prix, en francs, des conducteurs d'une transmission électrique de puissance mécanique.

DISTANCE des machines en kilomètres.	RENDEMENT INDUSTRIEL.				
	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.
Force électromotrice de la génératrice égale à 500 volts.					
2	1650	2000	2600	4700	13700
10	41300	50600	65200	117200	342100
20	167200	202200	260900	468600	1368500
Force électromotrice de la génératrice égale à 2000 volts.					
2	"	130	200	300	900
10	2500	3300	4900	7500	22800
20	9900	14100	19600	29900	91300
Force électromotrice de la génératrice égale à 10000 volts.					
10	"	"	170	270	680
20	410	520	670	1100	2700

TRANSMISSIONS ÉLECTRIQUES EXPÉRIMENTÉES
OU EN EXPLOITATION

311. Expériences de M. Marcel Deprez. — Nous citerons d'abord les expériences successives de M. Marcel Deprez.

312. EXPÉRIENCE DE MUNICH; 1882. — La machine génératrice était placée à Miesbach, à 57 kilomètres de Munich, où se trouvait la réceptrice; les deux machines étaient excitées en série. Voici les données et les résultats de l'expérience :

Nombre de tours par minute, génératrice . . .	1611
— — — réceptrice. . .	752
Force électromotrice de la génératrice en volts.	1343
Intensité du courant en ampères.	0,52
Puissance mécanique absorbée à Miesbach en chevaux.	1
Puissance mécanique utilisée à Munich en chevaux.	0,25
Résistance de chaque machine en ohms. . . .	453
Résistance de la ligne en ohms.	950
Rendement industriel de la transmission . . .	0,25

313. EXPÉRIENCE DE LA GARE DU NORD; 1883. — Les deux machines génératrice et réceptrice étaient placées à Paris, l'une à côté de l'autre. Un fil télégraphique partant d'une borne de la génératrice allait passer au Bourget et revenait à une des bornes de la réceptrice, formant ainsi une boucle; la seconde borne de la génératrice était directement reliée à la seconde borne de la réceptrice. Les deux machines étaient excitées en série.

Les conditions de l'expérience étaient :

Nombre de tours par minute, génératrice. . .	590
— — — réceptrice . . .	365
Force électromotrice de la génératrice, en volts	1290
Intensité du courant en ampères	2,6
Puissance mécanique absorbée par la génératrice, en chevaux	6,20
Puissance mécanique utile développée par la réceptrice, en chevaux	2,03

Résistance intérieure de la génératrice, en ohms	56
Résistance intérieure de la réceptrice, en ohms.	86
Résistance de la ligne, en ohms.	160
Rendement industriel de la transmission. . .	0,327

314. EXPÉRIENCES DE CREIL ; 1885. — Les deux machines servant à la transmission étaient multipolaires et de grandeurs différentes ; toutes deux étaient excitées séparément par des machines spéciales et le démarrage s'opérait comme on l'a vu au n° 274. L'une des machines était à Paris, à la gare du Nord, l'autre à Creil à une distance de 56 kilomètres. La ligne était constituée par un câble en bronze siliceux équivalent à un fil de 5 millimètres de diamètre ; la résistance des 112 kilomètres de fil était égale à 100 ohms.

Voici quelles ont été les conditions d'une des expériences :

Nombre de tours par minute de la génératrice .	170
— — — de la réceptrice . .	277
Force électromotrice de la génératrice, en volts.	5717
Intensité du courant, en ampères	7,2
Résistance de l'ensemble des deux machines, en ohms	70
Résistance de la ligne, en ohms.	100
Puissance mécanique absorbée par la génératrice, en chevaux	71,3
Puissance mécanique utile développée par la réceptrice, en chevaux.	36,2
Rendement industriel	0,51
Poids total des dynamos, en tonnes.	70

315. Expérience de M. Hippolyte Fontaine ; 1886. — M. Hippolyte Fontaine a réalisé, au moyen de dynamos Gramme ordinaires couplées en tension, une transmission dans des conditions analogues à celles de l'expérience précédente de M. Marcel Deprez.

Quatre dynamos excitées en série et couplées en tension

étaient commandées par un arbre commun; en somme ces quatre machines en constituaient ainsi une seule servant de génératrice. Trois dynamos identiques aux précédentes étaient également couplées en tension et leurs arbres étaient rendus solidaires par des manchons d'accouplement Raffard; on avait là ainsi une réceptrice unique. Les génératrices étaient reliées aux réceptrices par des conducteurs présentant une résistance de 100 ohms environ, comme dans l'expérience de Creil.

Les sept machines identiques employées présentaient une résistance de 4,75 ohms pour l'induit et de 6,65 ohms pour l'inducteur.

316. — L'expérience a donné les résultats suivants :

Nombre de tours des génératrices	1298
— . — réceptrices	1120
Différence de potentiel développée par les génératrices à l'origine de la ligne, en volts	5996
Intensité du courant en ampères	9,34
Puissance absorbée par les génératrices en chevaux	95,88
Puissance mécanique utile développée par les réceptrices, en chevaux	49,98
Rendement industriel	0,52
Poids total des dynamos, en tonnes	8,4

317. Transmission de Domène. — Une des plus importantes transmissions électriques de la puissance mécanique effectuée au moyen de courants continus est celle des papeteries de Domène (Isère) installée par M. Hillairet. L'usine génératrice de *la Force* est placée sur le Doménon, petit affluent de l'Isère; elle est distante de 5 kilomètres de la papeterie du Moutier qu'elle doit actionner. Les conducteurs nus reliant les deux usines sont supportés par des poteaux; leur section est de 50 mm².

A l'usine de *la Force*, la dynamo génératrice est actionnée directement par une turbine à axe horizontal ; une seule réceptrice est reliée à cette génératrice par les deux câbles aériens formant la ligne. Les deux dynamos sont excitées en série.

Voici les conditions générales de cette installation :

Génératrice.	}	Puissance maxima absorbée	300 chevaux
		Vitesse maxima	240 tours par min.
		Force électromotrice maxima	2850 volts
		Intensité maxima du courant	70 ampères
		Résistance des inducteurs	0,950 ohm
		Résistance de l'induit	0,984 ohm
Réceptrice.	}	Puissance maxima développée	200 chevaux
		Vitesse maxima	300 tours par min.
		Résistance des inducteurs	0,751 ohm
		Résistance de l'induit	0,690 ohm
Ligne.	}	Longueur	5 kilomètres
		Résistance	3,474 ohms
Rendement électrique calculé d'après			
les résistances			0,83
Rendement industriel moyen			0,65

318. Usine centrale de Pontrésina. — La petite ville de Pontrésina est située dans une des vallées latérales de l'Inn ; à 6 kilomètres de là on dispose d'une belle chute formée par le torrent du Bernina qui sort du glacier de Morteratsch. Cette chute fournit la puissance motrice à l'usine génératrice. Des dynamos génératrices à courant continu, groupées comme nous l'indiquerons tout à l'heure, produisent un courant qui va à Pontrésina, actionner des réceptrices.

Celles-ci sont en réalité des transformateurs à courant continu. Ils consistent en deux dynamos ayant chacune leur champ magnétique et leur induit, mais ayant un axe et un bâti communs. L'une de ces dynamos tournant comme électromoteur sous l'influence du courant venant de l'usine génératrice entraîne l'autre et cette dernière, que nous appellerons dynamo à lumière, produit à son tour un courant qui alimente le circuit d'éclairage de la ville de Pontrésina. On a bien là une transmission de puissance mécanique depuis la chute du Bernina jusqu'à Pontrésina ; mais les électromoteurs mis en action, au lieu d'entraîner les appareils d'une usine, comme dans l'exemple précédent, fournissent la puissance motrice nécessaire pour mettre en mouvement des dynamos servant à l'éclairage. De sorte que pour obtenir ce qu'on utilise, c'est-à-dire de l'énergie électrique, on la produit d'abord à l'usine génératrice en consommant de l'énergie mécanique ; puis on la retransforme dans les électromoteurs de l'usine réceptrice en énergie mécanique, laquelle, en dernier lieu, donne enfin, par une nouvelle transformation dans les dynamos à lumière, l'énergie électrique utilisée.

319. — Il semble plus économique *à priori* d'éviter une partie de ces transformations successives en utilisant directement pour l'éclairage le courant électrique développé par l'usine génératrice. Mais les lampes fonctionnant avec une différence de potentiel peu élevée de 120 volts, l'intensité du courant nécessaire atteint le chiffre assez grand de 800 ampères et les 12 kilomètres de conducteurs nécessaires pour canaliser un pareil courant auraient coûté un prix énorme. La double transformation supplémentaire qu'on fait subir à l'énergie absorbe certainement une fraction notable de cette énergie, mais elle procure une économie considérable dans les frais d'installation, parce que la transmission de l'énergie mécanique pouvant se faire à haute tension, n'exigera que des conducteurs de dimensions restreintes (271). Pour en terminer une fois pour toutes avec les dynamos à lumière, nous

dirons qu'elles sont excitées en dérivation et donnent chacune à pleine charge 280 ampères, sous 130 volts de différence de potentiel aux bornes ; elles sont couplées en quantité sur le circuit d'éclairage.

320. — A l'usine génératrice quatre dynamos système Alioth, à 4 pôles, excitées en série, actionnées chacune par une turbine, sont couplées en tension. A la vitesse normale elles donnent 34 ampères et 1500 volts aux bornes, de sorte que les 4 dynamos couplées donnent au commencement de la ligne 6000 volts.

La ligne, d'une longueur de 6 kilomètres, est en fil de cuivre de 5 millimètres de diamètre ; elle est aérienne et supportée par des isolateurs à huile. La chute de potentiel à pleine charge est de 480 volts environ, ce qui donne pour la résistance des deux conducteurs, aller et retour, une valeur de 14 ohms environ.

A l'usine réceptrice de Pontrésina, quatre électromoteurs excités en série conduisant chacun une dynamo à lumière sont également couplés en tension avec la ligne. Les fils des électro-aimants sont subdivisés en 6 sections afin de faciliter la mise en marche, comme nous allons le voir.

Toutes les génératrices et les réceptrices ne sont pas toujours en action ; au fur et à mesure des besoins de l'éclairage on met en marche un nombre plus ou moins grand de génératrices et de réceptrices, une génératrice et une réceptrice étant d'ailleurs toujours mises en circuit ou retirées ensemble. Lorsqu'une dynamo ne doit pas être utilisée, ses deux bornes sont mises en court-circuit ; si elle est génératrice, il faut tout d'abord, bien entendu, la stopper.

321. — Supposons donc qu'il y ait actuellement en marche une génératrice et une réceptrice ; les autres génératrices et réceptrices sont stoppées et en court-circuit, le circuit d'éclairage est alimenté par la seule dynamo à lumière en mouvement, les dynamos à lumière stoppées ont leur circuit

ouvert. Si, à un moment donné, la charge de la dynamo en action paraît trop grande, on met en marche une nouvelle paire de machines¹.

Pour cela, le mécanicien de l'usine génératrice étant prévenu, rompt le court-circuit de la génératrice n° 2 qui se trouve alors insérée dans le circuit de la première, mais comme une résistance inerte, car cette opération se fait *au repos*; un levier d'encliquetage empêche que la dynamo mise en circuit ne fonctionne comme moteur en tournant en sens inverse de sa rotation normale. Le courant dans la ligne et la tension à l'usine réceptrice n'ont donc pas subi de variations appréciables, à cause de la faiblesse relative de la résistance de la machine mise nouvellement en circuit. On fait ensuite marcher graduellement la turbine qui commande cette machine. A ce moment, le voltmètre de l'usine réceptrice mis en dérivation aux bornes de la réceptrice n° 1, actuellement en action, commence à indiquer une différence de potentiel plus grande, au fur et à mesure que la génératrice n° 2 ajoute sa force électromotrice à celle de la génératrice n° 1. C'est le moment de mettre en circuit la réceptrice n° 2. Cette réceptrice est sans charge, puisque, comme nous l'avons dit, la dynamo à lumière qu'elle conduit a son circuit ouvert. Si l'on veut ne modifier que d'une manière insensible les conditions de fonctionnement des appareils déjà desservis, au lieu d'introduire dans le circuit la réceptrice n° 2 en bloc, on introduit successivement les 6 sections de l'inducteur, c'est-à-dire d'abord l'induit et une section, puis la deuxième section et ainsi de suite, au fur et à mesure que la différence de potentiel monte aux bornes de la réceptrice n° 1 sous l'influence de la force électromotrice croissante de la génératrice n° 2. Quand cette dernière a pris sa vitesse normale, la réceptrice n° 2 tout entière est en circuit; on peut alors coupler la dynamo à lumière correspondante avec celle déjà en action.

1. *L'Électricien*, 2^e série, t. IV, p. 94.

§ 2. — Distribution de l'énergie mécanique.

PRINCIPAUX MODES DE DISTRIBUTION

322. Généralités. — La distribution électrique de l'énergie mécanique se ramène en réalité à une distribution d'énergie électrique, puisque les électromoteurs consomment celle-ci pour engendrer l'énergie mécanique. Les conditions générales de la distribution de l'énergie électrique restent les mêmes, que cette énergie électrique soit ensuite transformée en lumière dans des lampes, en énergie mécanique dans des électromoteurs, en énergie chimique dans des accumulateurs, ou autres appareils d'électrolyse. Sans recommencer l'étude générale de la distribution faite déjà à propos de la lumière électrique¹, nous rappellerons seulement les grandes lignes de cette étude, en visant particulièrement les électromoteurs.

323. — Les divers électromoteurs à actionner par le courant produit par la source génératrice peuvent être placés à la suite les uns des autres sur le même circuit; la distribution est dite alors en *tension* ou en *série*. Les électromoteurs peuvent aussi être tous établis en *dérivation* entre deux points reliés aux bornes de la source électrique. Enfin, dans quelques cas particuliers, la distribution est *mixte*, c'est-à-dire que les électromoteurs étant répartis sur un certain nombre de dérivations, plusieurs d'entre eux peuvent être placés en tension sur la même dérivation. Nous allons examiner ces trois genres de distribution.

324. Distribution en tension, ou à intensité constante. — Tous les électromoteurs étant placés à la suite les uns des autres dans le même circuit, l'intensité du

1. H. Leblond, *Électricité expérimentale et pratique*, t. III, p. 357.

courant qui les traverse est la même pour tous. Il en résulte tout d'abord que leur puissance ne peut différer que par la force contre-électromotrice qu'ils développent. En second lieu, si l'on veut obtenir l'indépendance des différents électromoteurs, l'intensité du courant doit demeurer constante, malgré les variations de l'effort résistant appliqué à un moteur quelconque, malgré l'arrêt ou la mise en marche d'un ou plusieurs moteurs. On conçoit, en effet, que si, une variation de l'effort résistant appliqué à l'un des moteurs entraînant une modification dans l'intensité du courant qui passe non seulement dans ce moteur particulier, mais aussi dans tous les autres, le moment moteur de ces derniers était diminué ou augmenté, sans que leur moment résistant ait changé, leur vitesse diminuerait ou augmenterait.

325. — Mais si l'intensité du courant est maintenue constante, et il faut pour cela disposer d'une source spéciale, nous savons que la stabilité d'équilibre des électromoteurs est très faible pour les moteurs en série (77) et que les moteurs en dérivation ont un fonctionnement tout à fait instable pour les faibles vitesses (117). La vitesse d'un même électromoteur sera donc très variable avec l'effort résistant. Il importe même de remarquer que si les électromoteurs sont excités en série, on ne pourra régler leur vitesse, c'est-à-dire la maintenir approximativement constante, par une manœuvre autre que celle qui consisterait à rendre à l'effort résistant sa valeur primitive (258). Des électromoteurs excités en dérivation ne pourront être réglés que si leurs inducteurs sont saturés (259); encore leur mise en marche sera-t-elle délicate.

326. — En résumé, dans une distribution en tension, ou bien l'intensité du courant n'est pas maintenue constante par la source et alors les électromoteurs ne sont pas indépendants, toute cause modificatrice de la vitesse de l'un d'eux faisant aussi varier la vitesse des autres; ou bien l'intensité est

maintenue constante et alors la stabilité de fonctionnement des moteurs est très faible et leur réglage impossible ou difficile.

La distribution en tension ne convient donc que pour alimenter des électromoteurs attelés à un travail régulier, n'éprouvant que des modifications peu importantes.

327. Distribution en dérivation ou sous différence de potentiel constante. — Lorsque tous les

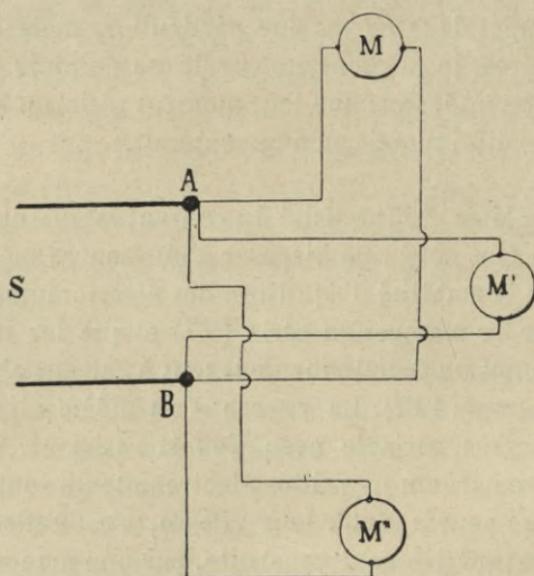


Fig. 42. — Distribution en dérivation.

électromoteurs M , M' , M'' actionnés par la source S sont placés chacun sur une dérivation établie entre deux points A et B (fig. 42), si on veut en assurer l'indépendance, il faut que la différence de potentiel entre les points de dérivation A et B soit maintenue constante par la source, malgré les variations de la vitesse des moteurs et du moment résistant qui leur est appliqué. Considérons le moteur M , par exemple. Désignons par D la différence de potentiel entre ses bornes, par D' la différence de potentiel entre les points de dérivation

A et B, par φ la résistance des conducteurs reliant A et B aux bornes du moteur, i étant l'intensité du courant qui les parcourt. On a toujours

$$D = D' - i\varphi.$$

Si le moteur est excité en série, on a aussi

$$i = \frac{D - e}{r_a + r_g},$$

r_a et r_g étant les résistances de l'induit et des inducteurs et e la force contre-électromotrice. En remplaçant i par sa valeur dans l'équation précédente, il vient

$$D = \frac{D'(r_a + r) + e\varphi}{r_a + r_g + \varphi}.$$

Si l'on a affaire à un moteur excité en dérivation, on a

$$i = i_a + i_d,$$

et

$$i_a = \frac{D - e}{r_a},$$

avec

$$i_d = \frac{D}{r_d}.$$

En remplaçant i par sa valeur dans l'équation primitive

$$D = D' - i\varphi,$$

il vient

$$D = \frac{D' r_a r_d + e r_d \varphi}{r_a r_d + r_d \varphi + r_a \varphi}.$$

328. — Quel que soit le mode d'excitation, on voit donc que la différence de potentiel D aux bornes du moteur est reliée à la différence de potentiel D' aux points de dérivation

par une relation ne comprenant que les résistances des diverses parties du circuit et la force électromotrice e .

Par suite, le moment résistant appliqué au moteur restant fixe, si la différence de potentiel D' varie, D variera également et la vitesse du moteur sera modifiée, comme nous l'avons vu (223 et 249), alors qu'elle fût restée constante si D' avait elle-même conservé la même valeur. Par suite la différence de potentiel D' doit rester constante pour que le fonctionnement du moteur soit indépendant, c'est-à-dire pour que sa vitesse n'éprouve que des variations dues aux modifications apportées à son propre moment résistant et non pas à des causes externes, telles que les variations du moment résistant des autres moteurs.

329. — Nous savons d'ailleurs (74 et 111) que dans ces conditions le fonctionnement du moteur est d'autant plus stable, c'est-à-dire que les variations de sa vitesse dues aux modifications de son moment résistant sont d'autant plus faibles, que la résistance ρ étant elle-même plus petite, la différence de potentiel D aux bornes est plus voisine de la différence de potentiel D' qui est constante. De sorte que le but final vers lequel on doit tendre est non seulement d'assurer aux points de dérivation A et B une différence de potentiel constante, mais encore de disposer les dérivations de manière que la différence de potentiel aux bornes de chaque moteur reste elle-même approximativement constante.

Nous avons vu (245) qu'il est toujours avantageux, lorsque le moteur est excité en dérivation, et que les conducteurs qui relient ses bornes aux points où la différence de potentiel est maintenue constante n'est pas très faible, de prendre la dérivation des inducteurs entre ces derniers points et non plus aux bornes ou aux balais du moteur.

330. Distribution mixte. — Si l'on est conduit à placer en tension plusieurs électromoteurs sur la même dérivation, tels que les électromoteurs M et M_1 sur la dérivation

aboutissant aux points A et B (*fig. 43*), il faut d'abord, afin que le fonctionnement des moteurs placés sur une dérivation quelconque soit indépendant du fonctionnement des autres moteurs, que la différence de potentiel soit constante entre A et B. On peut ainsi rendre le fonctionnement des moteurs M et M_1 indépendant des autres; mais le fonctionnement de l'un de ces moteurs reste lié intimement au fonctionnement de l'autre. En effet, la différence de potentiel entre A et B

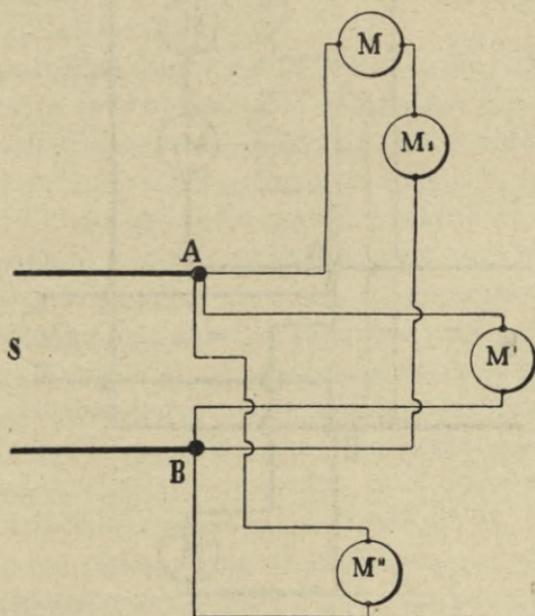


Fig. 43. — Distribution mixte.

étant maintenue constante, l'intensité du courant dans la dérivation AMM_1B ne peut en même temps rester constante. Toute variation de vitesse se produisant dans l'un des moteurs placés sur la même dérivation se traduisant par une variation de l'intensité du courant qui le parcourt provoquera une variation de vitesse correspondante dans les autres moteurs. Ce mode d'installation ne sera donc légitime, en dehors du cas où les moteurs sont appliqués à un travail sans variations, que si les moteurs placés en tension ont des moments résis-

tants qui éprouvent simultanément des variations correspondantes et équivalentes. Comme nous verrons plus loin une application de ce système de distribution, nous allons entrer dans quelques détails à ce sujet.

331. — Pour simplifier et nous mettre en même temps dans les conditions réalisées dans cette application, nous

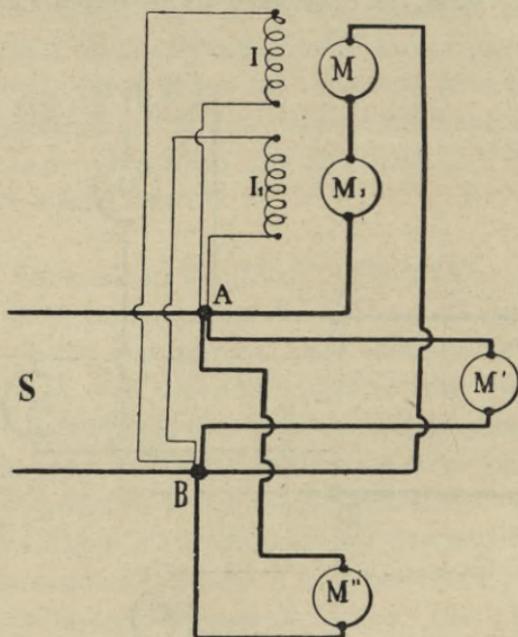


Fig. 44. — Distribution mixte avec moteurs excités en dérivation.

supposerons avoir affaire à deux électromoteurs excités en dérivation, mais dont les inducteurs I et I_1 sont dérivés aux points A et B (fig. 44) où la différence de potentiel est maintenue constante. Les induits seuls des deux moteurs sont en tension sur le même branchement $A M M_1 B$.

Supposons l'équilibre établi pour une intensité de courant i_a dans les deux induits et donnée par la relation

$$i_a = \frac{D' - e - e_1}{r_a + r_{a1} + \rho}$$

dans laquelle D' est la différence de potentiel constante entre A et B, e et e_1 les forces électromotrices des moteurs M et M_1 , r_a et r_{1a} leurs résistances, et ρ la résistance des conducteurs.

Si le moment résistant appliqué au moteur M diminue, sa vitesse V va augmenter et devenir V' , de manière à donner à sa force électromotrice une valeur plus grande e' , à réduire l'intensité du courant et à donner à son moment moteur une valeur plus faible permettant de nouveau l'équilibre. Soit i'_a la nouvelle intensité du courant.

Mais l'intensité ayant pris la valeur i'_a plus faible que i_a , non seulement dans le moteur M, mais aussi dans le moteur M_1 , le moment moteur de ce dernier a été réduit et si son moment résistant n'a pas changé, sa vitesse V_1 va diminuer et devenir V'_1 telle que la force électromotrice e'_1 plus faible qui en résulte provoque un rehaussement de l'intensité du courant jusqu'à la valeur primitive i_a , de façon que le moment moteur reprenne aussi sa première valeur. Mais alors, le moment moteur de M ayant été aussi accru du même coup, sa vitesse va augmenter de nouveau et prendre une valeur V'' plus grande que V' jusqu'à ce que l'intensité tombe de nouveau à la valeur i'_a et ainsi de suite, la vitesse du moteur M augmentant successivement et la vitesse de M_1 diminuant. En réalité, les variations ne se produisent pas ainsi par à-coups et successivement, mais d'une manière continue, de telle sorte que lorsque la vitesse de M tend à augmenter pour diminuer l'intensité du courant i_a , la vitesse de M_1 tend à diminuer pour augmenter cette intensité ; mais le résultat est le même : augmentation considérable de vitesse pour M et diminution non moins importante de vitesse pour M_1 . Il y a là, on le voit, un dérèglement mutuel des deux moteurs qui rend difficile l'emploi d'une pareille disposition.

332. — Supposons maintenant que lorsque le moment résistant opposé au moteur M diminue, il en est de même simultanément pour le moment résistant opposé au moteur

M_1 . La vitesse des deux moteurs augmente alors en même temps. Si la réduction proportionnelle du moment résistant a été la même pour les deux moteurs, les moments moteurs doivent être également réduits dans la même proportion. L'équilibre avait lieu primitivement pour la même intensité i_a circulant dans les deux moteurs ; le nouvel équilibre s'obtiendra également pour la même intensité i'_a . Loin de se dérégler mutuellement, les deux moteurs se régleront l'un l'autre, puisque l'augmentation de la vitesse du moteur M , par exemple, tout en diminuant le courant dans ce moteur diminue aussi le courant dans M_1 , comme il le faut pour obtenir le nouvel équilibre.

On conçoit même que, la réduction des moments résistants ayant été produite simultanément pour les deux moteurs, si la vitesse de l'un d'eux M , par exemple, augmente plus vite que celle de M_1 , celui-ci n'éprouve qu'une augmentation de vitesse très faible, puisque son moment moteur aura pu être réduit suffisamment par le seul fait de l'accroissement de la vitesse de M . Il est vrai que cette dernière aura dû alors croître plus que si l'augmentation de vitesse des deux moteurs avait concouru également à réduire l'intensité du courant.

On se trouvera dans les conditions que nous venons d'indiquer si les deux moteurs M et M_1 sont employés à faire mouvoir le même appareil, les variations de l'effort résistant étant alors simultanées et proportionnelles pour les deux moteurs.

DISTRIBUTION A BORD DES NAVIRES

333. Mode de distribution adopté. — A bord des navires, la distribution électrique de la puissance mécanique se fera en dérivation, avec différence de potentiel constante aux points de dérivation. L'économie dans les conducteurs qui est l'avantage presque unique de la distribution en tension,

à cause de la réduction de l'intensité du courant, est ici d'une importance secondaire étant donnée la faible distance à la source des divers électromoteurs à actionner. Nous pouvons ajouter qu'il en est de même, en général, pour les distributions dans les ateliers.

Ce que l'on doit surtout rechercher, c'est l'indépendance des moteurs. Le service qu'on exige d'eux est, en effet, essentiellement variable, au moins pour le plus grand nombre des applications. Nous avons vu que la distribution en tension ne peut convenir puisque ou bien les électromoteurs ne sont pas indépendants, ou bien ils ne peuvent être réglés (326). On aura donc recours à la distribution en dérivation. Toutefois, dans quelques cas particuliers, il pourra être avantageux d'employer le système de distribution mixte, c'est-à-dire de placer plusieurs électromoteurs sur la même dérivation, à la condition que ces électromoteurs soient appliqués au même travail, ou à des travaux intimement liés (332).

334. Installation des circuits. — Le système général de distribution de la puissance mécanique à bord des navires ressemble donc au système de distribution de la lumière électrique, sauf qu'en raison du nombre relativement faible des électromoteurs à actionner, le réseau des conducteurs est plus simple que s'il s'agit de lampes électriques.

La source électrique E, généralement une dynamo, a ses deux bornes reliées par des *conducteurs principaux* P à une *bande de distribution* A et à une *bande de retour* B (fig. 45). De ces bandes A et B partent des *conducteurs secondaires* S, S', qui se rendent à chacun des électromoteurs M à alimenter. Sur chacun des conducteurs secondaires aboutissant à la bande de distribution A est intercalé un interrupteur H permettant de fermer ou de rompre le circuit correspondant. Sur tous les conducteurs principaux et secondaires, à leur origine, sont placés des fils fusibles F.

La différence de potentiel est maintenue constante entre A et B ; c'est donc là que doivent être prises toutes les déri-

vations, si l'on veut que le fonctionnement de tous les électromoteurs soit absolument indépendant. Cependant on peut greffer sur le même branchement secondaire S, au moyen de conducteurs tertiaires T_1, T_2, T_3 , un certain nombre d'électromoteurs M_1, M_2, M_3 , pourvu que ceux-ci soient appliqués à un travail sans variations importantes, tels, par exemple, que des ventilateurs. Au contraire, si les électromoteurs greffés sur le même conducteur secondaire fonctionnent à

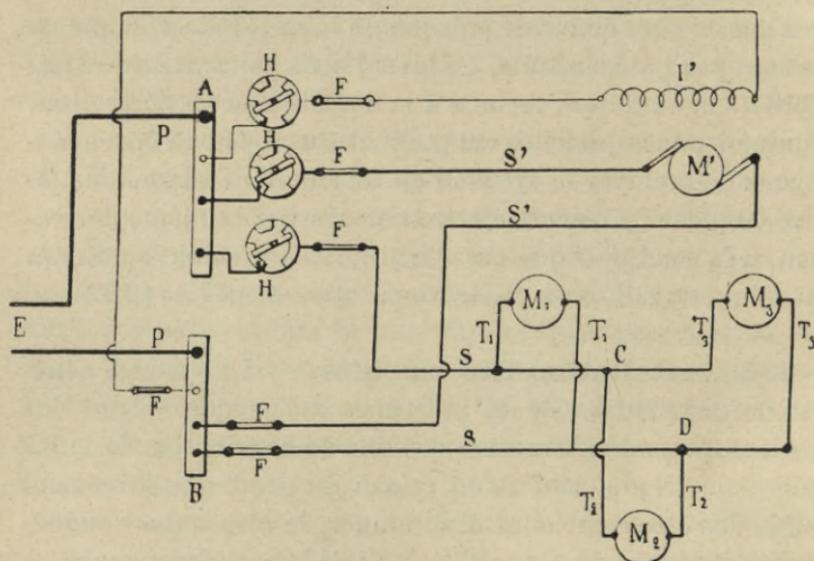


Fig. 45. — Système de distribution à bord des navires.

régime variable, ils s'influenceront réciproquement, puisque la différence de potentiel entre les points C et D où sont greffés les conducteurs tertiaires T_2 , aboutissant à l'un d'eux M_2 dépend essentiellement de l'intensité du courant circulant dans les conducteurs secondaires depuis A et B jusqu'à C et D et celle-ci dépend non seulement du fonctionnement particulier du moteur M_2 , mais encore du fonctionnement des moteurs M_1 et M_3 .

En particulier, si le moment résistant appliqué au moteur M_3 diminue, sa vitesse augmente et le courant traversant les

conducteurs T_3 comme aussi les conducteurs secondaires S diminue ; mais alors la chute de potentiel dans ces conducteurs diminuant, la différence de potentiel aux points de branchement des conducteurs T_2 aboutissant à M_2 augmente ; la vitesse du moteur M_2 doit donc augmenter comme celle du moteur M_3 .

Cependant ces influences réciproques n'auront d'importance que si la résistance des conducteurs secondaires a une valeur notable. Il est clair que si cette résistance est très faible, greffer le moteur M_2 aux points C et D revient à le greffer en A et B . Il y aura, dans chaque cas particulier, une étude à faire de la section des conducteurs secondaires et du mode de liaison des moteurs, de façon à obtenir le système le plus économique et assurant en même temps le meilleur fonctionnement général de l'installation. Tout ce que nous avons dit de l'indépendance des moteurs, de leur stabilité et de la facilité de réglage, pousse à munir chaque moteur de conducteurs secondaires spéciaux et à donner à ceux-ci une résistance très faible, c'est-à-dire une grande section. Mais le prix des conducteurs nécessaire à l'installation ne peut qu'être augmenté par ces dispositions. Il faut observer qu'il y aura lieu d'être exigeant à propos des circuits des moteurs pour lesquels il est le plus important d'avoir un fonctionnement bien réglé et indépendant et de faire des économies de conducteurs pour les moteurs dont les variations de vitesse sont sans grande importance, nous avons déjà cité les ventilateurs et nous reviendrons sur cette question quand nous aurons étudié les divers électromoteurs mis en service à bord des navires et comparé leur degré d'importance.

335. Modes d'excitation des moteurs. — Nous rappelons que, d'une manière générale, les moteurs excités en dérivation ont une stabilité de fonctionnement plus grande que les moteurs excités en série, sous différence de potentiel constante ; c'est donc à eux qu'il faut de préférence avoir recours, lorsque le maintien d'une vitesse sensible-

ment constante est désirable, lorsque surtout on veut éviter les emballements qui caractérisent les moteurs en série fonctionnant à vide. Toutefois comme les moteurs en dérivation coûtent plus cher, à cause de l'enroulement de fil fin qu'ils comportent, on pourra employer des moteurs en série, toutes les fois que le travail à effectuer n'est pas susceptible par sa nature de variations importantes.

336. — Lorsque les moteurs sont excités en dérivation, nous avons dit que si les inducteurs sont excités par une dérivation spéciale établie entre les deux points où la différence de potentiel est constante, on pouvait alors consentir à avoir aux bornes du moteur une différence de potentiel décroissante quand l'intensité augmente (242), c'est-à-dire donner aux conducteurs secondaires alimentant l'induit une résistance appréciable. Cette disposition est dans tous les cas recommandable. Il est vrai que, d'autre part, on multiplie ainsi les conducteurs de distribution. Dans la figure 45, nous avons représenté en M' l'induit d'un moteur placé sur une dérivation formée de deux conducteurs secondaires entre la bande de distribution et la bande de retour. Les inducteurs I' enroulés de fil fin sont eux-mêmes en dérivation entre A et B. Un interrupteur H placé près de la bande de distribution doit également commander le circuit d'excitation; des fils fusibles sont placés sur ce dernier.

Des rhéostats de réglage et d'excitation seront placés sur le circuit de l'induit et le circuit d'excitation (236), avec un commutateur approprié. Nous étudierons plus loin ces détails.

337. Excitation et réglage des génératrices. — Pour obtenir une différence de potentiel constante entre la bande de distribution et la bande de retour, on peut opérer de plusieurs manières :

338. — 1° On emploie comme source une dynamo exacte-

ment autorégulatrice de la différence de potentiel entre ses bornes. La résistance des conducteurs principaux qui relie la machine à la bande de distribution et à la bande de retour doit alors être nulle ou tout au moins très faible, ce qui peut conduire à leur donner une section considérable, si leur longueur est un peu grande. La dynamo peut être à enroulement compound ou simplement en dérivation.

339. — 2° La dynamo donne entre ses bornes une différence de potentiel croissant avec l'intensité. On y arrive au moyen de l'enroulement compound, en augmentant l'influence du gros fil en série, en hypercompoundant la dynamo. La différence de potentiel D' entre les bandes de distribution et de retour est reliée à la différence de potentiel D_1 entre les bornes de la dynamo, par la relation

$$D' = D_1 - IR_1,$$

R_1 étant la résistance des conducteurs principaux et I l'intensité du courant qui les parcourt. On peut alors disposer de la résistance R_1 de manière que D' reste constante malgré les variations de I , puisque D_1 croît avec I . Les conducteurs principaux pourront être moins gros et moins coûteux que dans le cas précédent. Il est inutile de chercher à rendre D' croissante avec l'intensité I .

Nous avons bien dit (226) que la stabilité d'équilibre d'un moteur est augmentée si la différence de potentiel entre ses bornes croît avec l'intensité *du courant qui le traverse*; de sorte que, si D' croît en même temps que I , le moment résistant d'un quelconque des moteurs alimentés par la même génératrice augmentant, la diminution de vitesse qui en résulte est moins grande que si D' demeure constante; mais D' augmentant aussi pour tous les autres moteurs, la vitesse de ces derniers augmente, sans que cependant leur moment résistant ait été modifié.

Nous revenons ainsi, à diverses reprises, sur les mêmes considérations pour bien montrer que les conditions du

meilleur fonctionnement pour un moteur isolé peuvent être en opposition avec le bon fonctionnement des autres moteurs, avec lesquels il serait lié.

Il ne faut pas oublier que les génératrices à enroulement compound étant avant tout des machines excitées en dérivation, il sera parfois possible de modifier leur hypercompoundage dans un sens ou dans l'autre en agissant sur leur excitation en dérivation par l'introduction de rhéostats convenables.

340. — 3° La génératrice est une dynamo excitée en dérivation non autorégulatrice de la différence de potentiel entre ses bornes. Il convient alors d'introduire dans le circuit d'excitation de cette dynamo un rhéostat permettant de faire varier son courant inducteur de manière à maintenir constante la différence de potentiel entre la bande de distribution et la bande de retour. Un électro-aimant à fil fin établi en dérivation entre ces dernières peut être chargé de manœuvrer automatiquement le rhéostat d'excitation de la génératrice. Ce procédé est peut-être le plus pratique en ce qu'il permet l'emploi des dynamos génératrices excitées simplement en dérivation qui seules se prêtent commodément au couplage. Il présente, en outre, l'avantage de maintenir constante la différence de potentiel, malgré les variations possibles de vitesse de la génératrice, et les variations de résistance provoquées par l'échauffement, tandis que l'autorégulation ou l'hypercompoundage des dynamos à enroulement compound est basé essentiellement sur la constance de leur vitesse, constance souvent difficile à obtenir.

341. Emploi de plusieurs génératrices. — Il est utile, nécessaire même à bord des navires, comme d'ailleurs dans les applications à terre, que l'installation comprenne plusieurs génératrices.

Ou bien l'on voudra avoir une génératrice de rechange, soit pour le cas d'avarie, soit pour permettre une visite et un

nettoyage périodique. Il sera alors économique d'employer n machines de puissance moyenne, plutôt qu'une seule machine de puissance égale à leur somme ; un rechange d'une machine suffisant, en général, si n machines coûtent plus qu'une seule égale à leur somme, les $n + 1$ machines moyennes coûteront moins que 2 grosses.

Si l'on veut se passer de rechange, il faut qu'en cas d'avarie d'une des machines, les autres puissent assurer tout le service ; le nombre des dynamos sera encore au moins égal à deux et il est facile de voir qu'il est avantageux d'augmenter ce nombre. Lorsque les génératrices sont nombreuses et de puissance modérée, en cas d'avarie de l'une d'elles, on pourra sans inconvénient répartir sur celles qui restent la puissance qu'elle produisait ; tandis qu'avec deux génératrices seulement, en cas d'avarie de l'une, l'autre doit fournir une puissance double de sa puissance normale, si l'on veut que tous les appareils alimentés continuent à fonctionner comme auparavant, ce qui peut être d'un intérêt majeur, à bord d'un navire de guerre, lors d'un combat ; il faut alors donner aux deux génératrices une puissance bien supérieure à celle qu'elles développeront normalement, ce qui en augmente le prix.

Sans pousser à l'extrême la division des génératrices, ni attacher plus d'importance qu'il ne convient à leur prix d'achat, on voit qu'il ne faut pas non plus en restreindre trop le nombre en se basant sur ce que les dynamos puissantes coûtent moins, proportionnellement, que de plus faibles.

342. Couplage des génératrices. — Il y aura au moins deux génératrices, soit qu'elles alternent pour distribuer leur puissance à tous les électromoteurs, soit qu'elles concourent à alimenter ces derniers. Lorsque les génératrices sont à enroulement compound, leur couplage direct doit être évité. Le système adopté ici peut être celui en usage pour l'éclairage électrique. Chaque génératrice est reliée par des conducteurs principaux à une bande de distribution spéciale

et à une bande de retour spéciale, toutes les bandes de retour pouvant cependant être réunies et former une bande de retour commune; l'un des conducteurs secondaires aboutissant à un électromoteur est toujours relié à la bande de retour commune, l'autre peut être relié, à l'aide de l'interrupteur H (*fig. 45*) transformé en commutateur, avec une quelconque des bandes de distribution correspondant aux diverses génératrices, de telle sorte que jamais un même appareil ne puisse être alimenté à la fois par deux génératrices différentes.

Ce système lié à l'emploi des génératrices à excitation compound, qui ne peuvent être couplées directement, sans risques d'avaries graves, oblige donc à alimenter tous les électromoteurs à la fois par la même génératrice, ou à les répartir un par un entre les diverses génératrices fonctionnant en même temps. Lorsqu'il s'agit d'éclairage électrique par incandescence, il n'en résulte aucun inconvénient sérieux, parce que les lampes étant nombreuses et égales, et chacune d'elles absorbant une faible fraction de la puissance totale, il sera toujours aisé de répartir la charge à peu près également sur toutes les machines. Lorsqu'il s'agit d'électromoteurs peu nombreux relativement et de puissances souvent très diverses, il pourra souvent être difficile de charger à peu près uniformément toutes les génératrices; il peut même en résulter une utilisation de leur puissance à ce point défectueuse qu'on ne puisse alimenter à la fois tous les électromoteurs, quoique la somme des puissances nécessaires soit inférieure à la somme des puissances des génératrices dont on dispose. Cette difficulté se présentera, le plus souvent, lorsqu'une installation étant faite, on voudra augmenter le nombre ou l'importance des électromoteurs en service; il pourra en résulter la nécessité d'adjoindre de nouvelles génératrices aux premières, ou de les remplacer par de plus puissantes, alors que les premières eussent été suffisantes si l'on avait pu répartir entre elles la puissance supplémentaire demandée. Un exemple d'ailleurs fera mieux ressortir l'inconvénient que nous signalons.

343. — Supposons qu'on dispose tout d'abord de 4 dynamos génératrices, d'une puissance maximum de 14000 watts chacune et que les électromoteurs à actionner soient définis comme il suit : 6 électromoteurs exigeant 5000 watts et 8 électromoteurs exigeant 2500 watts. On peut les répartir entre les 4 génératrices de la manière suivante :

1^{re} génératrice. — 3 moteurs de 2500 watts et 1 de 5000 watts, en tout 12500 watts ;

2^e génératrice. — 3 moteurs de 2500 watts et 1 de 5000 watts, en tout 12500 watts ;

3^e génératrice. — 1 moteur de 2500 watts et 2 de 5000 watts, en tout 12500 watts ;

4^e génératrice. — 1 moteur de 2500 watts et 2 de 5000 watts, en tout 12500 watts.

On voit que les génératrices fonctionnent alors, comme il convient, un peu au-dessous de leur puissance maximum.

Supposons maintenant qu'on veuille ajouter en plus un électromoteur de 5000 watts.

On voit qu'on ne peut le faire sans charger outre mesure une ou deux génératrices ; il faudra donc en installer une cinquième, alors que la somme totale des puissances que peuvent développer les 4 génératrices existantes est 56000 watts et que tous les moteurs réunis, y compris le nouveau de 5000 watts, n'exigent que 55000 watts.

344. — De telles anomalies ne se présenteraient pas, si les génératrices pouvaient être couplées, parce qu'alors la charge pourrait être également répartie sur chacune d'elles.

On ne peut le faire directement avec les génératrices à excitation compound, c'est-à-dire qu'on ne peut les coupler ni en tension, ni en quantité, sans modifier leurs circuits.

On peut, comme nous le verrons, associer en tension deux génératrices à enroulement compound, à la condition de coupler en même temps en tension leurs inducteurs de fil fin, ce qui, en somme, revient à confectionner une seule machine avec les deux ; on peut encore associer en quantité

deux génératrices à enroulement compound, mais à la condition de mettre l'enroulement de gros fil de chacune des dynamos en tension avec l'induit de l'autre. Ces artifices, outre qu'ils enlèvent aux dynamos toute leur indépendance, ne laissent pas que de présenter quelque complication et d'exiger, pour éviter toute erreur, des connaissances trop étendues pour le personnel ordinaire appelé à manœuvrer régulièrement les génératrices.

345. — Les génératrices excitées en dérivation seules peuvent se coupler simplement et rapidement en quantité ; une dynamo peut être ajoutée aux autres au fur et à mesure des besoins, sans que le fonctionnement des premières soit ni interrompu, ni troublé ; cette dynamo peut être retirée sans plus de complication.

Il existe alors pour toutes les machines une bande commune de distribution et une bande commune de retour. Tous les appareils à alimenter sont reliés à ces bandes et il suffit, pour mettre une machine en service, de la mettre en marche et, quand sa vitesse est telle que la différence de potentiel aux bornes est égale à la différence de potentiel normale, de fermer un interrupteur reliant l'un de ses pôles à la bande de distribution, l'autre pôle pouvant, si l'on veut, rester en permanence en communication avec la bande de retour. Pour retirer la machine, il suffit d'ouvrir l'interrupteur et de la stopper ensuite.

Avec ce couplage en quantité, les génératrices ajoutent leurs puissances, de sorte qu'elles pourront toujours alimenter un ensemble de moteurs dont la somme des puissances soit inférieure à la leur. On peut dire aussi que la différence de potentiel aux bornes des machines étant identique, les intensités des génératrices s'ajoutent ; il en est de même pour les électromoteurs placés en dérivation. Tous les électromoteurs pourront donc être alimentés à la fois, si la somme des intensités des courants qu'ils réclament est plus faible que la somme des intensités que peuvent fournir les

génératrices. Un ampèremètre totalisateur fera savoir à chaque instant si le courant employé est plus ou moins grand que celui qui correspond à la puissance maximum des génératrices en fonction et indiquera, par suite, s'il y a lieu d'ajouter une nouvelle machine, ou d'en retirer une.

346. — Nous avons indiqué que le réglage des génératrices en dérivation pouvait se faire aisément à l'aide d'un rhéostat placé sur le circuit des inducteurs et que, ce réglage pouvant être automatique, il était possible d'obtenir ainsi, entre la bande de distribution et la bande de retour, une différence de potentiel constante, pour une vitesse constante des dynamos et même pour une vitesse quelque peu variable. Il en résulte que les génératrices en dérivation pourraient être aisément appropriées à l'éclairage électrique des navires; en ce disant nous prévoyons le désir de pouvoir interchanger toutes les dynamos génératrices, qu'elles servent à l'éclairage ou à la distribution de l'énergie mécanique.

346 bis. — Depuis la première édition de cet ouvrage, le développement sans cesse croissant des applications de l'électricité à bord des navires de guerre a entraîné le couplage en quantité des dynamos génératrices. Ce couplage, déjà réalisé dans les installations du *d'Entrecasteaux* et du *Bouvet*, semble devoir être désormais la règle, pour tous les navires nouveaux. Les dynamos génératrices sont toutefois encore des dynamos compound et, pour éviter tout accident, on a fait usage de divers *appareils de sécurité automatiques*, suppléant à l'insuffisance possible du personnel. Les considérations précédentes, déjà confirmées en partie, conservent encore leur valeur en ce qui concerne la préférence à donner aux dynamos excitées en dérivation.

CHAPITRE VII

APPLICATIONS DES ÉLECTROMOTEURS

A BORD DES NAVIRES

§ 1. — Divers modes de distribution de l'énergie mécanique à bord des navires; avantages et inconvénients de la distribution électrique.

347. Emmagasinement de l'énergie mécanique à bord des navires. — A bord des navires modernes, toute puissance mécanique a pour origine primitive la combustion du charbon. Des essais ont été tentés pour remplacer ce dernier par du pétrole ou d'autres hydrocarbures analogues, mais somme toute l'énergie mécanique est actuellement, peut-être pour longtemps encore, emmagasinée à bord sous la forme d'un combustible. Les soutes à charbon actuelles, les soutes à pétrole de demain, renferment cette énergie mécanique à l'état latent. Pour la mettre en évidence, il faut brûler le combustible dans des foyers et produire, par exemple, au moyen de la chaleur développée, de la vapeur d'eau, dont la force élastique appliquée à une machine convenable laissera enfin disponible et utilisable l'énergie sous sa forme mécanique.

Pour en arriver là, une double transformation a dû s'opérer : production de chaleur par le combustible, c'est-à-dire transformation de son énergie chimique en énergie calorifique, et transformation de l'énergie calorifique communiquée à la vapeur d'eau en énergie mécanique.

Le combustible agissant sur l'eau, grâce à un foyer et à une chaudière appropriés, donne, en disparaissant, de la chaleur, c'est-à-dire de la vapeur d'eau, et cette dernière ne permet à la machine à vapeur où elle est utilisée de développer une puissance mécanique qu'en se refroidissant et retournant à l'état d'eau dans le condenseur.

348. — Cette double transformation, qui ne va pas sans une perte considérable, a incité beaucoup de recherches dans le but d'obtenir une création plus économique de la puissance mécanique à bord. Leur examen est tout à fait étranger au but de cet ouvrage ; nous ne dirons ici que quelques mots sur un mode particulier de développement de l'énergie mécanique à bord, tout différent de celui que nous venons d'exposer, et qui a fait quelque bruit dans ces derniers temps.

Nous voulons parler de la production directe d'énergie mécanique au moyen de piles électriques. Il n'est pas besoin de longs calculs pour montrer que ce système est beaucoup moins économique que la combustion du charbon ordinaire.

Nous supposerons, comme l'a fait M. Trouvé, que la pile employée soit une pile à eau de mer ayant comme lames polaires négatives des lames de zinc et comme lames polaires positives des lames de cuivre, plongeant toutes dans la mer le long du navire ou le long d'un chaland qu'il remorque. Il semble, en effet, qu'ainsi on se trouve dans les conditions les plus favorables, puisque le navire n'aura à supporter que le poids des lames polaires, les vases des éléments de la pile étant supprimés, et que, d'autre part, il ne sera nécessaire de prévoir aucun approvisionnement de liquides ou de toute autre substance nécessaire au fonctionnement de la pile. Certes, une pile de cette nature, de très grandes dimensions, pourra engendrer une puissance électrique considérable et peut-être suffisante pour mettre en mouvement, par l'intermédiaire d'électromoteurs, l'hélice d'un petit et même d'un

grand navire. Mais la question qui nous occupe n'est pas la possibilité de la propulsion électrique directe d'un navire ; il s'agit de chercher si le navire peut emmagasiner plus économiquement l'énergie en employant la pile qu'en employant du charbon ; autrement dit, si, pour marcher un certain nombre d'heures, à une certaine vitesse, il lui faudra un stock de charbon plus lourd et plus coûteux que l'approvisionnement des matières consommées par la pile. Celle-ci consomme, en effet, non pas des liquides, puisqu'on emploie la mer, ni d'autres substances chimiques comme dans la pile Daniell ou les autres, mais tout au moins du zinc.

349. — En supposant que la consommation de zinc soit strictement égale à la consommation théorique, ce qui est très loin de la vérité pour cette pile à eau de mer, on sait qu'un coulomb d'électricité ne peut être fourni par un élément de pile dont le zinc constitue la lame négative qu'autant que cette lame perd une fraction de son poids égale à 0,337 milligramme.

Or, la pile à eau de mer a, par élément, tout au plus une *force électromotrice* de 0,6 volt quand elle travaille. Si n désigne le nombre des éléments en tension dans la pile, $n \times 0,6$ en sera la force électromotrice et $n \times 0,6 \times Q$ sera le travail électrique en joules développé par la pile dans tout son circuit, Q étant le nombre de coulombs fournis. Si nous voulons obtenir un travail de 1 cheval-heure, c'est-à-dire le travail d'une puissance de 1 cheval pendant 1 heure qui est égal à 736×3600 ou 2649600 joules, il faut donc que la quantité d'électricité Q fournie soit, en coulombs :

$$Q = \frac{2649600}{n \times 0,6}.$$

Comme chaque élément de pile dépense, par coulomb, 0,337 milligramme de zinc, la consommation pour la pile entière et par coulomb sera $n \times 0,337$ milligramme.

Par suite, le poids P de zinc dépensé pour obtenir le travail de 1 cheval-heure sera

$$P = \frac{2649600}{n \times 0,6} \times n \times 0,337 \text{ milligramme}$$

ou

$$P = 1,488 \text{ kilogramme.}$$

Or, toute machine à vapeur de bord est capable de produire 1 cheval-heure utile en consommant seulement 1 kg de charbon. On voit donc aussitôt l'infériorité de la pile au point de vue du poids et du prix surtout du combustible; car le zinc dans la pile est un véritable combustible qui brûle, c'est-à-dire s'oxyde, comme le charbon dans le foyer d'une chaudière.

Il faut remarquer que nous avons supposé que toute l'énergie électrique développée par la pile était utilisable dans un électromoteur et que nous ne tenons pas compte des pertes dues à la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique dans ce dernier. De sorte qu'on peut affirmer que la consommation de zinc sera en réalité au moins le double, en poids, de la consommation de charbon.

On nous pardonnera d'être entrés dans des détails aussi simples et aussi connus. Nous avons voulu établir, sans qu'il subsiste de doute, que, dans l'état actuel de la science, malgré le très faible rendement des chaudières, le charbon ou un combustible analogue est encore le mode d'emmagasinement de l'énergie mécanique le moins lourd et le moins coûteux.

350. Importance de la distribution de l'énergie mécanique à bord des navires. — L'énergie mécanique développée à bord des navires, par la combustion du charbon et par l'intermédiaire des chaudières à vapeur, n'est pas seulement appliquée à la propulsion. A bord des navires de commerce elle sert à manœuvrer des treuils, des cabes-

tans, la barre ; elle actionne des pompes à incendie, des ventilateurs, des escarbilleurs, etc. ; sur les navires de guerre, elle est en outre employée pour le pointage et le chargement des canons, pour les pompes à air des torpilles, etc.

Les appareils auxiliaires actionnés mécaniquement peuvent absorber sur les grands cuirassés une puissance de 1000 à 2000 chevaux.

L'origine de toute puissance mécanique étant les grandes chaudières à vapeur du bord, ou un nombre restreint de chaudières auxiliaires, il y aura lieu, on le voit, d'organiser une distribution de l'énergie mécanique importante par la grandeur de la puissance distribuée, comme aussi par les difficultés particulières inhérentes aux navires.

Nous donnons ci-après le tableau des machines auxiliaires d'un cuirassé français et, d'après la *Rivista marittima*, le même tableau pour le cuirassé italien *Re Umberto*.

351. Tableau des machines auxiliaires d'un cuirassé français.

DÉSIGNATION DES MACHINES.	NOMBRE des appareils.	PUISSANCE de chaque appareil en chevaux.	PUISSANCE totale en chevaux.
Machine de pompage de 600 litres . . .	1	184	184
— de 300 litres . . .	2	77	154
Cabestan	1	187	187
Servo-moteur Farcot	1	20	20
Treuil pour embarcations	1	42	42
Machines dynamo-électriques	4	24	96
Stapfer (transmission du servo-moteur).	1	4,5	4,5
Pompes de compression pour l'air . . .	2	25	50
— Thirions de 600 tonneaux. . .	4	65	260
— — de 30 tonneaux. . .	6	6	36
— — de 1500 litres.	1	1	1
— du condenseur auxiliaire . . .	1	18	18
— de circulation	4	17	68
Ventilateurs des machines	2	16	32
— des chaufferies	8	20	160
Vireur à vapeur	1	10	10
Mise en train à vapeur	1	5	5
Treuil à escarbilles	4	4,5	18
Escarbilleurs de Meaupou	4	6	24
Treuil électrique pour canons de 14 cm.	7	6	42
— — de 65 mm.	1	2	2
TOTAUX.	37	"	1413,5

352. Tableau des machines auxiliaires du cuirassé italien *Re Umberto*¹.

DÉSIGNATION DES MACHINES.	NOMBRE des appareils.	PUISSANCE en chevaux de chaque appareil.	PUISSANCE totale en chevaux.
Pompes hydrauliques principales	2	160	320
— secondaires	1	80	80
Machines de la barre	2	100	200
Cabestan	1	160	160
Treuil	2	50	100
Machines dynamo-électriques	4	25	100
Pompes de compression pour l'air	2	30	60
— à incendie	2	30	60
— de circulation	4	60	240
— principales d'alimentation	4	40	160
— auxiliaires	6	40	240
— de cale	4	30	120
— d'épuisement	2	70	140
Ventilateurs des chaufferies	12	20	240
— d'aération	8	10	80
Vireurs	2	25	50
Machines de mise en train	2	25	50
Pompes des condenseurs auxiliaires	2	20	40
Escarbilleurs	6	5	30
Machine motrice de l'atelier	1	10	10
TOTAUX	69	"	2480

353. Modes divers de distribution de l'énergie mécanique à bord des navires. — La distribution se fait, ou peut se faire, à bord des navires, par divers procédés dont voici l'énumération :

1° Au moyen d'engrenages, câbles, arbres, poulies, cour-

1. *Rivista marittima*, novembre 1891.

roies transmettant à divers appareils la puissance mécanique développée par une machine à vapeur unique ;

2° Par la distribution directe de la vapeur aux machines à vapeur actionnant les divers appareils ;

3° Au moyen de l'eau comprimée. Une machine à vapeur centrale comprime l'eau, avec laquelle on alimente des moteurs hydrauliques aux points où la puissance doit être utilisée ;

4° Au moyen de l'air comprimé ; ce système, analogue au précédent, exige encore une machine à vapeur centrale pour comprimer l'air et des moteurs à air comprimé actionnant les appareils ;

5° Au moyen du courant électrique produit par des machines électriques centrales mues à la vapeur et actionnant des électromoteurs.

354. — Il semble, à première vue, que les seuls procédés logiques de distribution soient les deux premiers, puisque les autres, en outre de la transformation de l'énergie calorifique de la vapeur en énergie mécanique exigent encore d'autres transformations toujours coûteuses et quelquefois compliquées, puisqu'il faut au moins intercaler entre la source d'énergie mécanique, c'est-à-dire la machine à vapeur et les appareils d'utilisation, les appareils nécessaires pour opérer une double transformation. Cependant il peut se faire qu'un mode de distribution, autre que la distribution directe, présente des avantages particuliers assez grands, en vue de l'usage spécial du bord, pour qu'on accepte une dépense et une complication supplémentaires.

D'ailleurs, s'il est certain que les transformations subies par l'énergie dans tous les systèmes autres que celui de la transmission directe ou de la distribution de vapeur, absorbent une partie de cette énergie et diminuent le rendement de la distribution, c'est-à-dire augmentent la dépense d'exploitation, il n'en résulte pas nécessairement que la distribution directe soit moins coûteuse. La distribution par la

vapeur entraîne aussi des causes de pertes d'énergie, telles que la condensation dans les tuyaux; et surtout il ne faut pas oublier que l'économie d'un système ne réside pas seulement dans un grand rendement, et qu'on doit tenir compte aussi des frais d'installation et des dépenses d'amortissement. Il est certain, par exemple, qu'une distribution de vapeur, dans un rayon un peu considérable, mettons un kilomètre, occasionnerait de telles pertes par condensation et entraînerait des frais de tuyautage si grands, que cette distribution directe serait de beaucoup plus onéreuse qu'une distribution par l'intermédiaire du courant électrique ou de l'air comprimé, en supposant même que cette distribution de vapeur fût pratiquement réalisable à cette distance.

Il est donc difficile de comparer, *à priori* et d'une manière générale, les divers systèmes de distribution que nous avons énumérés. Nous ne pouvons que signaler les avantages et les inconvénients particuliers à chacun d'eux; leur connaissance suffira souvent pour guider le choix qu'on doit faire dans les divers cas particuliers. Quant au rendement, au poids, au prix de revient, les chiffres qu'on pourrait citer prennent, suivant les cas étudiés, des valeurs si différentes, qu'on ne saurait en tirer de conclusions bien justifiées.

355. Distribution de l'énergie mécanique par engrenages, câbles, arbres, poulies, courroies. — Ce système de distribution n'est guère employé à bord des navires.

A bord d'un cuirassé, on n'en voit d'exemple que dans l'atelier pour transmettre aux diverses machines-outils la puissance mécanique développée par la petite machine à vapeur de cet atelier; on peut cependant y faire rentrer la transmission du mouvement de la roue du gouvernail à la barre.

L'emploi si limité de ce mode de transmission s'explique aisément, si l'on songe qu'un navire de guerre est un ensemble de compartiments relativement petits, très encombrés, ne

communiquant entre eux que d'une façon fort restreinte. Il suffit de s'imaginer quelle complication d'arbres, de poulies, d'engrenages entraînerait, par exemple, la transmission, à l'appareil de pointage d'un canon quelconque, du mouvement de la machine à vapeur principale pour comprendre qu'un pareil système de distribution ne saurait se généraliser à bord.

356. Distribution par la vapeur. — Ce système de distribution est, en raison de sa simplicité, le plus généralement adopté actuellement. La distribution se réduit en effet à un tuyautage mettant en relation avec les chaudières les machines à vapeur actionnant les appareils à faire mouvoir.

L'indépendance des divers appareils actionnés est parfaite ; pourvu que les chaudières soient suffisantes, on peut mettre en marche ou stopper une ou plusieurs machines, sans que les autres en soient influencées.

L'absence d'appareils de transformation autres que ceux communs à tous les systèmes rend la distribution directe par la vapeur plus sûre que les autres. Il n'y a guère à craindre, en outre des avaries dans les chaudières, ce qui paralyserait tous les autres modes de distribution également, que des avaries dans le tuyautage. Or celles-ci, qui sont des fuites de vapeur, sont toujours visibles et facilement réparables à bord.

La vapeur peut actionner aisément toutes sortes d'appareils à grande ou petite vitesse.

D'un autre côté, le tuyautage de vapeur est lourd, encombrant surtout, à cause de sa grande section. Il développe dans les locaux qu'il traverse une température quelquefois excessive. Les fuites légères de vapeur répandent dans l'atmosphère une humidité malsaine ; des avaries même peu importantes dans le tuyautage se produisant pendant le fonctionnement peuvent entraîner des accidents graves de personne. Enfin, la condensation de la vapeur dans les tuyaux, causée par l'envahissement d'un compartiment du navire par l'eau de mer,

empêcherait le fonctionnement des machines à vapeur auxquelles ces tuyaux aboutissent.

357. Distribution par l'eau comprimée. — La distribution par l'eau comprimée est appliquée à bord d'un petit nombre de navires de commerce, pour la manœuvre des appareils de chargement et de déchargement. A bord des cuirassés, ce système est actuellement général pour le pointage et le chargement des gros canons.

Les avantages que présente la distribution par l'eau comprimée sont : la simplicité et la sécurité des appareils qu'elle emploie, la facilité et surtout la précision de la manœuvre de ces appareils. C'est cette dernière qualité, due au peu de compressibilité de l'eau, qui a surtout fait rechercher les appareils hydrauliques pour le pointage des canons. On peut, grâce à elle, amener et maintenir les organes mobiles dans une position voulue à l'avance beaucoup plus aisément que si l'on employait la vapeur.

Les fuites dans le tuyautage, faciles à découvrir, sont relativement faciles à réparer à bord. Ce tuyautage ne rayonne pas de la chaleur comme le tuyautage de vapeur et les appareils hydrauliques eux-mêmes n'échauffent pas les compartiments où se fait l'utilisation de la puissance mécanique. La distribution par l'eau comprimée n'est pas arrêtée à la suite de l'envahissement par l'eau de mer d'un compartiment traversé par le tuyautage.

Comme inconvénients, nous signalerons : le poids et l'encombrement du tuyautage, l'humidité constante qui résulte des suintements aux joints, la possibilité de la congélation de l'eau dans les pays froids. Nous devons surtout retenir que le fonctionnement des appareils hydrauliques n'est satisfaisant que si la pression est maintenue élevée et constante ; il en résulte d'abord que l'indépendance des appareils n'est pas aussi grande qu'avec la vapeur et ensuite que l'emploi du système hydraulique exige une mise en pression préalable. Ajoutons enfin que les appareils hydrauliques sem-

blent surtout convenir pour des mouvements lents et rectilignes.

358. Distribution par l'air comprimé. — La distribution par l'air comprimé, dont il n'existe à notre connaissance aucune application à bord, ressemble à la précédente en apparence seulement, car elle en diffère essentiellement par la nature du fluide parcourant la canalisation. Ce fluide est ici éminemment compressible et, n'étant la double transformation supplémentaire du système à air comprimé, dans les pompes à air comprimé mues à la vapeur, ce système ressemblerait beaucoup à la distribution par la vapeur.

Ainsi les moteurs à vapeur fonctionnent très bien avec l'air comprimé à la même pression ; le tuyautage de la vapeur peut servir pour l'air comprimé. L'air comprimé se prête, par suite, comme la vapeur, à toutes les applications. Les avantages spéciaux du système sont les suivants : innocuité parfaite des fuites du tuyautage, absence d'échauffement dans les compartiments traversés par le tuyautage ou renfermant les moteurs à air comprimé, aération par l'air évacué des moteurs sous une pression encore notable, fonctionnement malgré l'envahissement par l'eau de mer des compartiments traversés par le tuyautage ou renfermant les moteurs.

La distribution par l'air comprimé présente surtout l'inconvénient d'exiger un tuyautage lourd et encombrant, au même titre que la vapeur d'ailleurs. Pas plus que la vapeur, l'air comprimé ne permet de manœuvrer les appareils avec une grande précision.

359. Distribution par le courant électrique. — La distribution électrique de l'énergie mécanique est entrée, il n'y a pas encore bien longtemps, en concurrence, à bord des navires, avec les autres systèmes de distribution. Tous les jours, le nombre des applications augmente. Examinons quelles sont les qualités particulières à ce mode de distribution à bord des navires, qui justifient la faveur dont il semble

jouir aujourd'hui et quels sont aussi les inconvénients qui peuvent et doivent même en limiter l'extension.

Tout d'abord les conducteurs du courant électrique sont toujours de dimensions beaucoup moindres que les tuyaux équivalents pour la vapeur, l'eau comprimée, ou l'air comprimé. Leur flexibilité les rend admirablement propres à suivre les chemins parfois si étrangement sinueux nécessités par la distribution à bord des navires de guerre. Ces conducteurs ne rayonnent pas comme les tuyaux de vapeur une chaleur gênante, et ne donnent pas lieu comme eux à des fuites malsaines et quelquefois dangereuses pour le personnel.

Les moteurs électriques peuvent être, plus facilement que les appareils hydrauliques, rendus indépendants; nous avons donné les conditions que devait pour cela réaliser la distribution, conditions relativement simples à remplir(333). Ces électromoteurs, plus encore que les moteurs hydrauliques, peuvent, s'ils sont bien agencés, permettre la manœuvre des appareils avec une grande précision; nous avons en particulier indiqué comment on peut stopper instantanément un électromoteur (256), ce qui permet d'amener la partie mobile d'un appareil rigoureusement dans la position voulue. Les électromoteurs, en raison des formes et des positions très diverses qu'on peut leur donner, s'adaptent avec la plus grande facilité aux appareils à faire mouvoir, quels qu'ils soient; on peut aussi les placer partout, puisqu'ils ne sont ni très chauds, ni humides, ni dangereux.

En revanche, les électromoteurs sont des appareils plus délicats que des machines à vapeur, ou à air comprimé, ou des appareils hydrauliques. Nous ne voulons pas indiquer par là qu'ils sont plus difficiles à conduire. Au contraire, n'importe qui peut, en quelques heures, apprendre à gouverner des moteurs électriques, et la facilité qu'on a de les manœuvrer à distance est encore un avantage précieux pour certaines applications. Mais si, en fonctionnement normal, un électromoteur est un appareil éminemment docile, obéissant sûre-

ment et *instantanément* à la main qui le dirige, une avarie insignifiante peut en arrêter le fonctionnement et, chose plus grave, dérouter souvent pendant un temps assez long les gens les plus experts. En supposant même que les avaries des moteurs électriques ne soient pas plus fréquentes que celles des autres appareils, comme leur recherche demande presque toujours un temps assez long, même quand elles sont peu graves et facilement réparables, il y a peut-être à craindre que les électromoteurs ne puissent rivaliser comme sécurité de fonctionnement avec les autres moteurs. Il faut ajouter qu'un certain nombre des avaries possibles, et en particulier celles qui intéressent l'induit de l'électromoteur, sont difficiles, pour ne pas dire impossibles, à réparer couramment à bord d'un navire.

Les électromoteurs sont plus spécialement appropriés pour actionner les appareils à grande vitesse. C'est quelquefois une qualité, mais c'est parfois aussi un inconvénient puisque, pour de nombreuses applications, il faudra réduire la vitesse à l'aide d'engrenages et souvent dans une proportion considérable. Ce n'est pas à dire qu'on ne puisse construire des électromoteurs marchant à petite vitesse; mais les dimensions qu'on serait obligé de leur donner seraient alors considérablement augmentées et le système de distribution par l'électricité perdrait ses qualités principales. De la même manière, du reste, on peut construire des appareils hydrauliques à grande vitesse, si on consent à un accroissement des poids et du volume tant des appareils eux-mêmes que de l'eau qui les actionne.

Enfin, nous devons dire que la canalisation électrique est moins robuste que les autres, que des avaries même faibles matériellement peuvent arrêter la distribution, que ces avaries ne sont pas en général directement visibles et exigent une recherche quelquefois longue, que des courts-circuits entre les conducteurs d'aller et de retour peuvent être une cause d'incendie, et qu'enfin l'envahissement, par l'eau de mer, d'un compartiment traversé par les canalisations ou ren-

fermant des moteurs électriques arrête la distribution, comme d'ailleurs cela a lieu pour la vapeur.

360. Appareils pour lesquels la distribution électrique est toujours recommandable. — Il résulte de l'exposé succinct que nous venons de faire des qualités et des inconvénients respectifs des divers modes de distribution de l'énergie mécanique à bord des navires que la distribution électrique est spécialement indiquée pour actionner les ventilateurs, surtout ceux qui servent à l'aération dans les locaux autres que les chaufferies ou la machine principale. Ces ventilateurs tournent à grande vitesse ; un moteur électrique de faibles dimensions peut dès lors leur être directement adapté ; ils pourront se placer en tous endroits, même se suspendre sous barrots dans les appartements, être déplacés grâce à la flexibilité des conducteurs qui les reliait à la canalisation du courant, ou à la précaution de ménager diverses prises de courant. Ils pourront être mis en marche ou être stoppés par le premier venu, instantanément, leur fonctionnement régulier ne devant jamais apporter de troubles dans les autres appareils électriques avec lesquels ils sont reliés.

Les norias destinées à alimenter de projectiles les canons de petit calibre placés dans les parties hautes des navires de guerre paraissent encore incontestablement faire partie du domaine du courant électrique.

Il en est de même des treuils de faible puissance, à grande vitesse, et surtout des pompes rotatives, à propos desquelles nous pourrions répéter ce que nous avons dit des ventilateurs d'aération.

D'une manière générale peuvent être, avec avantage, actionnés électriquement tous les appareils accessoires dont le fonctionnement n'est pas étroitement lié à la sécurité du navire et qui sont situés assez loin du centre de production de la puissance mécanique, c'est-à-dire des chaudières, pour que le remplacement de la canalisation de vapeur

ou d'eau par la canalisation électrique constitue un progrès sérieux.

361. Appareils pour lesquels la distribution électrique peut entrer en concurrence avec les autres systèmes de distribution. — Les appareils de pointage des canons, les monte-charges qui les alimentent en projectiles et qui sont actuellement actionnés hydrauliquement, peuvent l'être avec avantage électriquement. On peut, à tout instant, obtenir, au moyen des électromoteurs, un pointage des canons et même des tourelles fermées très facile et très précis, alors que les appareils hydrauliques perdent beaucoup des qualités de précision que nous leur avons concédées, lorsqu'il s'agit de canons de très gros calibre ou de tourelles, en raison des masses énormes mises en mouvement. L'expérience seule pourra faire connaître si cette facilité et cette précision de manœuvre plus grandes, dues à l'emploi du courant électrique, n'ont pas pour revers une notable diminution dans la sécurité de fonctionnement. On peut dire cependant que si la manœuvre à la main est possible en cas d'avarie, l'objection tirée du manque de sécurité dans le fonctionnement, si elle est exacte, perd de sa valeur ; il faut même ajouter qu'en général la double manœuvre mécanique ou à la main est plus facilement réalisée quand on se sert d'électromoteurs que lorsqu'on emploie tout autre système.

Pour la barre, la question du remplacement du servo-moteur à vapeur, actuellement en usage presque partout, par un électromoteur demande à être examinée avec prudence. Ici la sécurité de fonctionnement doit tout primer et il est bon d'attendre, pour se prononcer, que le courant électrique ait déjà fait ses preuves pour d'autres appareils. On n'a guère d'ailleurs fait encore que quelques essais, non pas pour manœuvrer électriquement le gouvernail, mais seulement pour commander de la passerelle, au moyen d'un courant électrique, le servomoteur qui, lui-même, commande la machine à vapeur actionnant le gouvernail.

362. Appareils pour lesquels la distribution électrique ne peut logiquement être employée. — Les appareils auxiliaires placés dans les chaufferies, ou dans la chambre des machines, ou dans les compartiments très voisins, pompes de toute nature, ventilateurs ou autres, continueront évidemment à être actionnés directement par la vapeur, les inconvénients inhérents à celle-ci perdant alors toute leur importance ; le tuyautage trouve toujours son chemin, le supplément de température qui en résulte est insignifiant, au centre même de la production et de l'utilisation de la vapeur ; les moteurs électriques, au contraire, ne fourniraient que de mauvais services dans des milieux mortels pour eux : il n'est pas besoin d'ailleurs d'insister sur le contrebonsens que l'on commettrait en canalisant la vapeur des chaudières jusqu'aux dynamos-génératrices, puis canalisant le courant électrique de celles-ci jusqu'à des électromoteurs placés près des chaudières, sacrifiant à la fois l'économie d'installation, l'économie d'exploitation et la sécurité de fonctionnement.

Il est non moins évident que les dynamos électriques de toutes sortes, aussi bien celles qui servent à l'éclairage que celles qui alimentent les électromoteurs, continueront à être mues à la vapeur.

363. Résumé. — On voit, par ce qui précède, que si, dans les transmissions d'énergie à terre, l'électricité a une grande supériorité sur les autres agents, pour peu que la distance ne soit pas trop petite, et si, pour les grandes distances, elle constitue même la seule solution pratique, à bord des navires, où les distances sont toujours très faibles, le courant électrique ne peut prétendre à remplacer partout la vapeur pour la distribution de l'énergie mécanique. Il ne peut que se faire, à côté d'elle, une très large place, les applications ne manquant pas où l'on pourra utiliser ses merveilleuses qualités.

Nous étudierons spécialement les ventilateurs et les pom-

pes actionnés électriquement ; les monte-charges et appareils de pointage des canons ; les appareils de pointage des projecteurs ; lestreuil.

§ 2. — Ventilateurs.

364. Grands ventilateurs de refoulement, type de la Société d'éclairage électrique. — Ce type de ventilateur est destiné à être placé au plafond des compartiments.

A cet effet, une sorte de coupole en fonte est encastrée dans ce plafond et sa concavité tournée vers l'intérieur du compartiment abrite complètement l'électromoteur et l'isole en même temps du ventilateur proprement dit. Une porte ferme la coupole vers l'intérieur du compartiment. La figure 46 représente d'ailleurs schématiquement une section du plafond du compartiment passant par l'axe du ventilateur avec projection verticale du moteur. Les inducteurs du moteur électrique sont formés par quatre électro-aimants constituant un champ à deux pôles consécutifs. Ces électro-ai-

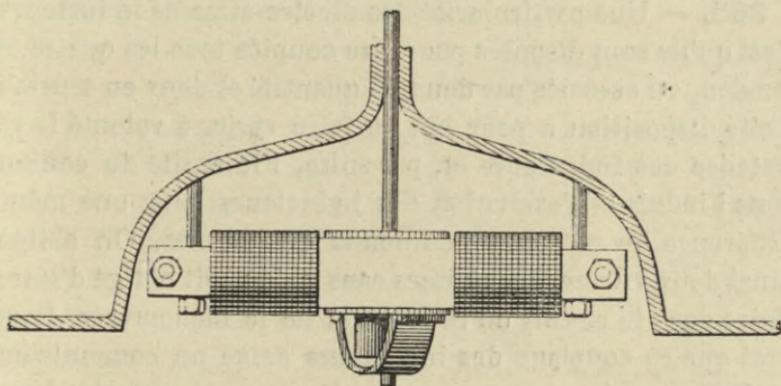


Fig. 46. — Ventilateur de refoulement. — Élévation de l'électromoteur encastré dans le plafond.

mants sont fixés par des boulons à la coupole en fonte dont nous avons parlé.

L'induit est un anneau Gramme dont l'axe vertical s'appuie d'une part sur une crapaudine fixée aux inducteurs et tourne d'autre part dans une douille ménagée dans la coupole ; l'axe de l'induit prolongé porte directement les ailettes du ventilateur. La figure 47 est un croquis de l'électromoteur.

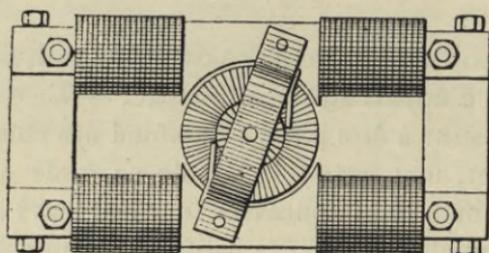


Fig. 47. — Moteur électrique de ventilateur. — Vue en plan.

L'excitation des inducteurs est faite en série ; nous avons dit, à plusieurs reprises, que la ventilation constituant un travail régulier, sans variations sensibles, on pouvait employer n'importe quelle excitation pour les inducteurs et en particulier l'excitation en série, moins dispendieuse.

365. — Une particularité des électro-aimants inducteurs, c'est qu'ils sont disposés pour être couplés tous les quatre en tension, ou associés par deux en quantité et deux en tension. Cette disposition a pour but de faire varier à volonté la résistance des inducteurs et, par suite, l'intensité du courant dans l'induit et l'excitation des inducteurs pour une même différence de potentiel maintenue aux bornes. On obtient ainsi deux vitesses de régimes sans qu'on soit obligé d'introduire dans le circuit un rhéostat et de le manœuvrer. Il est vrai que ce couplage des inducteurs exige un commutateur et des connexions assez compliquées, ce qui restreint beaucoup l'avantage que nous venons d'indiquer. La figure 48 représente les connexions des différentes parties du moteur avec le commutateur.

Celui-ci se compose de 8 bornes numérotées de 1 à 8 sur

la figure et placées sur un socle en marbre ; elles servent en même temps de point de fixation pour les fils et de plots de

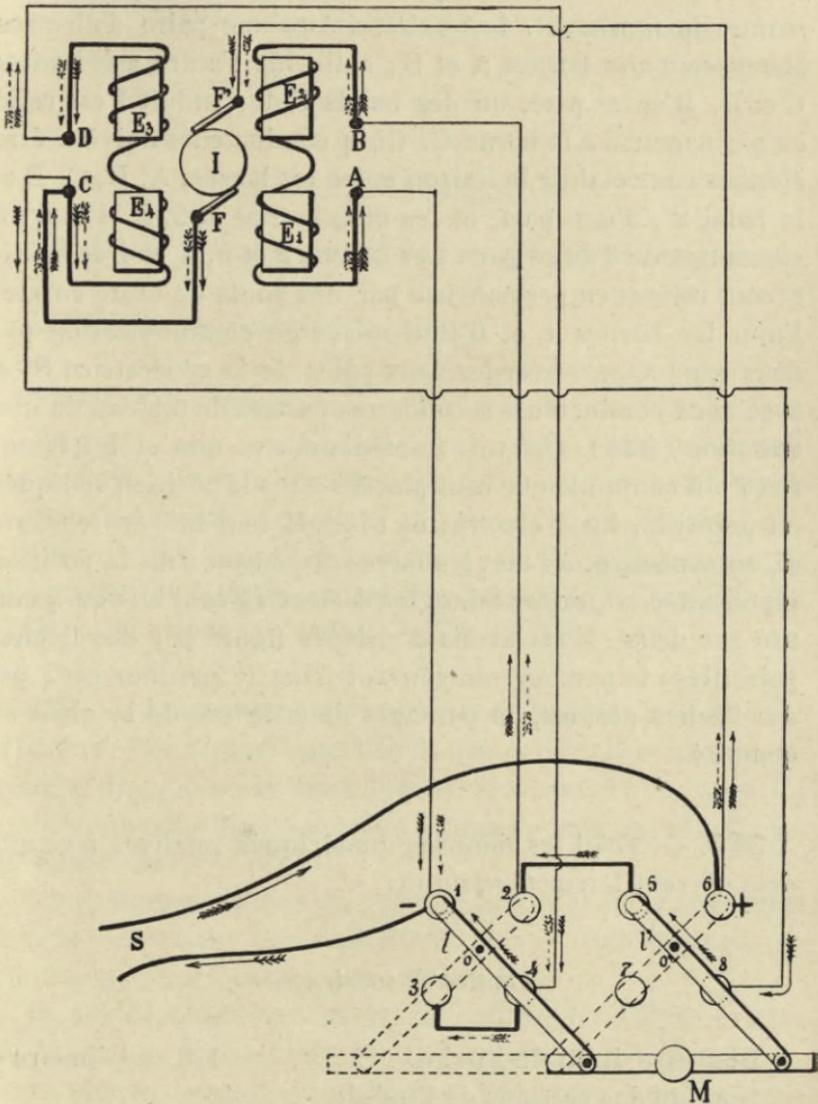


Fig. 48. — Couplage des inducteurs d'un ventilateur en tension ou en quantité.

contact pour deux lames de contact l et l' mobiles autour des axes O et O' et manœuvrées simultanément au moyen du bras

isolant M qui les relie et avec lequel elles sont articulées. Les quatre électro-aimants inducteurs E_1, E_2, E_3, E_4 sont reliés en permanence deux par deux en tension, comme le montre la figure 48. Les extrémités d'une paire d'électros aboutissent aux bornes A et B; celles de l'autre aux bornes C et D. D'autre part, un des balais F de l'induit I est relié en permanence à la borne C. Cinq conducteurs doivent être élongés pour établir la liaison entre les bornes A, B, C, D et le balai F', d'une part, et les cinq bornes 1, 2, 3, 4 et 5 du commutateur d'autre part. Les bornes 2 et 5, 3 et 4 de celui-ci sont reliées en permanence par des bouts de fil de cuivre. Enfin les bornes 1 et 6 sont mises en communication par deux conducteurs avec les deux pôles de la génératrice S ou avec deux conducteurs secondaires partant du tableau de distribution (334). On voit immédiatement que si les lames l et l' du commutateur sont placées dans la position indiquée en pointillé, les 4 électros et l'induit sont mis en tension; si, au contraire, on met les lames de contact dans la position représentée en traits pleins, les 4 électros sont mis en quantité par deux. Nous avons d'ailleurs figuré par des flèches pointillées le parcours du courant dans le premier cas; par des flèches pleines, le parcours dans le cas de la mise en quantité.

366. — Voici les données numériques relatives à ce modèle de ventilateur électrique :

Données de construction.

Diamètre du fil de l'induit	1,8 millimètre
Nombre des sections de l'induit	46
Résistance de l'induit	0,46 ohm
Diamètre du fil des inducteurs	2,0 millimètres
Résistance des inducteurs, les quatre électros couplés en tension	2,68 ohms

Résistance des inducteurs, les électros couplés en quantité par deux . . .	0,67 ohm
Diamètre des ailettes du ventilateur	0,64 mètre
Poids total	280 kilogrammes

Données de fonctionnement.

(Les électro-aimants inducteurs associés en quantité.)

Différence de potentiel aux bornes	70 volts
Intensité du courant	20 ampères
Vitesse	1200 tours par minute
Ouverture de refoulement	6 décimètr. carrés
Pression de refoulement	2 centimètr. d'eau
Débit du ventilateur, à l'heure.	4000 mètr. cubes d'air

Lorsque les électro-aimants inducteurs sont associés en tension, la vitesse est réduite à 700 ou 800 tours.

367. — Dans ces deux dernières années, l'emploi des ventilateurs électriques s'est généralisé à bord des navires de guerre. Dans les navires nouvellement construits, tous les ventilateurs sont électriques, en dehors de ceux des chaufferies et machines.

Leurs formes, tant en ce qui concerne le moteur électrique que le ventilateur proprement dit, sont variables. Nous en donnerons plus loin quelques spécimens.

Le débit de ces ventilateurs varie de 2000 à 10000 m³ d'air à l'heure; ils prennent de 10 à 30 ampères, sous 80 volts.

La vitesse de rotation de l'induit du moteur, presque toujours monté directement sur l'axe du ventilateur, est généralement comprise entre 1000 et 2000 tours par minute.

L'excitation du moteur électrique est, dans la très grande majorité des cas, faite en série. Cependant quelques ventila-

teurs électriques ont des moteurs excités en dérivation, sans

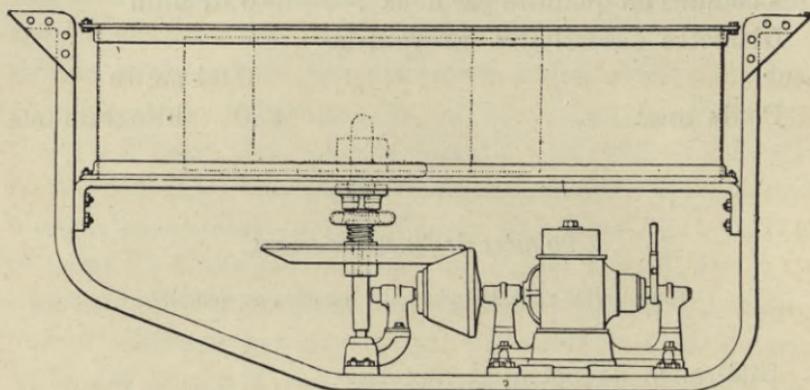


Fig. 49. — Ventilateur de refoulement de la *Compagnie Edison*.

Élévation; échelle $\frac{1}{20}$.

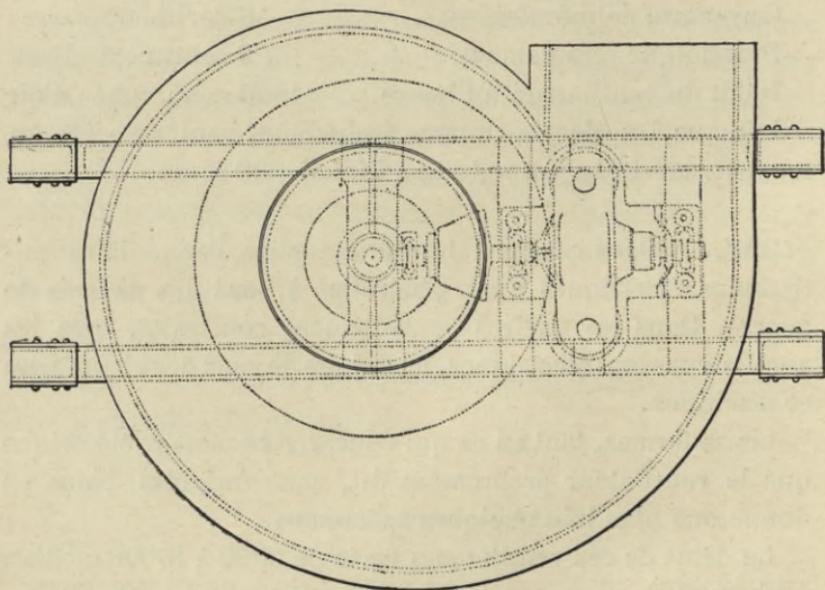


Fig. 50. — Ventilateur de refoulement de la *Compagnie Edison*.

Plan; échelle $\frac{1}{20}$.

qu'il en résulte d'ailleurs aucun avantage compensant l'augmentation de prix accompagnant nécessairement l'emploi

d'un enroulement inducteur plus coûteux comme fils et comme main-d'œuvre.

Aucun des ventilateurs actuellement mis en service ne comporte d'organes de manœuvre autres qu'un simple interrupteur du courant pour la mise en marche, ou le stoppage.

368. Grands ventilateurs de refoulement, modèle de la Compagnie continentale Edison. — La figure 49 représente en élévation et la figure 50 en plan un grand ventilateur de refoulement construit par la *Compagnie continentale Edison*.

Le moteur électrique qui actionne ce ventilateur est repré-

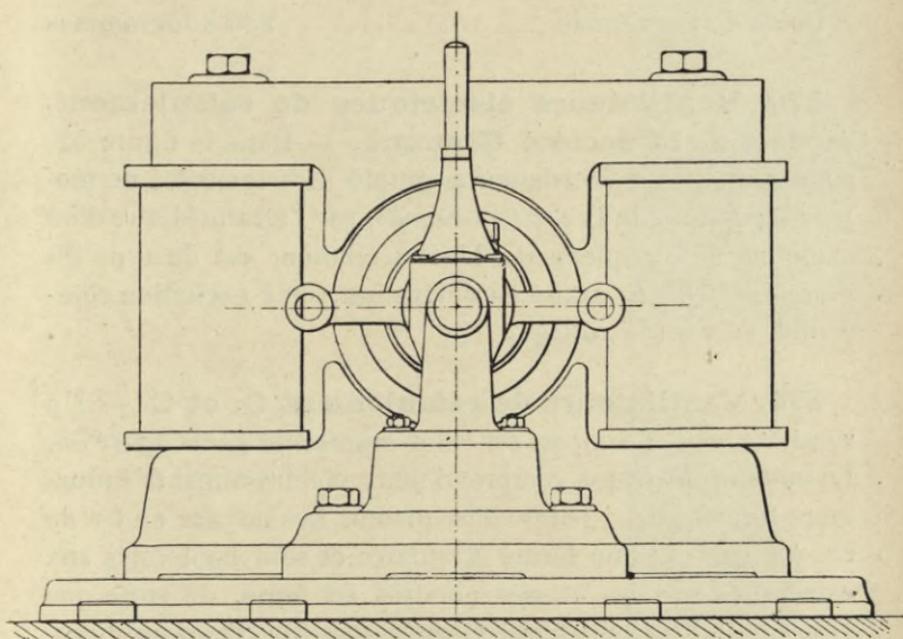


Fig. 51. — Électromoteur du ventilateur de refoulement de la *Compagnie Edison*.

senté à part, vu de face, dans la figure 51. Les inducteurs comprennent deux électro-aimants verticaux formant deux

pôles conséquents ; ils sont excités en série. L'induit est en forme d'anneau denté (genre Pacinotti).

369. — Voici quelques données numériques sur ce ventilateur :

Diamètre de l'hélice du ventilateur	80 centimètres
Débit à l'heure	10000 mètres cubes
Pression en millimètres d'eau	20 millimètres
Intensité du courant	20 ampères
Différence de potentiel aux bornes	80 volts
Vitesse de l'électromoteur	2000 tours
Vitesse de l'hélice du ventilateur	850 tours
Poids de l'électromoteur	100 kilogrammes
Poids de l'ensemble	280 kilogrammes

370. Ventilateurs électriques de refoulement, modèle de la Société Gramme. — Dans la figure 52, nous donnons un ventilateur accouplé directement à un moteur électrique de la *Société Gramme*, par l'intermédiaire d'un manchon d'accouplement. L'électromoteur est du type dit *supérieur* (fig. 41), excité en dérivation, ou à excitation compound, suivant le voltage.

371. Ventilateurs de refoulement C. et C. — Un ventilateur bien compact est celui représenté par la figure 53. Le moteur électrique comprend deux électro-aimants inducteurs formant deux pôles conséquents. Les noyaux en fer de ces électros ont une forme circulaire et sont boulonnés aux extrémités sur des masses polaires en fonte, de sorte que l'ensemble des inducteurs forme une sorte d'anneau circulaire, enveloppant l'induit. L'excitation des inducteurs est faite en dérivation ; l'induit est un tambour Siemens.

La maison Cadiot livre des ventilateurs ainsi combinés, et qui pourraient, comme on le voit sur la figure, se fixer aux barrots des compartiments sur les navires ; ils débitent de-

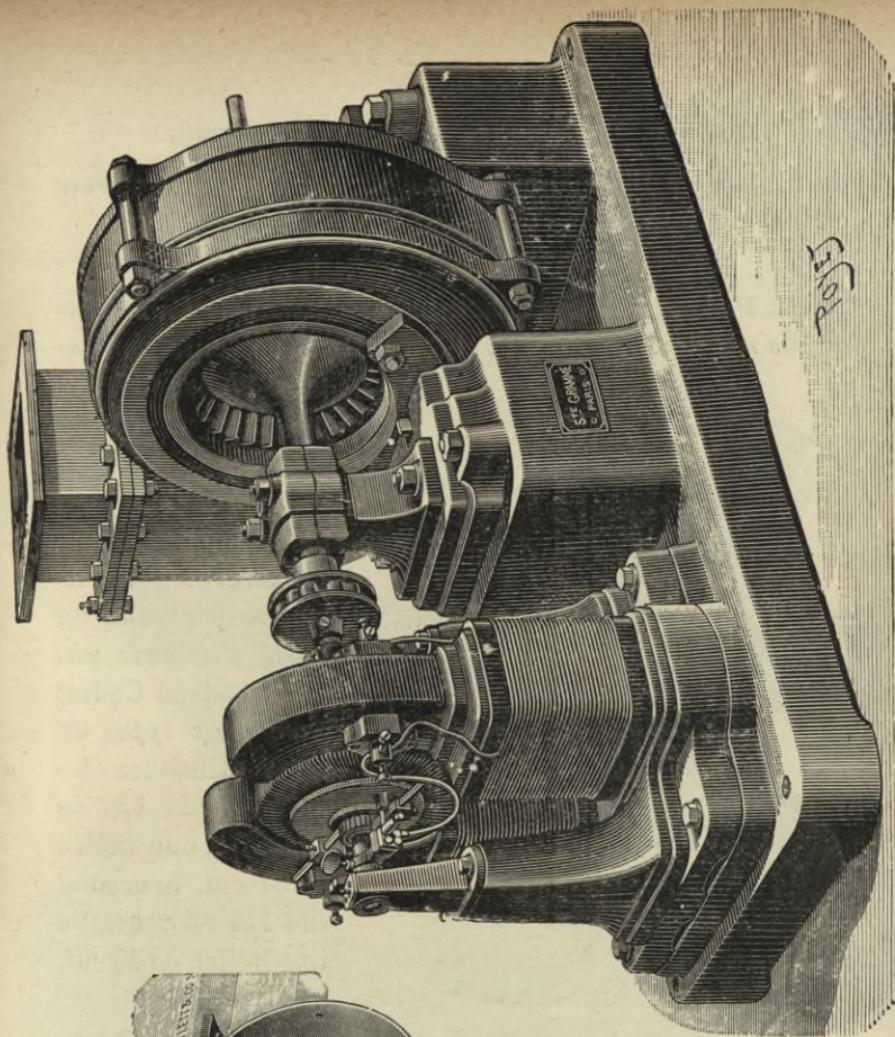


Fig. 52. — Ventilateur électrique de la Société Gramme.

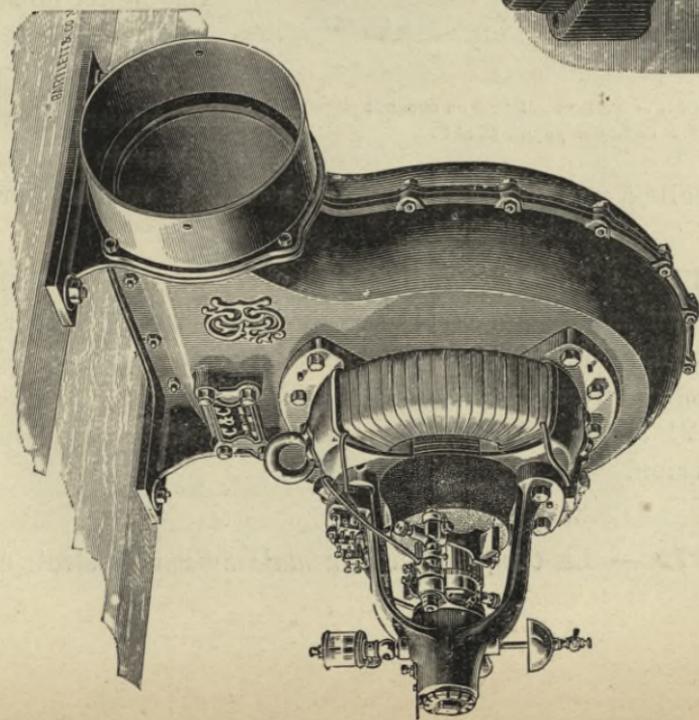


Fig. 53. — Ventilateur électrique de refoulement de la Compagnie C. et C.

puis 12 jusqu'à 135 mètres cubes d'air par minute à la vitesse de 2000 à 875 tours.

372. Petits ventilateurs-aspirateurs. — La *Compagnie des moteurs électriques C. et C.* construit de petits ventila-

teurs en éventail représentés ci-contre (*fig. 54*), pouvant remplacer une ou deux lampes à incandescence et se mettre par suite en place n'importe où.

La maison Cadiot livre deux types de ces ventilateurs. Le premier (de $\frac{1}{8}$ de cheval) a une hélice de 31 cm, le second (de $\frac{1}{4}$ de cheval) a une hélice de 45 cm.

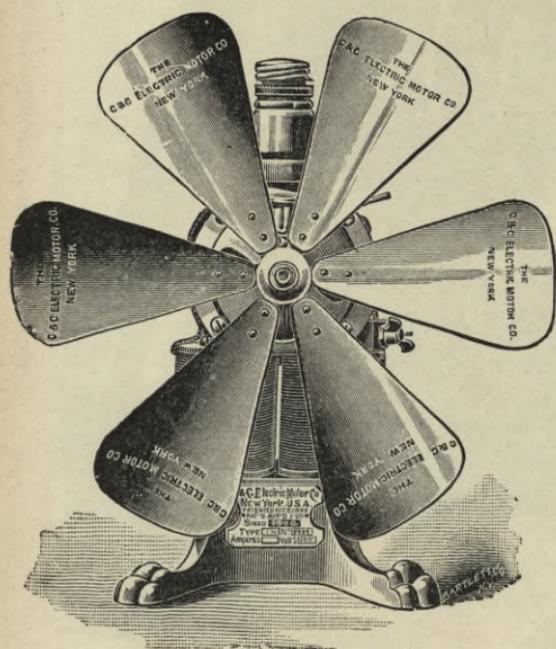


Fig. 54. — Petit ventilateur en éventail de la *Compagnie C. et C.*

373. — La figure 55 montre un ventilateur du second type installé à une fenêtre comme aspirateur et vu par derrière.

374. — Un ventilateur-aspirateur plus puissant, actionné par un moteur électrique *C. et C.* décrit sommairement plus haut (**371**), est représenté par la figure 56. Il se construit avec un diamètre de 62 à 154 cm et débite alors de 21 à 166 mètres cubes d'air par minute, sans contre-pression.

375. — La *Compagnie continentale Edison* construit égale-

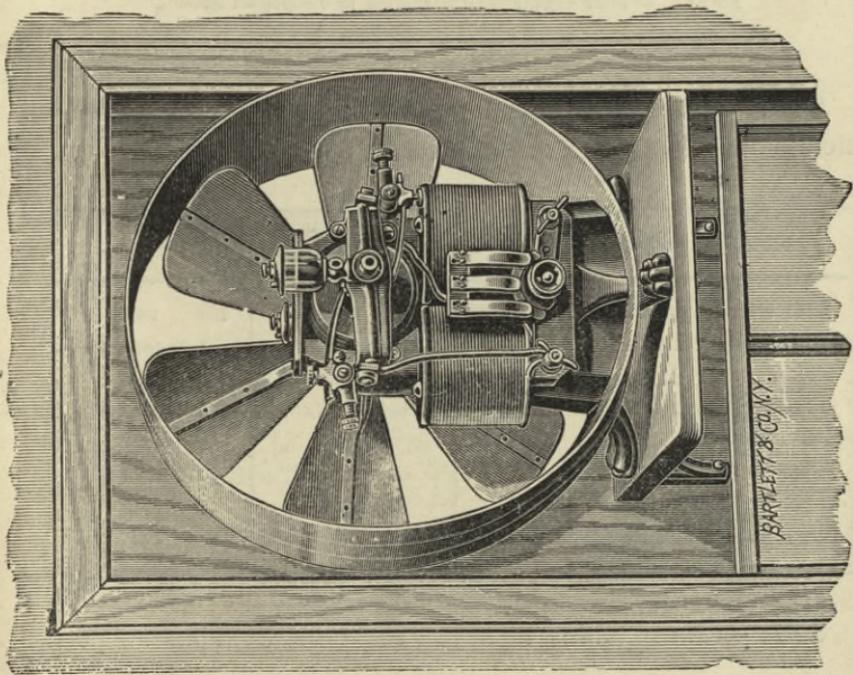


Fig. 55. — Ventilateur électrique aspirateur de la Compagnie C. et C.

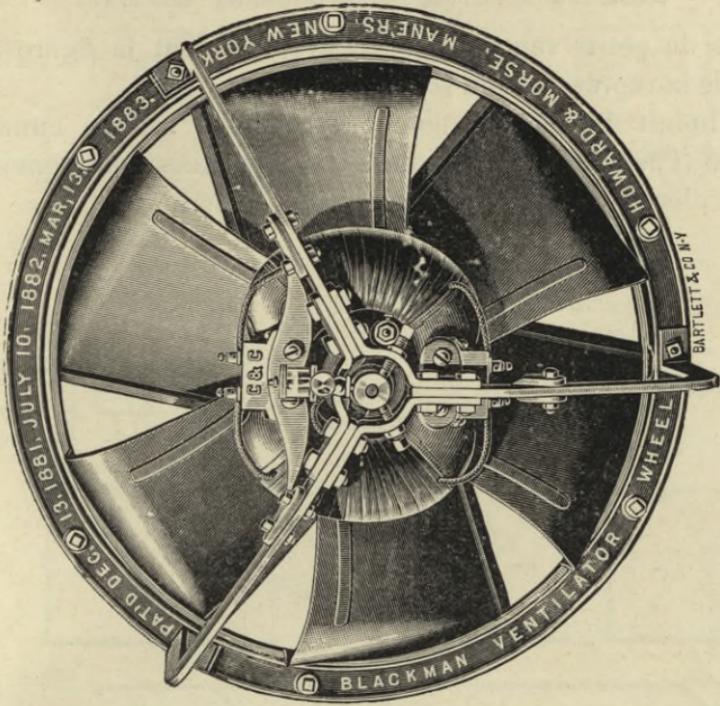


Fig. 56. — Ventilateur électrique monté en aspirateur.

ment de petits ventilateurs en éventail dont la figure 57 donne la représentation schématique.

L'induit de l'électromoteur est bobiné sur un anneau denté (Pacinotti). Les inducteurs bipolaires comprennent deux électro-aimants ; ils sont excités en série.

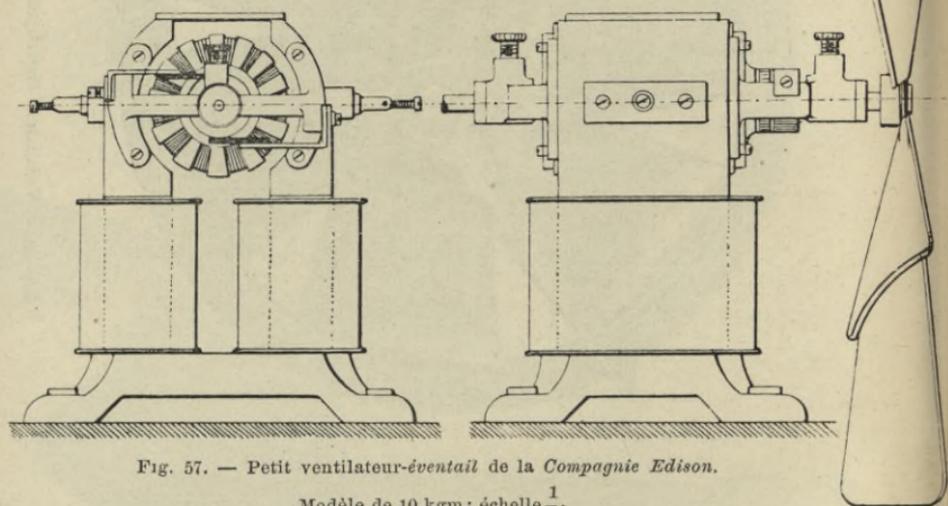


Fig. 57. — Petit ventilateur-éventail de la *Compagnie Edison*.

Modèle de 10 kgm ; échelle $\frac{1}{4}$.

376. — Voici quelques données numériques sur le fonctionnement de ces petits moteurs :

PUISSANCE MÉCANIQUE UTILE.	3 kgm.	10 kgm.
Différence de potentiel aux bornes .	100 volts	100 volts
Intensité du courant	0,8 ampère	1,75 ampère
Vitesse	3500 tours	3000 tours
Puissance électrique consommée . .	80 watts	175 watts
Rendement industriel	0,40	0,60
Diamètre de l'induit	65 mm	80 mm
Poids de l'électromoteur	7 kgr	13 kgr
Diamètre des ailettes du ventilateur.	30 cm	39 cm

377. — Enfin, dans la figure 58, nous donnons un petit

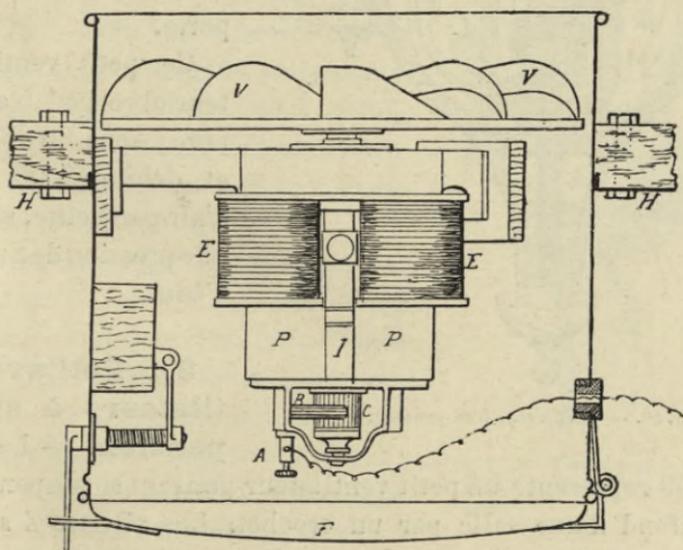
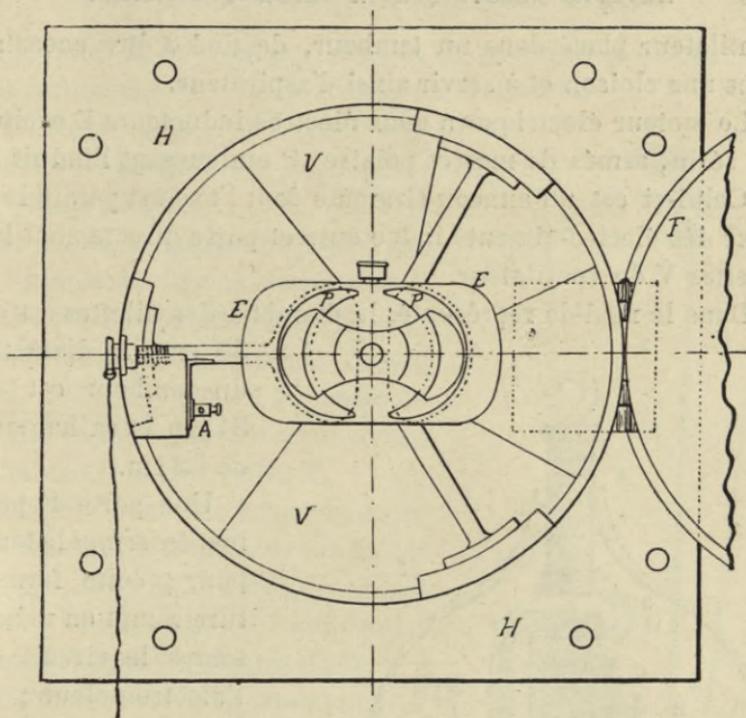


Fig. 58. — Petit ventilateur-aspirateur ; élévation et plan.

ventilateur placé dans un tambour, destiné à être encastré dans une cloison et à servir ainsi d'aspirateur.

Le moteur électrique a deux électros inducteurs E excités en série, armés de masses polaires P embrassant l'induit I.

Celui-ci est un anneau Gramme dont l'axe est parallèle à l'axe des électro-aimants inducteurs et porte directement les ailettes V du ventilateur.

Dans le modèle représenté, le diamètre des ailettes est de

30 cm ; le diamètre du tambour est de 31 cm et sa hauteur de 32 cm.

Une porte F permet de fermer le tambour ; cette fermeture rompt en même temps le circuit de l'électromoteur ; le circuit est fermé par l'ouverture de la porte.

Ce petit ventilateur absorbe 1,5 ampère, sous 80 volts, et débite 2000 m³ d'air par heure, sous une pression de 2 mm d'eau.

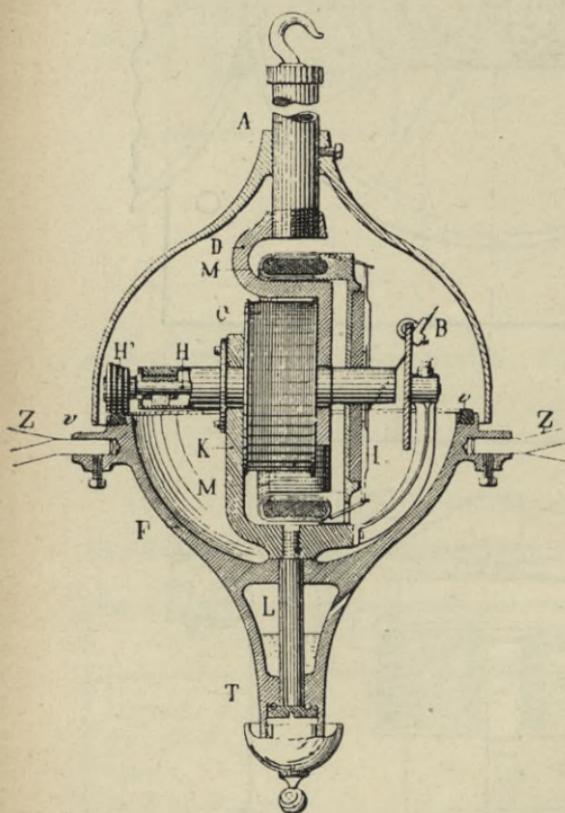


Fig. 59. — Ventilateur à suspension.

378. Petits ventilateurs à suspension.

— La figure 59 représente un petit ventilateur pouvant se suspendre au plafond d'une salle par un crochet. Les ailettes Z sont fixées à une cloche F montée sur billes en T et qui est mise en rotation par le galet H' de l'arbre H, commandé par l'axe

de l'induit *M* du moteur. Le galet *H'* entraîne la cloche par son frottement sur une couronne de caoutchouc *v*.

L'électro-aimant inducteur unique *C* est muni à ses deux pôles de pièces polaires *D* et *K*, qui servent aussi de supports pour l'axe de l'induit. La tige de suspension *A* est reliée à la pièce polaire *D*, portant ainsi toute la dynamo; d'autre part, la pièce polaire *K* porte la cloche mobile par l'intermédiaire de la tige *L* et des billes *T*.

L'anneau induit *M* tourne entre les deux pôles constitués par pièces polaires *D* et *K*; il porte un collecteur à lames radiales *I* sur lequel viennent appuyer les balais *B*.

Le moteur est complètement protégé contre les chocs.

379. — On voit encore, dans la figure 60, un élégant petit ventilateur d'appartement, dont le moteur, type Lundell, est complètement enfermé dans une enveloppe sphérique en fonte.

Dans la coupe représentée par la figure 61, on distingue la bobine inductrice unique circulaire *I* logée dans une boîte en fonte sphérique munie de deux projections intérieures formant les pièces polaires; cette bobine inductrice enveloppe complètement l'induit *M* qui est un tambour Siemens denté et dont l'axe est monté sur billes en *T*. Les balais sont en charbon.

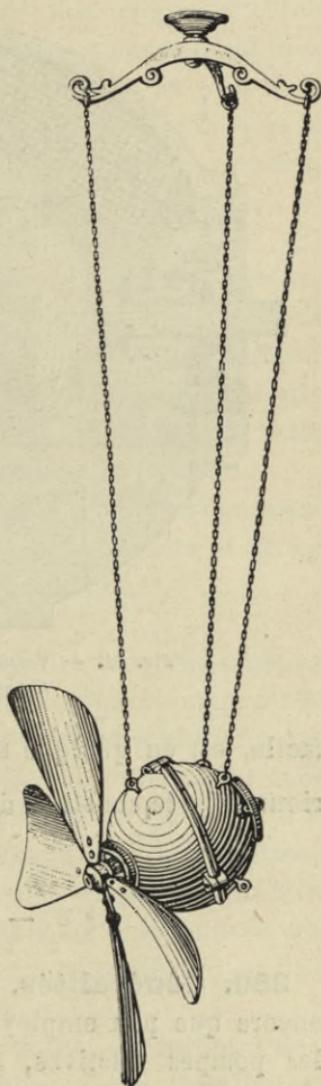


Fig. 60. — Ventilateur à suspension, type Lundell. — Vue d'ensemble.

Ce moteur très simple, construit en vue d'un démontage

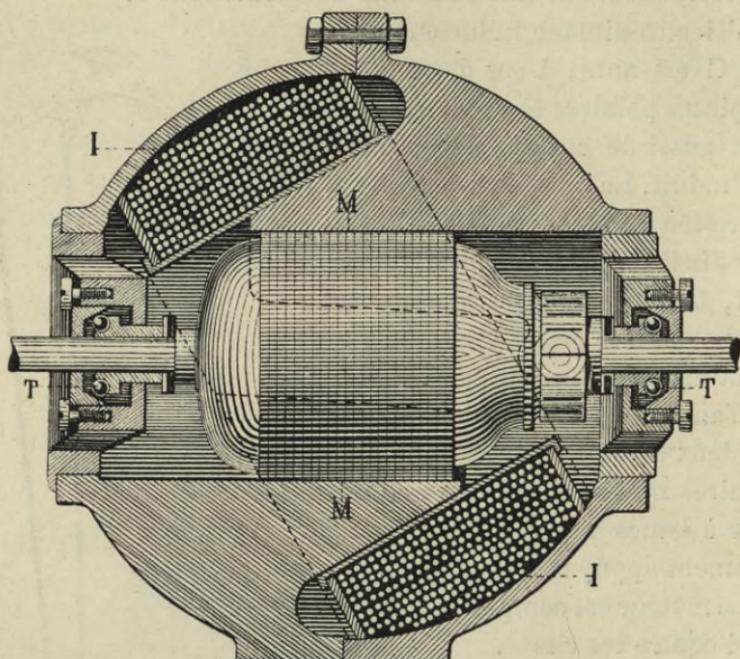


Fig. 61. — Ventilateur à suspension, type Lundell.
Coupe du moteur électrique.

facile, est en quelque sorte *cuirassé* contre les chocs extérieurs. On le construit depuis $\frac{1}{16}$ de cheval.

§ 3. — Pompes électriques.

380. Généralités. — Les pompes électriques ne sont encore que peu employées à bord des navires. Cependant les pompes rotatives, au moins, peuvent être actionnées électriquement avec autant de facilité que les ventilateurs. Ici encore, la mise en marche une fois effectuée, avec les précautions qu'elle exige, telles que l'introduction dans le circuit d'un rhéostat de démarrage, la puissance utile demandée au moteur n'éprouve que des variations peu considé-

rables ; le travail étant régulier, il n'y a pas à se préoccuper de gouverner le moteur.

La mise en marche et le stoppage seuls exigent quelque attention. Encore faut-il observer que les pompes étant destinées soit à remplir, soit à vider un récipient, on peut imaginer tel dispositif que l'on jugera convenable, pour que le moteur se mette en marche, ou stoppe automatiquement, lorsque le niveau du liquide atteint un point déterminé.

381. — Lorsqu'on veut faire usage de pompes à pistons, la transformation du mouvement de rotation, généralement très rapide, du moteur en un mouvement rectiligne alternatif de vitesse moins grande complique un peu l'installation par la nécessité d'introduire des bielles et des engrenages ; mais le fonctionnement en reste toujours commode et sûr.

Les inducteurs des moteurs destinés à actionner des pompes seront le plus souvent excités en série, aucune exigence spéciale n'imposant un autre mode d'excitation.

382. — En outre d'exemples d'applications des pompes électriques à bord des navires, nous en citerons une empruntée au service des mines, pour lequel ces pompes sont indiquées d'une façon toute spéciale. Par suite de l'impossibilité d'installer dans la mine même des chaudières à vapeur, ou d'y faire arriver une canalisation de vapeur venant de la surface, on est généralement conduit à actionner les pompes placées au fond de la mine, ou à des étages plus ou moins élevés, au moyen de très longues tiges mises en mouvement par les moteurs à vapeur de la surface.

Une canalisation électrique distribuant le courant à des pompes électriques est, on le conçoit, d'une installation beaucoup moins compliquée et onéreuse.

383. Pompes rotatives. — La figure 62 représente une pompe rotative actionnée directement par un moteur Gramme, du type dit supérieur.

Le rendement des pompes rotatives n'est jamais bien élevé et dépasse rarement 0,40, moteur compris.

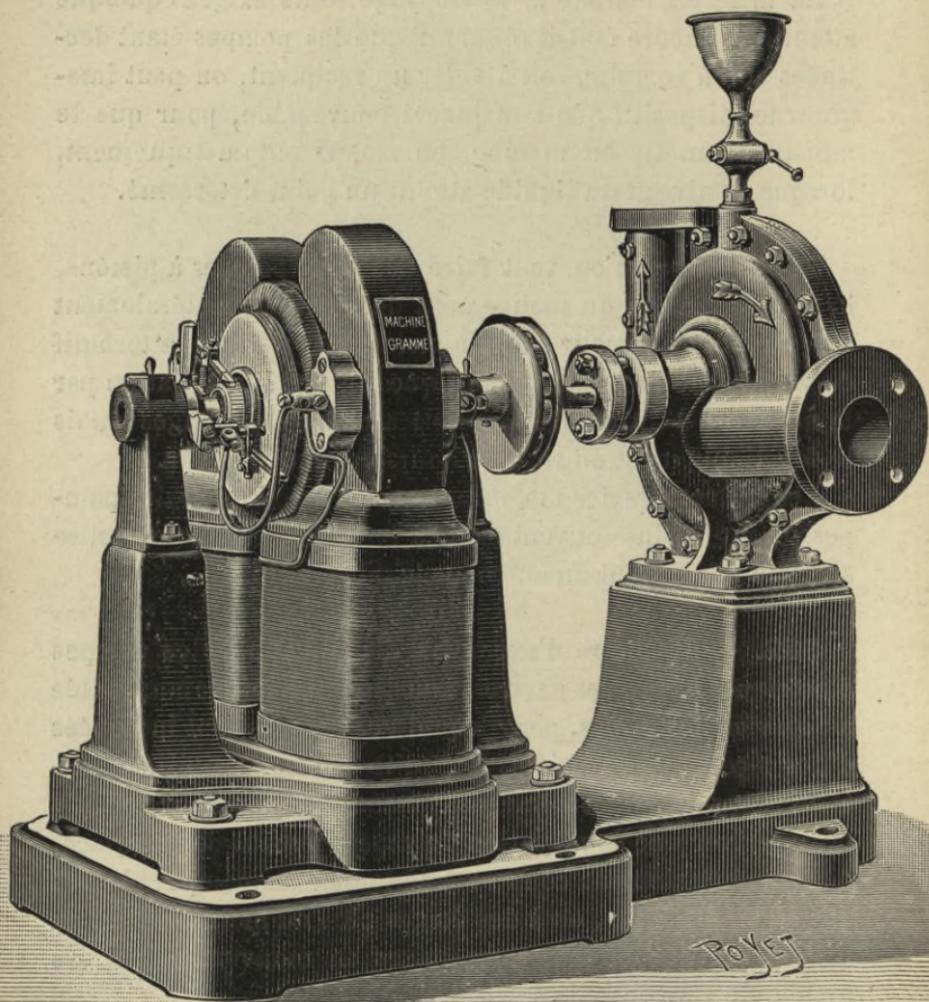


Fig. 62. — Pompe rotative électrique de la Société Gramme.

384. — La figure 62 bis représente en élévation une pompe rotative actionnée directement par un moteur élec-

trique à deux électro-aimants inducteurs réunis en haut et en bas par des masses polaires.

Cette pompe électrique est employée comme pompe à eau douce à bord du *Du Chayla* et du *Cassard*. Elle débite 3000

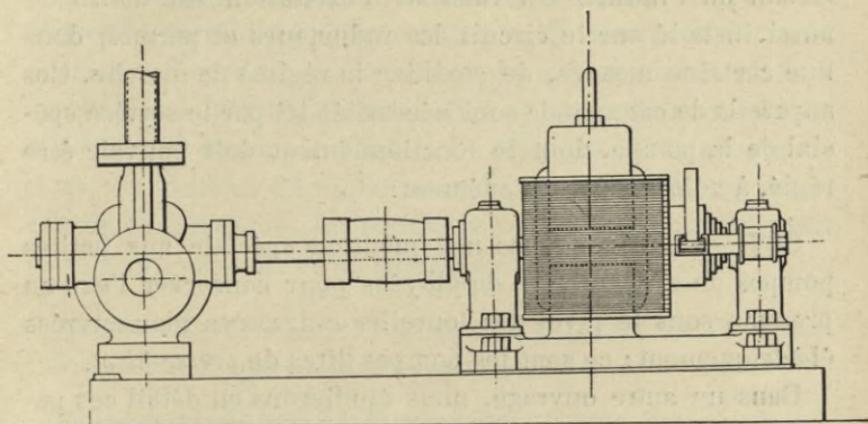


Fig. 62 bis. — Pompe rotative à eau douce du *Du Chayla*. Échelle $\frac{1}{8}$.

litres d'eau à l'heure. L'induit du moteur tourne à 2500 tours par minute et prend 14 ampères environ, sous 80 volts. La marche de la pompe est commandée par un flotteur.

385. Pompes à piston. — Les pompes à piston aspirantes et foulantes sont plus généralement employées dans le service des mines, en raison de la charge souvent très considérable à laquelle les pompes doivent être soumises. Mais ici, comme nous l'avons dit, la liaison du moteur électrique et de la pompe n'est plus aussi simple que pour les pompes rotatives.

386. — Parmi les pompes électriques, en petit nombre encore, employées à bord des navires de guerre, nous citerons une pompe à incendie (*Du Chayla*) actionnée par un moteur Rechniewski à quatre pôles, à l'aide d'une courroie.

Le moteur tournant à une vitesse de 1200 tours environ et prenant 15,6 ampères, sous 76 volts, la pompe a élevé 11500

litres d'eau par heure, à 15 mètres, dont 4 d'aspiration. Le rendement en eau élevée est de 0,41 pour l'ensemble.

L'excitation des inducteurs est faite en dérivation, la commande de la pompe se fait à l'aide d'un rhéostat placé sur le circuit de l'induit. Un rhéostat d'excitation est d'ailleurs aussi installé sur le circuit des inducteurs et permet, dans une certaine mesure, de modifier le régime de marche. Ces appareils de commande sont nécessités ici par le service spécial de la pompe, dont le fonctionnement doit pouvoir être réglé, à volonté, instantanément.

387. — Nous devons une mention spéciale aux petites pompes de compression employées pour conserver l'eau en pression sous le pivot des tourelles cuirassées manœuvrées électriquement; ce sont les pompes dites de *presse-pivot*.

Dans un autre ouvrage, nous étudierons en détail ces petites pompes foulantes et les organes de manœuvre, dont certains sont automatiques et déterminent la mise en marche ou le stoppage des pompes, lorsque l'eau manque dans le *presse-pivot* ou lorsque l'eau est en quantité suffisante. Nous nous contenterons aujourd'hui d'indiquer quelques chiffres de fonctionnement.

Débit : 220 litres par heure,

Pression : 60 kilogrammes,

Puissance électrique dépensée par le moteur : 1100 volts,

Rendement : 0,37.

388. — Nous donnons ci-après quelques renseignements numériques sur une pompe électrique installée en 1890 dans une galerie de la *Jubilee Colliery*, à Shaw.

La génératrice excitée en série est placée à la surface du sol; elle est actionnée par une machine à vapeur au moyen d'une transmission à cordes. Elle donne à 490 tours et en absorbant 40,51 chevaux, un courant de 48,5 ampères sous 580 volts, soit une puissance électrique de 38,22 chevaux.

La réceptrice, semblable à la génératrice, est placée dans une galerie, à 686 mètres d'un puits de 109 mètres de pro-

fondeur. Les câbles conducteurs reliant la génératrice à la réceptrice descendent donc 109 mètres dans le puits et parcourent ensuite les 686 mètres de galerie jusqu'à la réceptrice. Leur résistance est de 0,334 ohm.

La réceptrice tournant à 406 tours, avec 48,5 ampères et 564 volts, conduit la pompe à deux cylindres par une transmission à 6 cordes, un train à pignons chevrons et deux manivelles à 180°. La transmission réduit la vitesse des manivelles à 35 tours par minute. Le débit est, dans ces conditions, de 35 litres d'eau par seconde, sous une charge verticale de 42,7 mètres. La pompe refoule l'eau dans un tuyau suivant les 686 mètres de galerie jusqu'au puits.

389. — Voici comment se répartit la puissance de la machine à vapeur qui conduit la génératrice :

	CHEVAUX.
Puissance indiquée par la machine à vapeur conduisant la génératrice	62,69
Perte de la machine à vapeur à la génératrice	22,18
Perte dans la génératrice.	2,29
Perte dans le câble conducteur	1,07
Perte dans la réceptrice	2,29
Perte dans les pompes et leur transmission	10,37
Perte par frottement de l'eau dans les pompes et le tuyau.	4,51
Puissance calculée d'après le poids de l'eau montée.	19,98

390. — Signalons encore une pompe électrique installée par la Société Gramme aux mines *Cécilia* et qui, avec un moteur électrique de 100 chevaux, débite 12 litres d'eau par seconde, la hauteur d'élévation étant de 455 mètres.

‡ 4. — Monte-charges ; treuils et norias électriques.

391. Généralités. — Les monte-charges électriques ont déjà reçu de nombreuses applications à bord des navires et

en particulier des navires de guerre. Nous distinguerons plusieurs cas, suivant le but qu'on se propose d'atteindre.

392. — 1° Supposons qu'il s'agisse de monter un fardeau quelconque de la cale du navire, non pas à une hauteur fixe, mais à une hauteur suffisante pour qu'il puisse ensuite être descendu, par-dessus divers obstacles variables, soit sur le pont, soit dans un chaland accosté le long du navire. C'est le cas du déchargement, ou du chargement d'un navire. L'installation des treuils électriques destinés à remplacer les treuils ou grues ordinaires ne présente aucune difficulté sérieuse.

La manœuvre du monte-charge consiste alors à mettre en marche le moteur électrique pour la montée, par exemple, en prenant les précautions nécessaires pour le démarrage, telles que l'interposition d'un rhéostat dans le circuit de l'induit (227), et à stopper le moteur, au moment propice, en rompant le courant dans l'induit à l'aide d'un interrupteur convenable. Un dispositif approprié doit évidemment empêcher le fardeau de redescendre par son propre poids, le moteur une fois stoppé. On peut, par exemple, utiliser un rochet avec linguet de sûreté manœuvré en même temps que se produit l'interruption du courant dans l'induit. Un frein manœuvré à la main, ou même un frein automatique, peut d'ailleurs servir dans le même but (255).

393. — Pour la descente, le courant doit être inversé dans l'induit, au moyen d'un commutateur-inverseur spécial pouvant être ou non combiné au rhéostat de démarrage ; les balais sont en charbon, si on ne veut pas avoir à y toucher pour l'inversion du sens de la rotation (231). Comme à la montée, l'arrêt est produit par l'interruption à volonté du courant dans l'induit ; un linguet de sûreté, ou un frein, immobilise le monte-charge.

394. — Quelquefois la descente peut s'opérer par le poids seul du porte-charge ; alors ou bien le moteur électrique est désembrayé, ou bien l'axe de l'induit reste embrayé et parti-

cipe au mouvement inverse, sans y aider, le courant dans l'induit et aussi dans l'inducteur étant interrompu. Dans ce dernier cas, les balais doivent être en charbon, pour empêcher qu'ils ne soient rebroussés.

395. — Dans tous les cas, il est bon de prévenir les accidents pouvant résulter d'une avarie dans le moteur électrique ou d'une rupture du câble de suspension du porte-charge. Le frein automatique que nous avons déjà mentionné peut parer aux avaries du moteur ; la rupture du câble peut actionner un système de sûreté par griffes empêchant la chute du fardeau, lorsque celui-ci monte dans une cage plus ou moins complètement fermée.

396. — 2° L'installation devient plus complexe et plus difficile, si le fardeau doit être élevé, ou descendu, à une position fixe, toujours la même. Il est impossible alors d'arrêter le moteur électrique au jugé et il est nécessaire d'installer un dispositif propre à amener le stoppage automatique, lorsque le porte-charge se trouve dans une position déterminée. Ce stoppage automatique nécessite un réglage qui complique singulièrement l'installation.

Tous les dispositifs de sûreté, linguet, frein, griffes, peuvent encore être employés ici. On peut même, puisque la position d'arrêt du monte-charge, à la montée ou à la descente, est toujours la même, y placer un verrou de sûreté, qui se met en prise automatiquement avec le porte-charge, au moment où ce dernier passe à la position voulue. Le verrou est manœuvré en même temps que le commutateur lançant le courant dans l'induit du moteur, lorsqu'on veut mettre le monte-charge en marche.

L'arrêt du porte-charge dans une position fixe déterminée est plus aisément réalisé, si le mouvement du treuil est commandé par une vis sans fin *non réversible* montée sur l'arbre de l'induit de l'électromoteur. Le stoppage de ce dernier, qui doit d'ailleurs toujours être automatique, assure l'arrêt du

porte-charge, sans qu'il soit nécessaire de faire usage d'un frein d'aucune espèce.

397. — On peut aussi désirer un monte-charge élevant régulièrement et d'une manière continue des fardeaux, comme une *noria hydraulique* élève régulièrement de l'eau dans les augets placés le long de sa chaîne.

On peut employer de véritables *norias* avec des charges disposées dans les godets ou portées par des supports distribués le long de la chaîne.

Sans que cela soit toujours indispensable, il est souvent utile que le mouvement de la *noria* puisse se produire dans les deux sens. La manœuvre du moteur électrique comprend alors la mise en marche, l'arrêt, l'inversion de marche ; l'arrêt et la mise en marche pouvant d'ailleurs se produire à un moment quelconque, l'installation est des plus simples.

398. — Nous allons donner des exemples correspondant aux divers cas que nous venons de distinguer, et indiquer quelques-uns des dispositifs de sûreté ou de manœuvre du moteur électrique les plus employés.

399. Treuil-escarilleur de la Société « l'Éclairage électrique ». — Le moteur électrique, très simple, comprend un électro-aimant inducteur unique E (*fig. 63*), armé de deux masses polaires P entourant un anneau Gramme M dont l'axe est porté par des supports en bronze H fixés sur les masses polaires.

La figure 64 est une coupe du même treuil passant par l'axe de l'induit M, dont le noyau est formé de lames de tôle mince, isolées et empilées.

L'axe de l'induit porte un pignon A pouvant engrener avec une grande roue dentée B ; l'axe de celle-ci porte un second pignon C qui engrène avec une seconde roue dentée D, dont l'axe porte un tambour sur lequel s'enroule la corde du treuil. On a donc deux réductions successives de vitesse.

La roue F est une roue auxiliaire avec laquelle le pignon A

Fig. 63. — Treuil-escarbilleur, élévation;

échelle $\frac{4}{15}$.

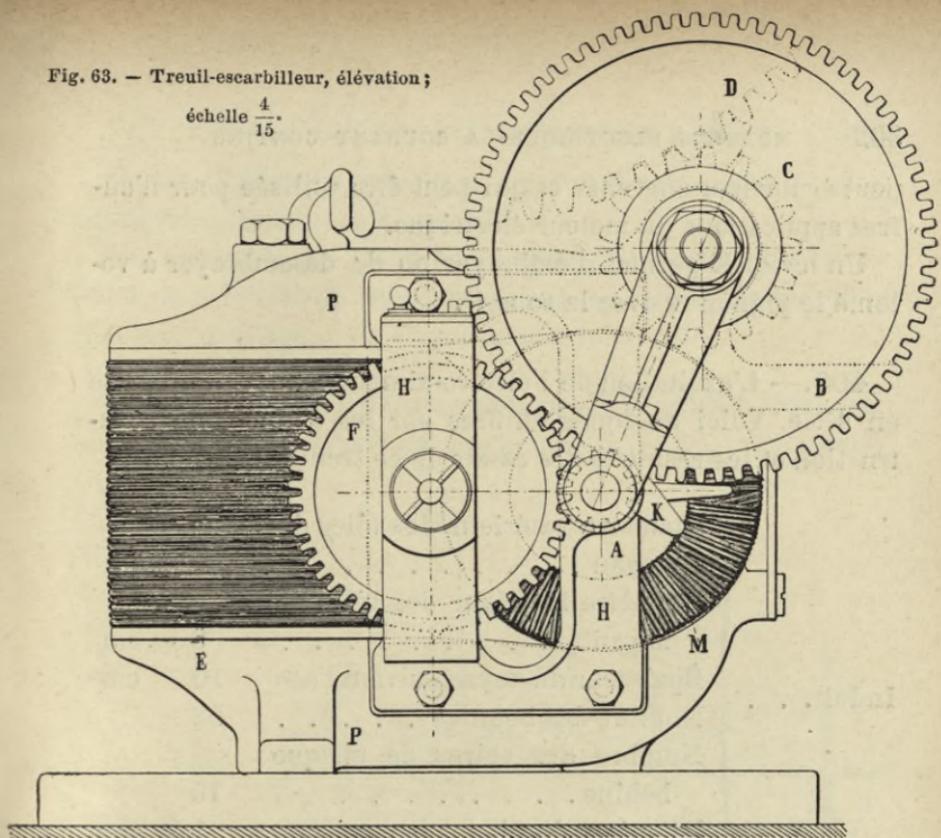
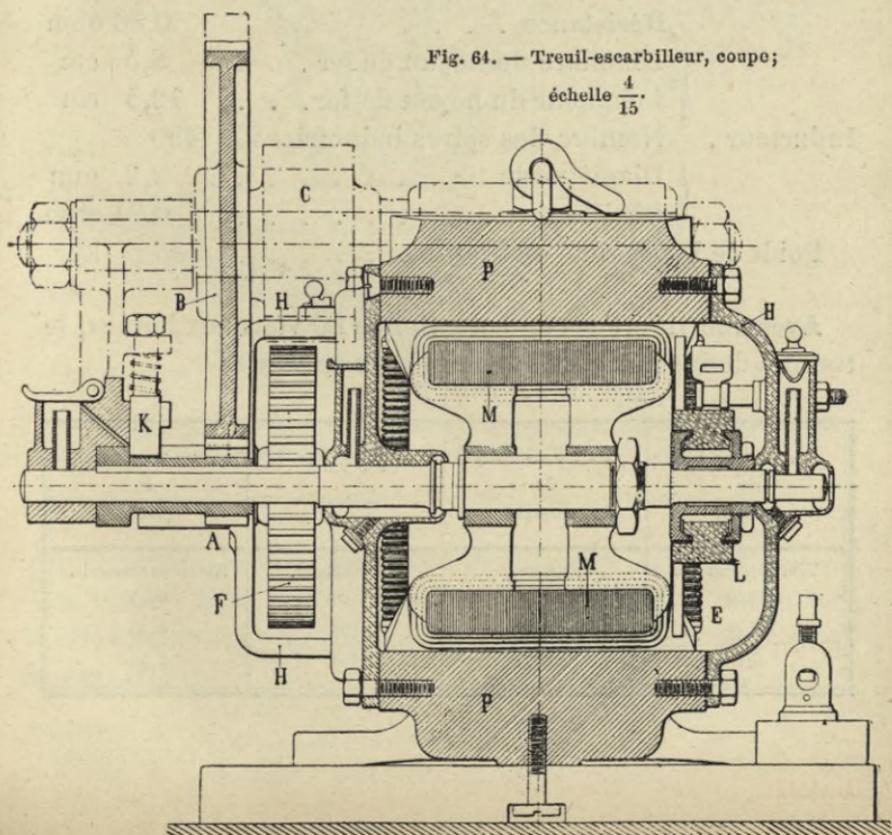


Fig. 64. — Treuil-escarbilleur, coupe;

échelle $\frac{4}{15}$.



peut également engrener et qui peut être utilisée pour d'autres applications du moteur électrique.

Un levier K permet d'embrayer ou de désembrayer à volonté le pignon A avec la roue B.

400.— L'excitation de l'électro-aimant inducteur est faite en série. Voici quelques chiffres sur les données de construction et les résultats des essais de ce treuil électrique :

	Diamètre extérieur des tôles du		
	noyau	13	cm
	Diamètre intérieur des tôles du		
	noyau	9	cm
Induit. . .	Épaisseur du noyau suivant l'axe	10	cm
	Nombre des bobines	52	
	Nombre des spires de chaque		
	bobine	15	
	Diamètre du fil	1,2	mm
	Résistance	0,86	ohm
Inducteur .	Diamètre du noyau de fer . . .	8,5	cm
	Longueur du noyau de fer . . .	12,5	cm
	Nombre des spires inductrices .	430	
	Diamètre du fil	2,2	mm
	Résistance	0,71	ohm
	Poids de l'ensemble du moteur	53	kg

Avec une différence de potentiel de 80 volts aux bornes, le treuil a donné aux essais les résultats suivants :

VITESSE de l'induit.	INTENSITÉ du courant.	POIDS soulevé.	VITESSE du poids.
Tours par minute.	Ampères.	Kilogrammes.	Mètres par seconde.
1220	8,5	80	0,36
1110	9,5	100	0,33
1010	10,7	120	0,30

Comme l'indique son titre, ce treuil sert à monter des chaufferies les bennes d'escarbilles.

Un commutateur de mise en marche permettant d'introduire dans le circuit une fraction plus ou moins grande d'un rhéostat constitue toute l'installation électrique.

401. Treuil pour cuirassé, de la Société Edison.

— Ce treuil, représenté par les figures 65 et 66, est actionné

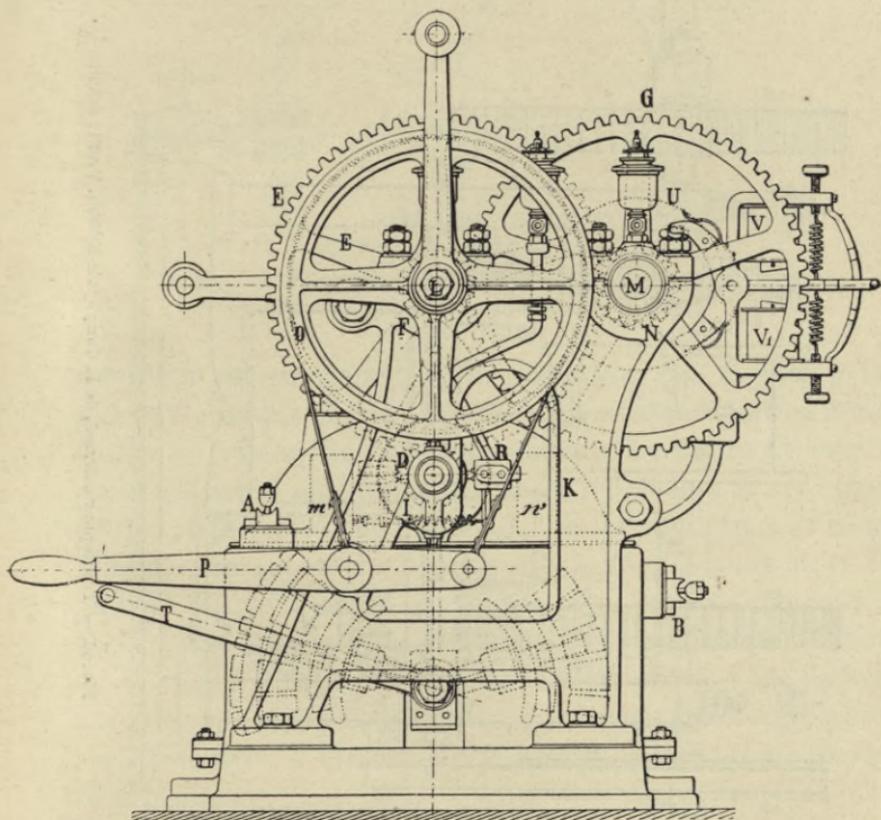


Fig. 65. — Treuil pour cuirassé, de la *Compagnie Edison*. Élévation; échelle $\frac{1}{10}$.

par un moteur électrique dont l'induit I est du type Edison. L'inducteur K se compose de deux électro-aimants munis de masses polaires et réunis par une culasse servant de plaque de fondation.

Les balais en charbon R sont calés sur le collecteur Q dans un plan parallèle aux lignes de force ; cela tient à la

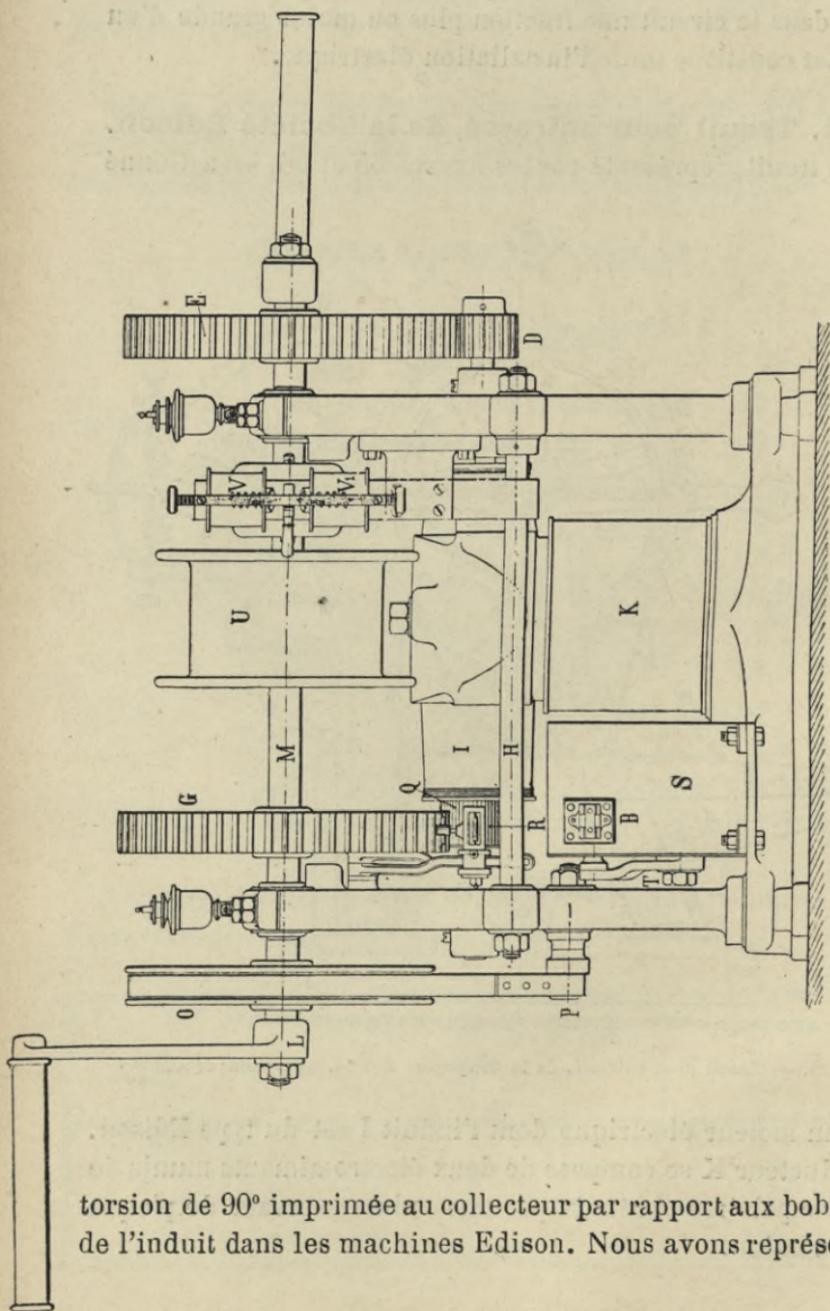


Fig. 66. — Treuil pour entrassé, de la Compagnie Edison. Profil ; échelle $\frac{1}{10}$.

torsion de 90° imprimée au collecteur par rapport aux bobines de l'induit dans les machines Edison. Nous avons représenté

les porte-balais séparément dans la figure 67, en même temps que la coupe de l'un de ces balais.

Les électro-aimants inducteurs sont enroulés de deux fils

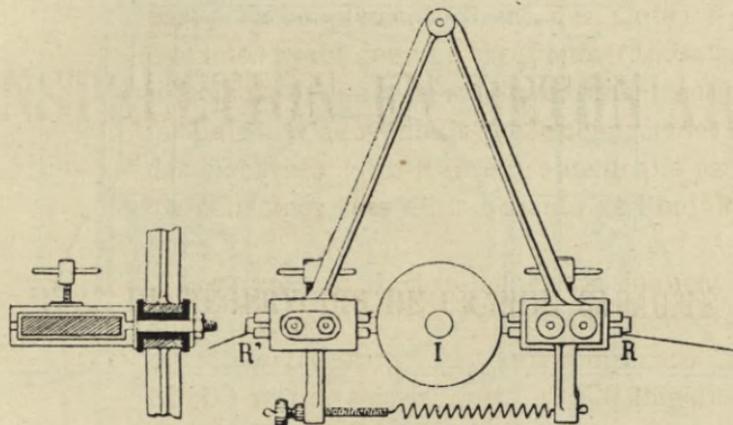


Fig. 67. — Porte-balais de l'électromoteur d'un treuil pour cuirassé, de la *Compagnie Edison*; coupe dans un balai.

dont l'un est constamment en dérivation par rapport à la source électrique et dont l'autre est momentanément en dérivation au moment de l'arrêt du moteur. La figure 68 représente d'ailleurs schématiquement les inducteurs K avec leur double enroulement et l'induit I. Les extrémités A et B de l'un des enroulements aboutissent à deux bornes A et B placées sur le moteur et représentées dans la figure 66. C'est à ces bornes que sont fixés les conducteurs venant de la source électrique. Les extrémités m' et n' de l'autre enroulement sont reliées, grâce aux bornes m' et n' placées sur l'inducteur, à l'inverseur de courant S, dont nous parlerons bientôt.

402. — Le pignon denté D de 11 dents monté sur l'arbre de l'induit commande la roue E de 66 dents montée sur l'arbre intermédiaire L. Un pignon F de 13 dents calé sur cet arbre engrène avec une seconde roue G de 66 dents qui entraîne l'arbre de commande M portant le tambour U, sur lequel

peuvent s'enrouler 8,5 m de câble en fil d'acier de 10,5 mm de diamètre. Sur l'arbre L, peuvent se monter des manivelles pour la commande à bras, une ou deux à chaque extrémité.

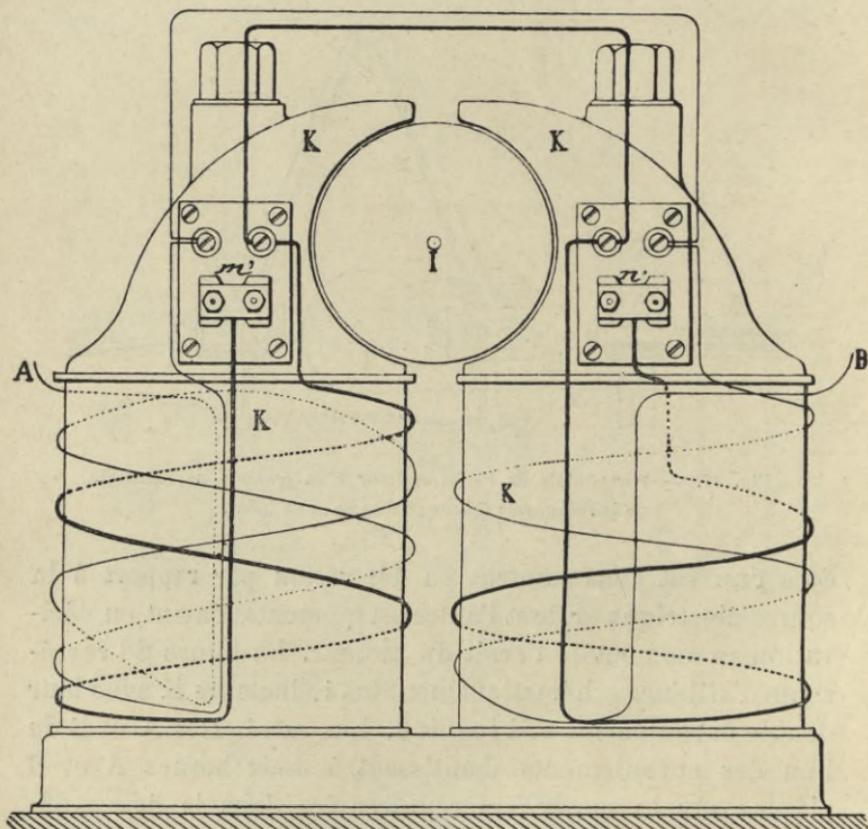


Fig. 68. — Inducteurs et enroulements d'un treuil électrique de la *Compagnie Edison*, pour cuirassé.

Les appareils de sécurité comprennent un frein à lame placé sur la poulie O de l'arbre intermédiaire L et manœuvré à la main au moyen du levier P (*fig. 65 et 66*) ; en même temps un linguet de sûreté appliqué au rochet N et manœuvré automatiquement grâce aux électro-aimants V et V₁ immobilise le treuil au moment du stoppage, soit à la montée, soit à la descente. Les électro-aimants V et V₁ sont actionnés par la manœuvre du levier T du rhéostat-inverseur S.

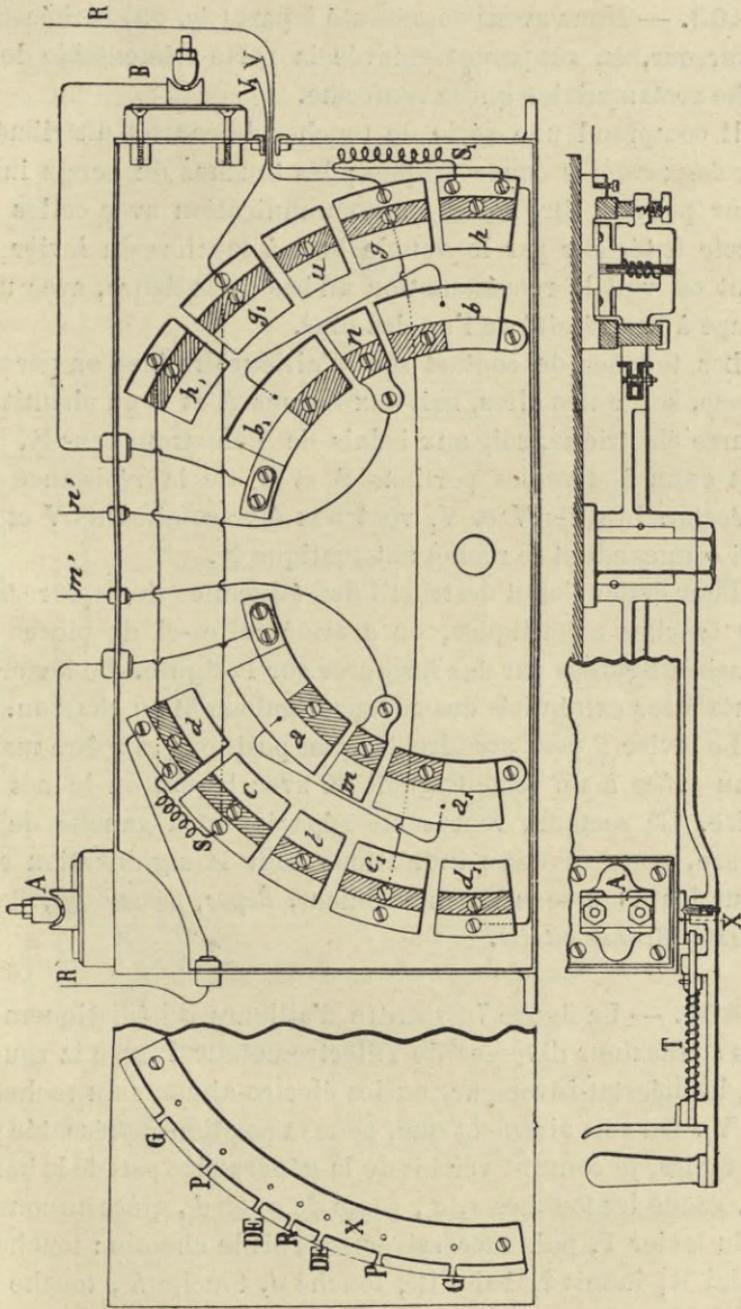


Fig. 69. — Rhéostat-inverseur de la Compagnie Edison; levier de manoeuvre du rhéostat, coupe à l'extrémité.

403. — Nous avons représenté à part (*fig. 69*) le rhéostat-inverseur, en supposant enlevée la porte démontable de la boîte rectangulaire qui le renferme.

Il comprend une série de touches de contact distribuées sur deux cercles concentriques ; les touches du cercle intérieur peuvent être mises en communication avec celles du cercle extérieur par le double bras à touches du levier T, dont on voit la représentation au bas de la figure, avec une coupe à l'extrémité de l'un des bras.

Les touches de contact sont d'ailleurs reliées en permanence, soit entre elles, soit aux bornes A et B où aboutit la source électrique, soit aux balais de l'électromoteur R, R', soit enfin à diverses portions S et S₁ de la résistance du rhéostat. Les fils V et V₁ vont aux électro-aimants V et V₁ qui commandent le rochet automatique N.

Pour éviter l'effet destructif des étincelles de rupture sur les touches métalliques, on a armé celles-ci de pièces en charbon figurées par des hachures sur la figure. Le levier T porte à ses extrémités des contacts également en charbon.

Le levier T peut prendre diverses positions et y être maintenu grâce à un secteur-guide X avec lequel on le met en prise. Ce secteur, représenté séparément à gauche de la figure, porte diverses indications dont la signification est, pour les deux sens du mouvement, *Repos, Démarrage, Petite vitesse, Grande vitesse.*

404. — La figure 70 montre d'ailleurs schématiquement les connexions diverses de l'électromoteur I avec la source G, le rhéostat-inverseur, ou les électro-aimants du rochet V et V₁. On voit aisément que, pour la position représentée par la figure, le courant venant de la génératrice part de la borne A, gagne les touches *a, a₁*, passe de *a₁* en *d₁*, grâce au contact *f* du levier T, puis successivement suit le chemin : touche *h*, balai R, induit I, balai R', touche *d*, touche *h₁*, touche *b₁*, borne B.

Aucune portion du rhéostat n'étant intercalée dans le cir-

cuit, la vitesse est maximum. Si on tourne le levier de façon à le ramener vers les touches de contact g_1 et c_1 , on voit qu'on introduit dans le circuit la somme des résistances S et S_1 .

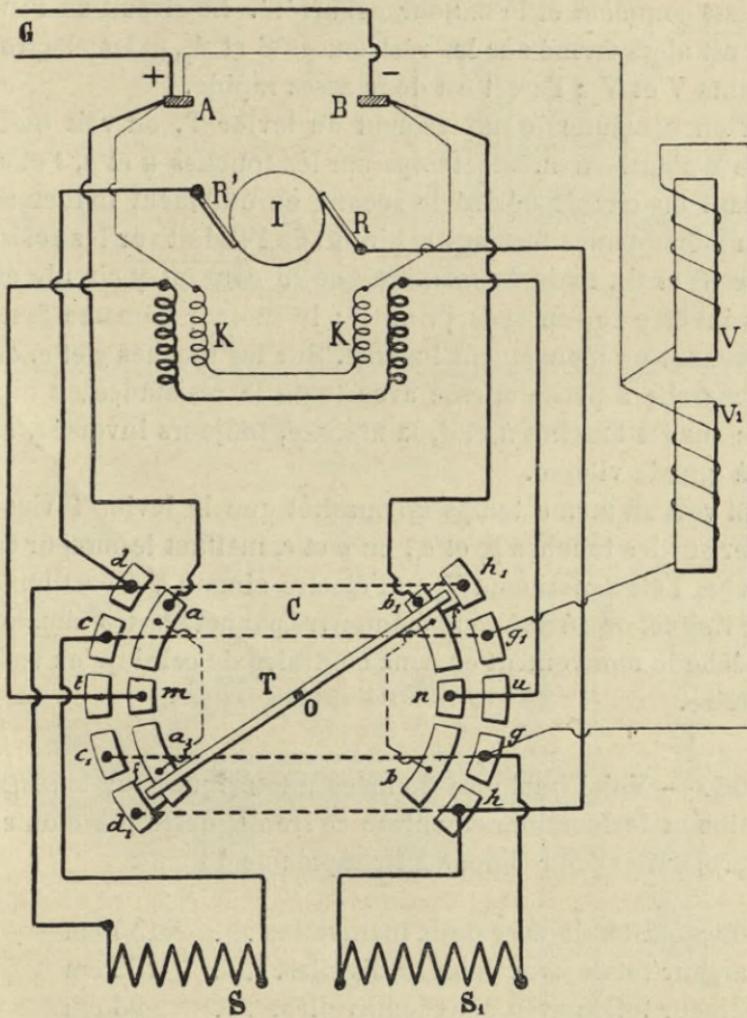


Fig. 70. — Connexions entre l'électromoteur et le rhéostat-inverseur dans le treuil électrique de la *Compagnie Edison*.

Lorsque les contacts du levier T occupent une position intermédiaire entre les lames g_1 et u , c_1 et t , en même temps

que la résistance est introduite dans le circuit de l'induit, le second enroulement de l'inducteur est mis en dérivation, ce qui augmente le champ pour le démarrage.

Sur les touches u et t , l'interruption du courant dans l'induit est complète et le moteur est arrêté. Le circuit de l'induit est alors fermé sur les résistances S et S_1 , et les électro-aimants V et V_1 ; l'arrêt est donc assez rapide.

Si on continue le mouvement du levier T , on voit qu'il porte d'abord en même temps sur les touches u et g , t et c , mettant en circuit dérivé le second enroulement inducteur et en même temps fermant le circuit de l'induit sur les résistances S et S_1 , mais de manière que le courant y circule en sens inverse de son sens primitif; le moteur démarre donc en prenant un mouvement inverse. Sur les touches g et c , on a la marche à petite vitesse avec toute la résistance en circuit; sur les touches h et d , la marche, toujours inversée, se fait à grande vitesse.

On voit en même temps qu'aussitôt que le levier T vient porter sur les touches g_1 et c_1 , ou g et c , mettant le moteur en marche, l'électro-aimant V_1 ou l'électro-aimant V est actionné et le linguet de sûreté étant manœuvré par cet électro-aimant, empêche le mouvement en sens contraire de celui qu'on veut produire.

405. — Voici quelques données numériques sur la construction et le fonctionnement de ce treuil, destiné à monter des projectiles pour canons à tir rapide de 14 cm :

Longueur totale avec deux manivelles	155 cm
Largeur totale avec deux manivelles.	102 cm
Hauteur totale avec deux manivelles.	93 cm
Poids total du treuil	470 kgr
Poids de l'électromoteur.	300 kgr
Intensité du courant	41 ampères
Différence de potentiel aux bornes	65 volts
Vitesse de l'induit, par minute.	1250 tours

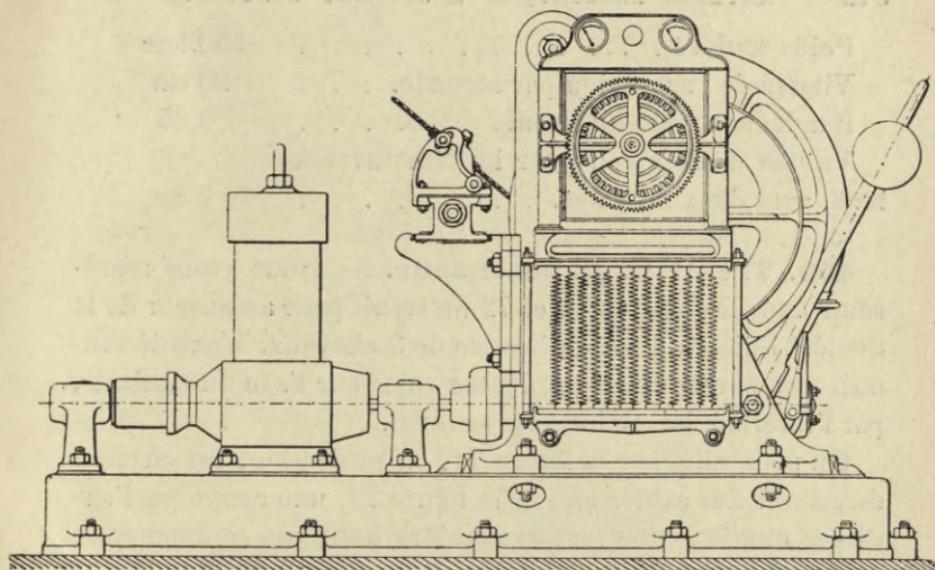


Fig. 71. — Treuil pour ascenseur, de la *Compagnie Edison*.

Profil, échelle $\frac{1}{25}$.

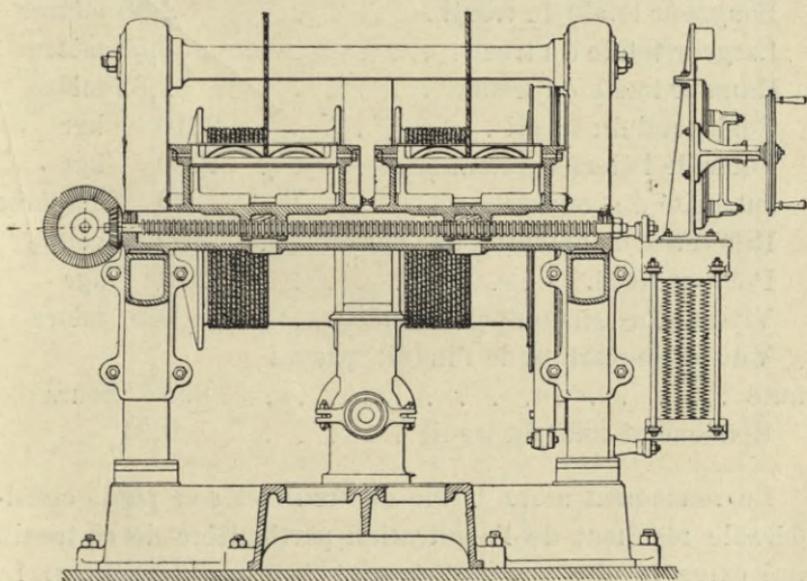


Fig. 72. — Treuil pour ascenseur, de la *Compagnie Edison*.

Élévation, échelle $\frac{1}{25}$.

Poids soulevé	350 kgr
Vitesse de l'ascension par seconde.	50 cm
Rendement total du treuil.	0,65
Vitesse d'ascension pour la manœuvre à bras, avec deux hommes.	7 cm

406. Treuil pour ascenseur. — Nous avons représenté dans les figures 71 et 72 un treuil pour ascenseur de la Société Edison, d'une puissance de 3 chevaux. L'axe de l'induit commande une roue dentée calée sur l'axe du tambour, par l'intermédiaire d'une vis sans fin.

On peut voir, sur la figure 71, en projection, les chariots directeurs des câbles et, sur la figure 72, une coupe par l'axe de ces chariots montrant la manière dont est commandé le mouvement de ces chariots.

Le moteur du type Edison est gouverné à l'aide d'un rhéostat visible sur la figure 71; un frein manœuvré à la main assure la sécurité de la manœuvre.

Longueur totale du treuil	2,50 mètres
Largeur totale du treuil.	1,58 mètre
Hauteur totale du treuil.	1,62 mètre
Poids total du treuil	2810 kgr
Poids de l'électromoteur seul	1050 kgr
Intensité du courant	48 ampères
Différence de potentiel aux bornes	100 volts
Poids soulevé.	210 kgr
Vitesse d'ascension par seconde	0,5 mètre
Vitesse de rotation de l'induit, par minute	800 tours
Rendement total du treuil	0,31

Le rendement assez faible du treuil et son poids considérable résultent de l'application particulière de ce treuil, qui exige la plus grande sécurité de marche possible. Le treuil peut, en effet, développer 3 chevaux, et, en marche normale, il ne donne guère que 2 chevaux.

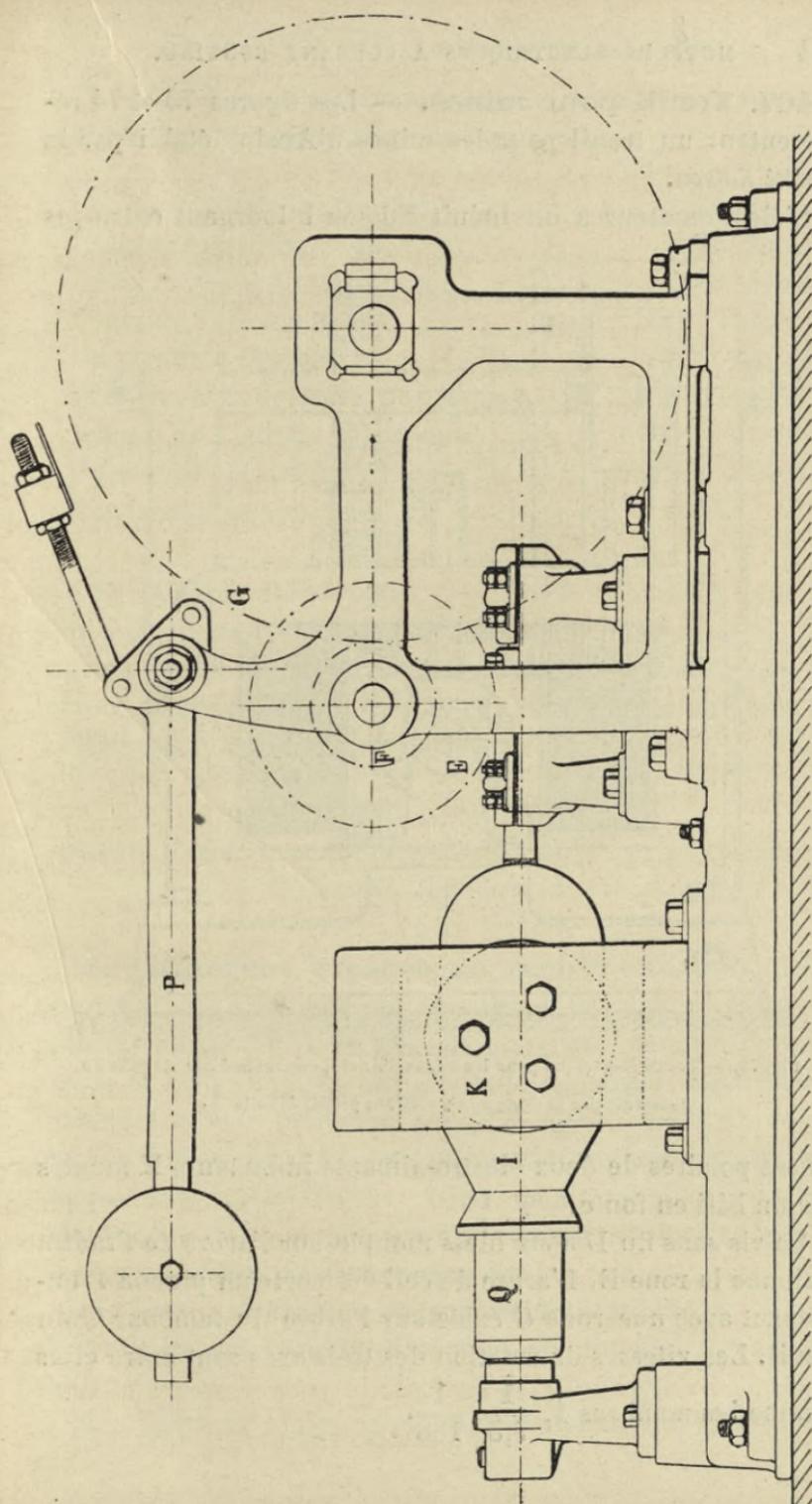


Fig. 73. — Treuil électrique pour les mines d'Anzin, commandé par les mines d'Anzin, construit par la Compagnie Edison; élévation, échelle $\frac{1}{10}$.

407. Treuil pour mines. — Les figures 73 et 74 représentent un treuil pour les mines d'Anzin, établi par la *Société Edison*.

L'électromoteur a un induit Edison I tournant entre les

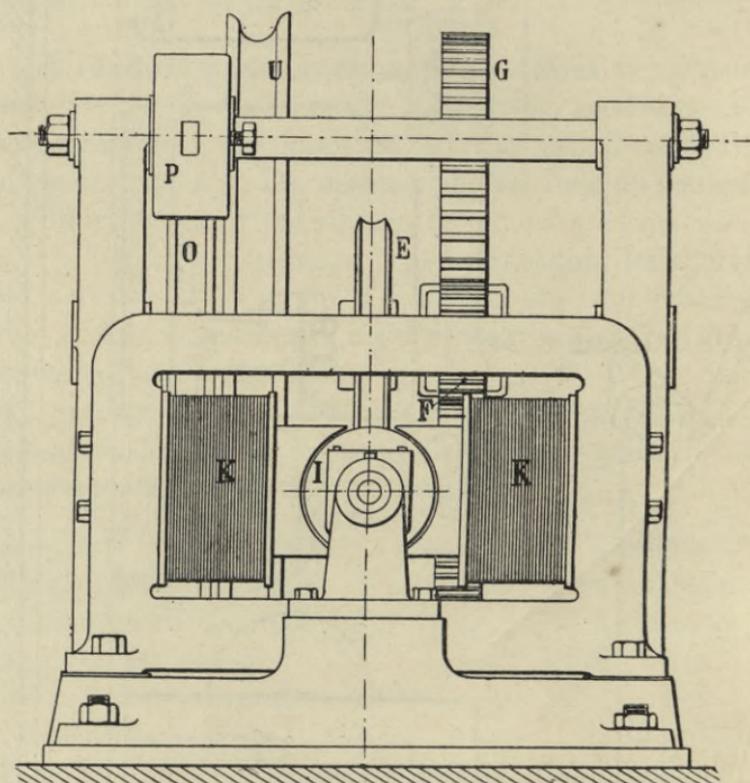


Fig. 74. — Treuil électrique pour les mines d'Anzin, commandé par vis sans fin, construit par la *Compagnie Edison*; profil, échelle $\frac{1}{10}$.

pièces polaires de deux électro-aimants inducteurs K montés sur un bâti en fonte.

La vis sans fin D à six filets montée sur l'arbre de l'induit actionne la roue E. L'arbre de celle-ci porte un pignon F engrenant avec une roue G calée sur l'arbre du tambour U du treuil. Les vitesses de rotation des trois axes sont entre elles comme les nombres $1, \frac{1}{7,5}, \frac{1}{168}$.

Un frein à lame manœuvré par le levier P agit sur une poulie O, montée sur l'arbre du tambour.

Longueur totale du treuil	1,75	mètre
Largeur totale du treuil.	0,75	mètre
Hauteur totale du treuil.	0,88	mètre
Poids de l'électromoteur	500	kgr
Intensité du courant	10	ampères
Différence de potentiel aux bornes . . .	330	volts
Vitesse de l'induit, par minute. . . .	1400	tours
Puissance mécanique utile.	3	chevaux
Rendement industriel total	0,65	

408. Grue électrique. — Nous donnons, dans la figure 75, la représentation schématique d'une grue mobile construite par la *Société Gramme*; elle est actionnée par un moteur électrique de 2 chevaux et peut soulever un poids de 1 200 kgr à une hauteur de 8 mètres.

MONTE-CHARGES ÉLECTRIQUES POUR LE SERVICE DE L'ARTILLERIE
A BORD DES NAVIRES

409. Diverses espèces de monte-charges électriques. — Le service des munitions des canons à tir rapide est aujourd'hui assuré, sur un grand nombre de cuirassés et de croiseurs, par des monte-charges électriques. Plusieurs grands cuirassés français actuellement en construction auront aussi leur grosse artillerie desservie par des monte-charges électriques. Nous décrirons d'ailleurs en détail plus loin les monte-charges électriques des canons de 24 cm du croiseur chilien *Capitan Prat*.

La grosse artillerie et les canons à tir rapide de 14 cm et de 16 cm ont toujours des *monte-charges électriques alternatifs*.

La plupart du temps aussi ce sont des monte-charges de

cette catégorie qui desservent les canons à tir rapide de 10 cm et même de 67, 47 et 37 mm.

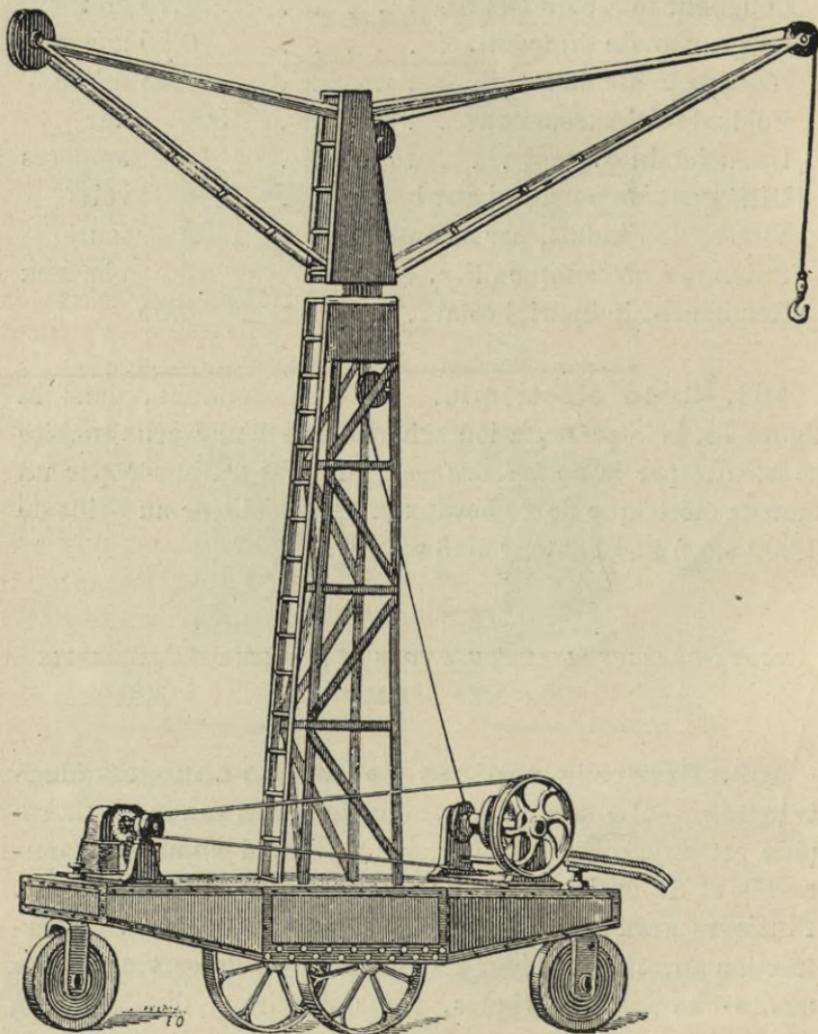


Fig. 75. — Grue électrique de la Société Gramme.

Les monte-charges électriques continus ou norias électriques, autrefois en faveur, semblent aujourd'hui délaissés et on

n'en rencontre plus guère que quelques applications pour les petits canons.

410. Monte-charges alternatifs. — Dans les monte-charges de cette espèce, les gargousses et projectiles sont montés dans une benne animée par un treuil électrique d'un mouvement alternatif de montée et de descente. Nous allons successivement décrire la benne et le porte-charge, le treuil électrique, les appareils de manœuvre.

411. Dispositions de la benne et des cartouches.

— La benne, maintenue latéralement par des guides verticaux, est suspendue à un câble en acier qui, après avoir passé sur un certain nombre de poulies de renvoi, s'enroule sur le tambour d'un treuil électrique.

La plate-forme inférieure de la benne porte des griffes de sûreté pouvant arrêter la chute en cas de rupture du câble. Les guides verticaux, primitivement en bois, dans le but de favoriser l'application des griffes, portent actuellement une crémaillère pour le même objet; le bois s'arrachait, en effet, par le fonctionnement des griffes et les éclats entravaient un fonctionnement ultérieur du treuil.

Quand la gargousse et le projectile sont réunis en une cartouche, comme dans les canons à tir rapide de 10 cm et de 14 cm, les cartouches sont à l'avance réunies en paquets de 4 ou 6. Chaque paquet, formé par des ligatures en filin d'acier, est suspendu à un curseur qui peut courir le long d'un rail.

Les paquets, tout préparés, sont arrimés dans les soutes avec leurs curseurs en place sur les rails qui forment un réseau plus ou moins complexe. Un autre réseau de rails existe dans les batteries et au voisinage des canons à desservir.

La benne porte d'ailleurs à la partie supérieure un bout de rail qui doit être en coïncidence parfaite, quand cette benne est à bout de course, avec le rail de la soute ou avec le rail de la batterie; de telle sorte qu'on peut aisément

charger la benne dans la soute, en faisant passer les paquets de cartouches du rail fixe sur le bout de rail de la benne, ou décharger la benne, de la même manière, dans la batterie.

Pour les canons de 16 cm, même à tir rapide, la gargousse et le projectile étant séparés, des porte-charges rigides avec tablettes superposées soutiennent 4 gargousses et 4 projectiles. Ces porte-charges sont munis de curseurs comme les paquets de cartouches dont il est question plus haut ; ils sont emmagasinés dans les soutes et montés aux canons dans des bennes munies d'un bout de rail.

Dans certains cas, les canons à alimenter étant sur le pont du navire, la difficulté d'y installer un système de rails destinés à recevoir les cartouches hissées par la benne a fait recourir à un autre système de porte-charge. La benne est supprimée. Le paquet de cartouches ou le support qui les porte est croché au câble dans la soute ; il est hissé par le treuil électrique jusqu'à la partie supérieure du puits du monte-charge. Là il se met en prise avec deux verrous portés par une sorte de lanterne pouvant basculer autour d'un axe horizontal.

Lorsque le porte-charge est engagé dans la lanterne et repose sur les verrous, on le décroche du câble et on fait basculer la lanterne ; le porte-charge est alors retiré et roulé près des canons, soit au moyen d'un petit chariot, soit au moyen des roulettes qu'il porte à demeure.

Le câble redescend dans le puits chercher un nouveau porte-charge, grâce à un contrepoids en plomb qui lui est fixé.

Les cartouches des canons à tir rapide de 67, 47 ou 37 mm sont montées dans des caisses déposées à la main sur la plate-forme de la benne.

412. Dispositions du treuil électrique. — Le moteur électrique le plus communément employé a un seul électro-aimant inducteur et deux masses polaires, un induit en forme d'anneau Gramme et des balais en charbon ; sa

forme est presque toujours celle représentée par les figures 63 et 64; les dimensions en sont d'ailleurs variables avec la puissance. L'excitation des inducteurs est toujours en dérivation.

On rencontre quelques treuils où l'électro-moteur est celui représenté schématiquement par la figure 68; l'induit est alors du type Edison.

La transmission du mouvement de l'axe de l'induit au

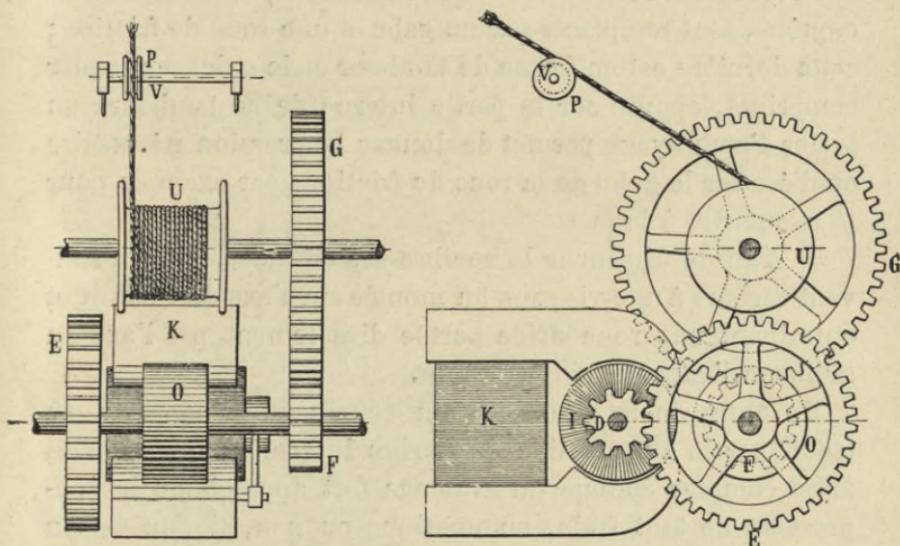


Fig. 76. — Treuil monte-charge pour canons à tir rapide, modèle de MM. Sautter et Harlé.

Disposition schématique des organes de transmission en élévation et en profil.

tambour d'enroulement du câble se fait par trois systèmes principaux :

1° La transmission comprend un double train d'engrenages, ainsi que nous l'avons représenté schématiquement dans la figure 76.

Le pignon D, monté sur l'axe de l'induit I, commande la roue E. L'axe de cette dernière porte un second pignon F entraînant la roue G et le tambour U d'enroulement du câble.

Un frein automatique Mégy O est placé sur l'arbre inter-

médiaire, entre la roue E et le pignon F. Il empêche tout mouvement de la benne auquel ne participe pas le moteur électrique.

Pour diminuer le bruit désagréable des engrenages tournant très vite, on eut l'idée d'incruster de cuir le métal des dents, mais ce moyen resta insuffisant et l'on eut alors recours au second mode de transmission.

2° Dans le second mode de transmission, le pignon D, calé sur l'arbre de l'induit, et la roue dentée E, avec laquelle il engrène, sont remplacés par un galet et une roue de friction; cette dernière est en forme de tambour et le galet, en papier comprimé, appuie sur la partie interne de ce tambour; un levier d'embrayage permet de donner la pression nécessaire ou d'écarter le galet de la roue de friction, par exemple pour la manœuvre à bras.

3° Afin de diminuer le nombre des engrenages, on a souvent recours à une vis sans fin montée sur l'axe de l'induit et entraînant une roue striée portée directement par l'axe du tambour d'enroulement du câble.

En outre de la simplification considérable apportée au treuil par la suppression de l'arbre intermédiaire, on peut aussi compter comme un avantage fort appréciable la suppression de tout frein, automatique ou non, si l'on a soin d'employer une vis *non réversible* qui tient lieu elle-même de frein. Mais la grande simplicité et la facilité de manœuvre dues à l'emploi de la vis tangente non réversible ont malheureusement pour revers un rendement assez faible.

Tandis que le double train d'engrenages absorbe en frottements divers environ 35 p. 100 de la puissance mécanique développée par le moteur électrique, il faut compter, avec la vis tangente, sur une perte d'environ 60 p. 100.

De plus, pour éviter une usure rapide, il faut prendre soin de noyer complètement la vis dans l'huile.

412 bis. — REMARQUE. — Le plus souvent, les treuils sont disposés de manière à permettre commodément la manœuvre

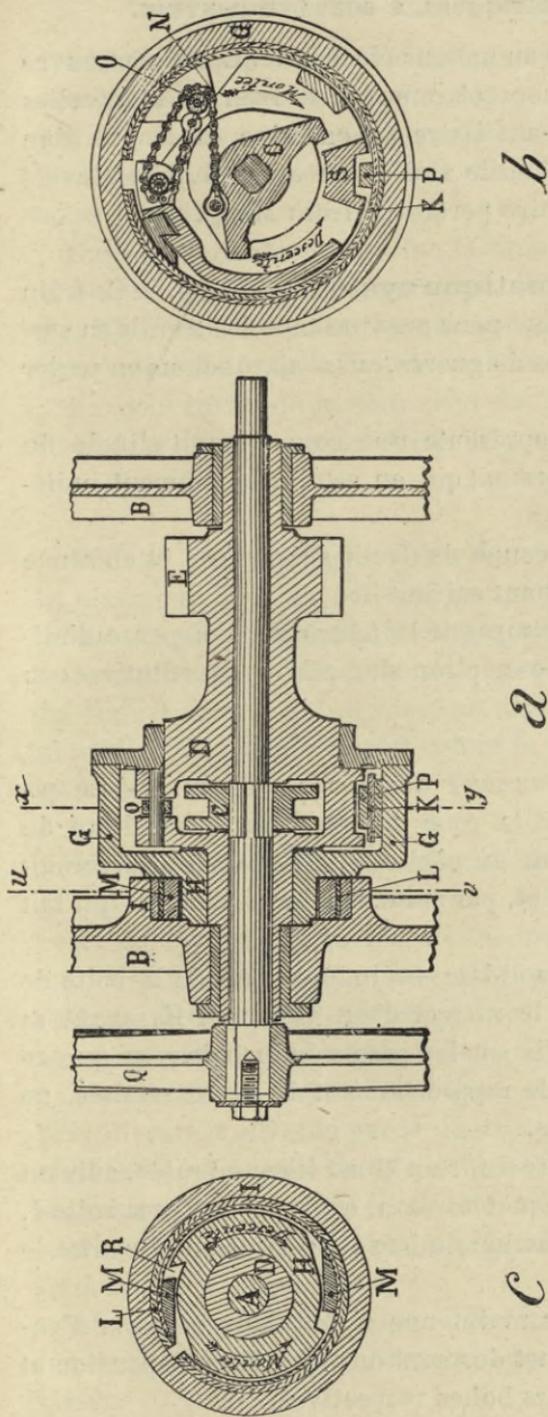


Fig. 77. — Frein automatique, système Mège.

a, Coupe par l'axe ; b, Coupe par xy ; c, Coupe par uv.

LÉGENDE

- A. Arbre du frein ;
- B. Bâti du treuil ;
- C. Douille de manoeuvre enmanchée à carré sur l'arbre A ;
- D. Manchon d'entraînement ;
- E. Pignon de commande solitaire du manchon D ;
- G. Boîte de frein montée folle sur le manchon D ;
- H. Came du cliquet dormant venue de fonte avec la boîte de frein ; elle permet, suivant le sens de la rotation, le serrage ou le desserrage du ressort L ;
- J. Boîte du cliquet dormant fixée au bâti ;
- K. Ressort circulaire d'entraînement et de frein, garni de cuir ;
- L. Ressort du cliquet dormant garni de cuir ;
- M. Taquets rivés au ressort du cliquet, par l'intermédiaire desquels s'effectue le serrage et le desserrage du ressort L ;
- N. Charnette de desserrage du ressort de frein K ;
- O. Galets de renvoi de la chaînette N, fixés au manchon D ;
- P. Taquet d'entraînement du ressort K par le manchon D ;
- Q. Roue de commande de l'arbre du frein.

à bras en cas d'avarie au moteur électrique. Cette manœuvre à bras est généralement obtenue au moyen de manivelles montées sur un arbre auxiliaire qui entraîne, au moyen d'un pignon et d'une chaîne de Galle, un autre pignon claveté sur l'arbre intermédiaire portant le frein Mégy.

413. Frein automatique système Mégy. — Ce frein sert d'appareil de sûreté pour presque tous les treuils en service à bord des navires de guerre, aussi allons-nous en parler avec quelque détail.

La figure 77, *a*, représente une coupe longitudinale du frein et du cliquet dormant qui en est le complément indispensable.

En *b*, on voit une coupé du frein suivant *xy*, et en *c* une coupe du cliquet dormant suivant *uv*.

La légende qui accompagne la figure nous dispense d'ailleurs de faire une description des pièces constitutives du frein.

414. — FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL DU FREIN. — Le pignon E engrène avec la roue dentée montée sur l'axe du tambour d'enroulement du câble. La charge à soulever agit donc sur le pignon E et, par suite, sur le manchon D qui fait corps avec lui.

Le manchon D est solidaire ou indépendant de la boîte de frein G, suivant que le ressort d'entraînement K, ayant sa libre expansion, appuie sur les parois de la boîte, ou que ce ressort, déformé par le rapprochement de ses extrémités, ne frotte plus sur la boîte.

D'autre part, la boîte du frein G est libre ou calée, suivant que le ressort L du cliquet dormant est serré contre la boîte I, ou est déformé par l'action du bec R de la came H contre le taquet M.

La charge est donc maintenue si les deux ressorts d'entraînement et de cliquet dormant ont leur libre expansion et sont serrés contre leurs boîtes respectives.

415. — MONTÉE. — L'arbre, entraîné par la roue Q, transmet le mouvement du moteur à la douille de manœuvre C qui vient buter sur le manchon D en S (*fig. 77, b*). Le manchon entraîne le ressort K par son taquet P, et par suite la boîte de frein G.

Dans ce sens de la marche, la came H ouvre le ressort L du cliquet dormant en agissant sur le taquet M par le bec R (*fig. 77, c*). La boîte de frein G est alors libre de suivre le mouvement du ressort K et du manchon D.

Le mouvement du moteur peut donc se transmettre librement à la charge par la douille C, le manchon D et le pignon E.

416. — ARRÊT. — Si l'action du moteur sur l'arbre cesse, le manchon D et la boîte G ne sont plus poussés par la douille C; la charge tend à entraîner le manchon et la boîte en sens inverse; immédiatement la came H laisse le ressort du cliquet dormant reprendre son expansion et appuie énergiquement le cuir du ressort contre la boîte fixe I; la charge est donc calée.

417. — DESCENTE. — La douille de manœuvre, entraînée par l'arbre dans le sens marqué : *Descente*, tire sur la chaînette de desserrage du ressort du frein. Le pignon E et le manchon D ne sont plus alors reliés par le ressort à la boîte de frein et au cliquet dormant; la charge les fait donc tourner d'un certain angle dans le sens de la descente.

Mais ce mouvement du manchon, de même sens que celui primitivement effectué par la douille, distend de nouveau la chaînette, et quand l'angle dont a tourné le manchon est approximativement égal à celui dont a tourné l'arbre, le ressort du frein reprend toute son expansion et cale de nouveau le manchon et la charge.

Le manchon D et le pignon E répètent ainsi les mouvements de l'arbre, et la charge est descendue ainsi avec précision.

418. — REMARQUE. — Parfois, pour égaliser le travail pendant la montée et la descente, on équilibre par un contrepoids le poids mort de la benne et la moitié de la charge utile. On peut aussi, quand les aménagements s'y prêtent, conjuguer deux monte-charges et équilibrer les deux bennes l'une par l'autre.

Il faut alors, pour ces monte-charges équilibrés, deux freins Mégy, l'un des freins agissant à la montée de la benne, l'autre à la montée du contrepoids ou de la seconde benne.

419. Appareils de manœuvre des treuils alternatifs. — Les treuils alternatifs doivent pouvoir être mis en marche pour la montée ou pour la descente; dans certains cas, on peut désirer une vitesse de marche variable à volonté. Un stoppage instantané est désirable. Il est presque toujours indispensable que l'arrêt du monte-charge se fasse dans une position parfaitement précise; c'est le cas, par exemple, des monte-charges avec bout de rail mobile qui doit venir en coïncidence parfaite avec le rail de la soute ou celui de la batterie (411).

Quand il s'agit de gros canons, on désirera aussi le plus souvent que le porte-charge s'arrête dans la position précise de chargement.

Cet arrêt devra être automatique.

Plusieurs systèmes de manœuvre et d'arrêt automatique ont été imaginés et sont encore employés à bord des navires. Nous allons examiner successivement trois de ces systèmes que nous désignerons comme il suit: 1° *Système du bloquage*; 2° *Système du déclenchement*; 3° *Système des relais*.

420. Système du bloquage. — Les appareils de manœuvre comprennent :

1° Un *interrupteur* mettant en communication la source électrique avec l'inducteur en dérivation et avec l'induit, l'interrupteur étant d'ailleurs disposé de manière que la

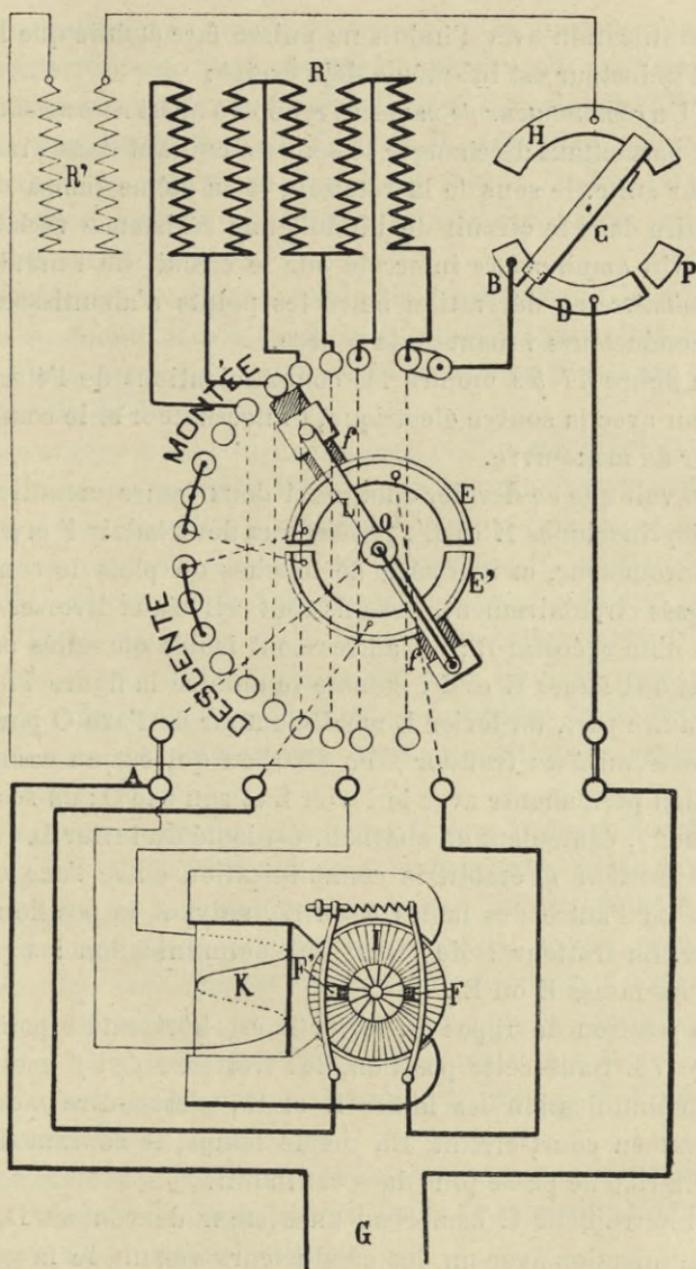


Fig. 77 bis. — Commutateur de manœuvre et disposition des circuits d'un monte-charge électrique.

communication avec l'induit ne puisse être établie que lorsque l'inducteur est lui-même déjà excité ;

2° Un *commutateur de manœuvre*, appelé aussi *rhéostat-inverseur*, permettant de changer le sens du courant dans l'induit et, par suite, le sens de la rotation, et en même temps d'introduire dans le circuit de l'induit une résistance variable ;

3° Un *ampèremètre* intercalé sur le circuit de l'induit et un *voltmètre* en dérivation entre les points d'aboutissement des conducteurs venant de la source.

La figure 77 *bis* montre les communications de l'électromoteur avec la source électrique, l'interrupteur et le commutateur de manœuvre.

On voit que ce dernier comprend deux lames métalliques hémicylindriques E et E' , reliées aux deux balais F et F' de l'électromoteur, et une série de touches ou plots de contact disposés circulairement. Les uns sont reliés aux diverses sections d'un rhéostat R ; les autres sont isolés ou reliés entre eux et aux lames E et E' , comme le montre la figure 77 *bis*.

D'autre part, un levier L mobile autour de l'axe O porte à une extrémité un frotteur f' en charbon qui est en communication permanente avec le levier L et son axe O ; un second frotteur f , également en charbon, est isolé du levier L .

Le frotteur f' établit la communication entre l'axe O et l'une ou l'autre des lames E ou E' , suivant la position du levier. Le frotteur isolé f met en communication les plots avec les lames E ou E' .

La position de repos du levier L est horizontale pour la figure 78. Dans cette position, les frotteurs f et f' mettent en communication les lames E et E' , c'est-à-dire mettent l'induit en court-circuit. En même temps, le courant de la génératrice ne passe plus dans cet induit.

L'interrupteur C comprend un secteur de contact D , en communication avec un des conducteurs venant de la génératrice G . Un secteur de contact H est en relation avec une des extrémités de l'inducteur K ; un plot de contact B est relié à une extrémité de la résistance R ; enfin, un plot P

isolé constitue une touche de repos pour la lame de contact l de l'interrupteur. Cette dernière, mobile autour d'un axe, peut mettre en communication D avec H, puis aussi D avec B, la communication de D avec H persistant comme le montre la figure. On ne peut ainsi mettre l'induit en communication avec la génératrice que si l'inducteur est tout d'abord excité.

D'ailleurs, le second conducteur, venant de la génératrice G, aboutit à une borne A à laquelle sont reliés également la seconde extrémité du fil inducteur K et l'axe O du commutateur de manœuvre.

Les choses étant ainsi disposées et l'interrupteur C étant manœuvré de manière à établir la communication entre D et H, l'inducteur K est excité, ce dont on s'assure en approchant un morceau de fer. Une résistance R' de valeur convenable est en général intercalée sur le circuit de l'inducteur. Si on établit en outre la communication entre D et B, comme sur la figure, le courant dans l'induit reste néanmoins interrompu, puisque nous supposons le levier L du commutateur de manœuvre dans sa position de repos, horizontale ici.

Tournons maintenant le levier L vers le haut, du côté de la montée (MONTÉE), on voit aisément que, grâce aux frotteurs f et f' , le courant passe dans l'induit, d'abord avec interposition de la résistance entière R, ce qui permet le démarrage sans danger; puis, si on continue à tourner le levier vers le haut, il ne reste plus dans le circuit qu'une fraction de plus en plus faible de la résistance R; enfin, on peut même supprimer entièrement du circuit de l'induit la résistance R.

Le moteur tourne et le porte-charge monte d'autant plus vite qu'on écarte davantage le levier de sa position de repos; on peut ainsi régler la vitesse.

Si on ramène le levier L vers sa position de repos, le moteur tourne de moins en moins vite; le courant est interrompu dans l'induit et enfin ce dernier est mis en court-cir-

cuit quand le levier est horizontal ; l'arrêt du moteur est alors instantané (256). Le frein Mégy (413) doit d'ailleurs empêcher tout mouvement rétrograde du porte-charge, après l'arrêt de l'électromoteur.

Si maintenant on tourne le levier vers le bas, du côté de la descente (DESCENTE), le courant est inversé dans l'induit, la vitesse de descente du porte-charge est d'autant plus grande qu'en écartant davantage le levier de sa position de repos, on intercale dans le circuit une fraction plus faible de la résistance R.

420 bis. — Soit qu'on ait manœuvré le levier du commutateur de manœuvre pour la montée ou pour la descente, si l'on veut que l'arrêt du porte-charge se produise à un endroit précis de sa course, au lieu de manœuvrer à la main le levier L pour obtenir cet arrêt, on rend cette manœuvre automatique de la manière suivante.

L'axe du levier L du commutateur de manœuvre porte une roue dentée sur laquelle s'enroule une chaîne de Galle. Cette chaîne passe également sur une noix située dans la soute. D'autre part, cette noix de la soute et une autre noix placée dans la batterie sont rendues solidaires, au moyen de bouts de chaîne de Galle reliés par une tringle qui passe dans le puits du monte-charge.

On peut ainsi, au moyen de leviers ou de volants de manœuvre, faire tourner les noix de la soute ou de la batterie et par conséquent manœuvrer le levier du commutateur de manœuvre, soit d'en bas, soit d'en haut.

Quelquefois, lorsque l'électromoteur est situé au même étage que la soute, le poste de manœuvre de la soute est supprimé et l'axe de levier du commutateur est directement relié par chaînes de Galle et tringle à la noix de manœuvre de la batterie.

La benne porte d'ailleurs un œil traversé par la tringle passant dans le puits et reliant les noix de manœuvre.

La benne étant dans la soute, on met en marche le moteur

pour la montée en manœuvrant le commutateur dans le sens convenable. Arrivé en un point de sa course préalablement déterminé par expérience, l'œil de la benne rencontre un butoir fixé à la tringle passant dans le puits et entraîne cette dernière. Le levier du commutateur de manœuvre est ainsi manœuvré automatiquement en sens inverse de la manœuvre primitivement faite à la main de la soute, et ramené vers sa position de repos.

La résistance introduite dans le circuit de l'induit est ainsi augmentée progressivement ; la vitesse de montée diminue progressivement et le moteur s'arrête enfin, quand le levier de manœuvre a été amené ainsi sur une touche de contact introduisant dans le circuit une résistance assez grande pour que l'intensité du courant soit inférieure à celle donnant au moment moteur une valeur supérieure au moment résistant.

Le moteur ne tourne plus alors et n'a plus seulement qu'une tendance à tourner.

La benne est ainsi *bloquée* en haut de sa course, sans pouvoir redescendre d'elle-même, tant à cause du frein Mégy que de la tendance de l'induit à continuer le mouvement de montée. L'intensité passant alors dans l'induit est appelée *intensité de bloquage*.

Bien entendu, on a choisi la position du butoir sur la tringle, de façon que la benne soit arrêtée à la position exacte où elle doit être, par exemple, pour établir la coïncidence entre le rail fixe et le bout de rail qu'elle porte (411). Cette position du butoir peut d'ailleurs être modifiée, grâce à des écrous disposés à cet effet.

Lors de la descente, les choses se passent de même façon.

421. — INCONVÉNIENTS DU SYSTÈME DU BLOQUAGE. — Comme il vient d'être dit (420), dans le système du bloquage, la benne s'arrête quand l'introduction automatique dans le circuit de l'induit d'une fraction de plus en plus grande du rhéostat a réduit l'intensité du courant à une valeur inférieure à celle qui correspond au moment résistant. Or, ce moment

résistant varie d'un monte-charge à l'autre, en supposant même qu'ils soient destinés à soulever la même charge, en raison des frottements différents de la transmission et des guides de la benne ; ce qui est plus grave, ces frottements sont variables, pour un même monte-charge, dans les différentes périodes de fonctionnement, en raison de l'état des surfaces frottantes, du jeu des pièces, de la *bande* du navire, de sorte que l'arrêt du moteur ne se produira pas toujours quand le levier de manœuvre aura été ramené sur la même touche et par conséquent lorsque la benne sera arrivée dans la même position.

Il faut ajouter que les machines génératrices sont sujettes à des variations de vitesse, soit par suite du fonctionnement imparfait de leurs régulateurs, soit par suite de modifications importantes dans leur charge ; il en résulte des variations souvent importantes dans la différence de potentiel fournie aux moteurs des monte-charges, ce qui change encore la position que doit occuper le levier de manœuvre pour le blocage.

Par exemple, si au moment où la benne d'un monte-charge monte et qu'elle est sur le point d'arriver à bout de course, on vient à mettre en marche un ou plusieurs autres treuils alimentés par la même génératrice, la vitesse de celle-ci diminue fatalement, au moins momentanément, en raison de l'accroissement considérable de courant nécessité pour le démarrage des treuils mis en action. La différence de potentiel prend une valeur inférieure à la valeur normale et il faudra une moindre résistance introduite dans le circuit de l'induit du moteur pour réduire l'intensité à la valeur de blocage. Le moteur s'arrête quand le levier de manœuvre a été ramené en arrière moins que d'ordinaire ; la benne s'arrête alors au-dessous de sa position normale.

Or, avec la disposition généralement adoptée, puisque, au moment de l'arrêt, l'œil placé sur la benne et qui glisse sur la tige du puits, appuie sur le butoir de cette tige, il est impossible de remettre le moteur en marche pour la montée et

par conséquent de faire ainsi remonter la benne et de rectifier sa position. Il faut la faire redescendre d'abord et recommencer ensuite la montée, lorsque la différence de potentiel est redevenue normale.

421 bis. — On a cherché à remédier en partie à cet inconvénient majeur en remplaçant l'œil fermé et fixe placé sur la benne, par une pièce formant œil fendu et pouvant tourner autour d'un axe, de manière qu'on puisse à volonté lui faire embrasser la tige portant les butoirs, ou la dégager de cette tige. De cette manière, si dans une manœuvre, la benne n'est pas montée à son poste, on peut dégager l'œil mobile et alors agir sur le levier de manœuvre de façon à faire de nouveau monter la benne; le levier de manœuvre est ramené à la main au zéro quand la benne est jugée à son poste.

421 ter. — Un autre correctif consiste à rendre oscillante l'extrémité du rail fixe de la batterie, de telle manière que le bout de rail placé sur la benne puisse l'entraîner quelque peu avec lui quand cette benne arrive en haut de sa course; la correspondance des rails persiste alors, même si le point d'arrêt de la benne varie. Il faut toutefois alors disposer les butoirs sur la tige du puits de manière que la benne monte toujours assez haut, même si la différence de potentiel est faible, pour que le rail de la benne atteigne le rail de la batterie. Mais la course du rail oscillant est nécessairement limitée, puisqu'on ne peut lui donner une trop grande inclinaison sans rendre difficile, sinon impossible, le glissement des galets du porte-charge. Généralement elle ne dépasse pas 10 centimètres, ce qui correspond à une variation possible de 10 volts environ dans la différence de potentiel fournie par la génératrice.

422. Système du déclenchement. — Dans le système du *déclenchement*, imaginé comme le précédent par *MM. Sautter*

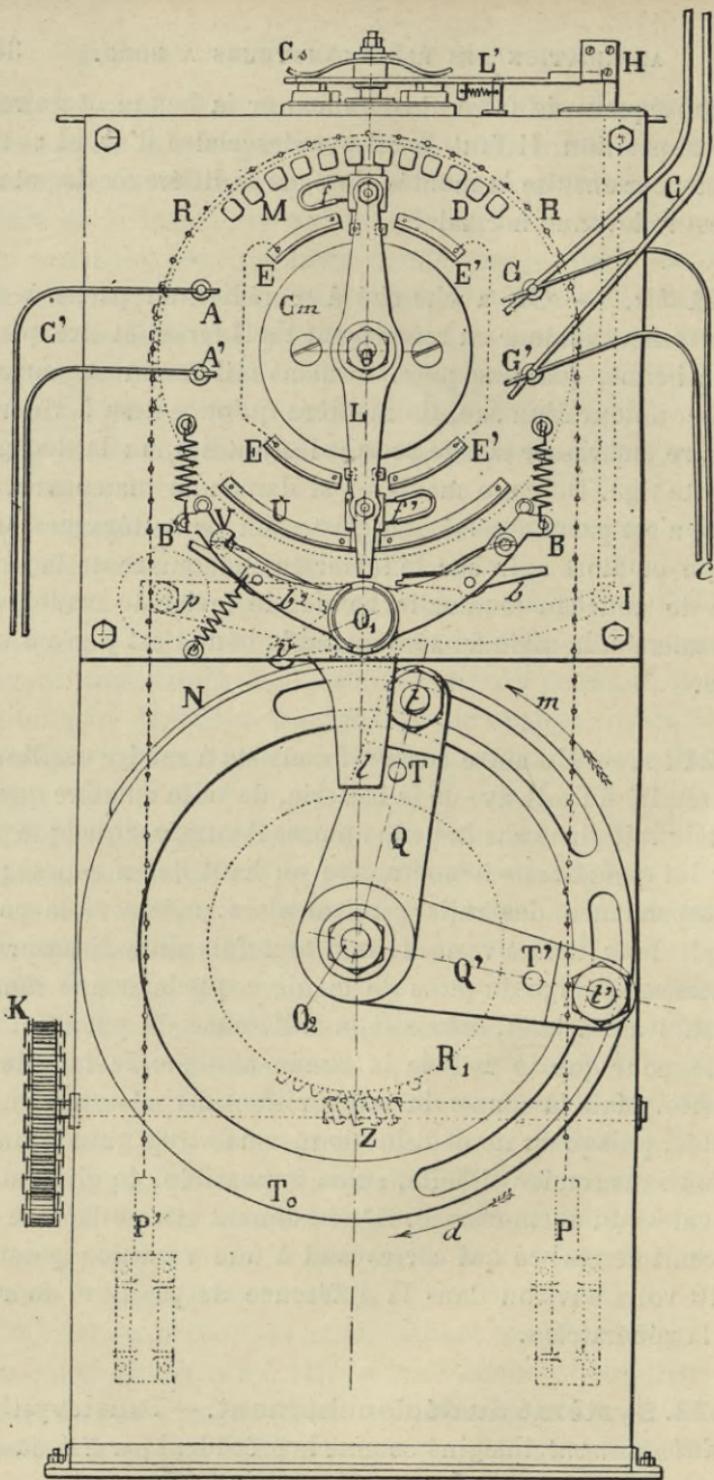


Fig. 78. — Treuil électrique à déclenchement; commutateur de manœuvre et plateau de déclenchement.

et Harlé, lorsque le monte-charge est arrivé à la fin de sa course, en haut ou en bas, le contact est complètement interrompu dans l'induit et ce dernier est mis en court-circuit, l'inducteur conservant son excitation. Cet effet se produit automatiquement par le déclenchement du levier d'un commutateur de manœuvre qui revient à sa position de repos.

Nous décrivons l'un des premiers appareils employés à

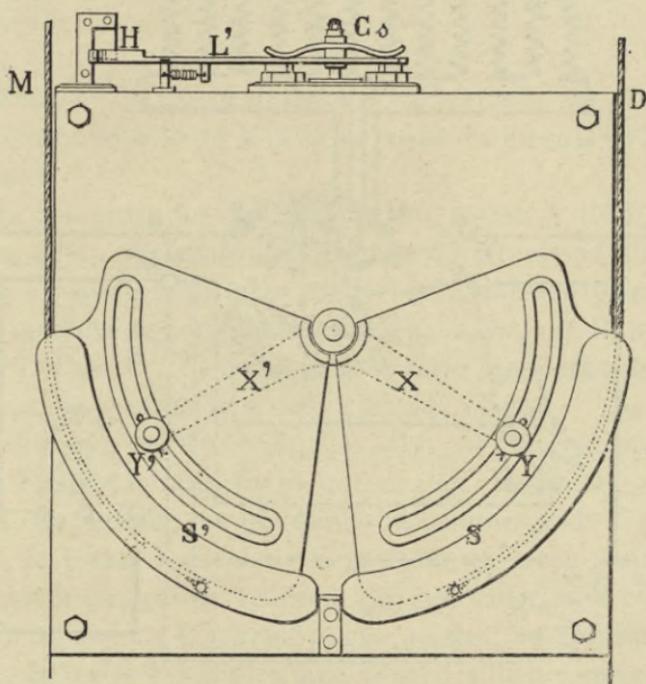


Fig. 78 bis. — Treuil électrique à déclenchement; secteurs de manœuvre.

bord des navires en indiquant les modifications qu'il a subies.

Sur le bâti du treuil électrique, dont la disposition est d'ailleurs celle que nous avons indiquée (412), est une plaque d'ardoise portant le commutateur de manœuvre C_m et un interrupteur de sécurité C_s (fig. 78 et 78 bis).

Le commutateur de manœuvre est d'ailleurs semblable, en principe au moins, à celui précédemment étudié (420).

Les deux frotteurs en charbon f et f' sont ici tous deux isolés du levier de manœuvre L , mobile autour de l'axe O . Des lames circulaires en laiton EE , $E'E'$ communiquent avec les bornes A et A' réunies par les conducteurs C' aux balais de l'électromoteur, qui est toujours, comme précédemment,

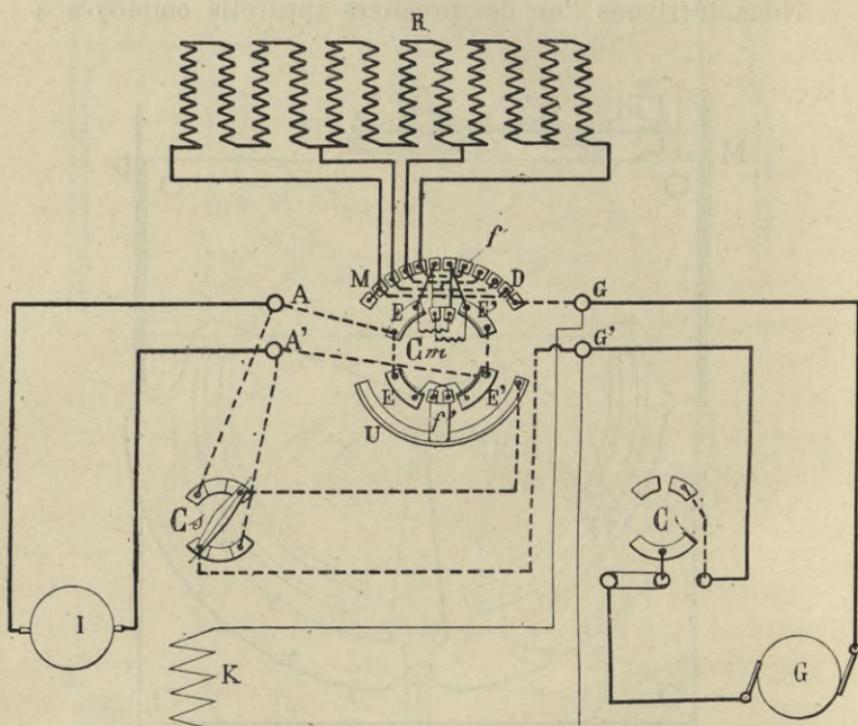


Fig. 78 ter. — Treuil électrique à déclenchement ; schéma des connexions.

excité en dérivation ; les deux parties désignées par la même lettre sont d'ailleurs en communication et leur ensemble remplace la lame hémicylindrique du commutateur précédent.

Une série de plots MD , communiquant avec les diverses sections d'un rhéostat ou avec une des bornes G auxquelles aboutissent les conducteurs C venant de la génératrice et les conducteurs c allant à l'inducteur en dérivation, et une lame U

circulaire en communication avec l'autre borne G' , permettent pour les diverses positions du levier L de faire communiquer l'induit de l'électromoteur avec la génératrice, en introduisant dans le circuit une résistance variable.

La figure 78 *ter* représente schématiquement les connexions entre le commutateur de manœuvre C_m , la génératrice G , l'induit I et l'inducteur K de l'électromoteur, le rhéostat R , l'interrupteur général C , l'interrupteur de sécurité C_s .

422 bis. — La partie supérieure du levier L (fig. 78) doit être poussée du côté de M pour la *montée* et du côté de D pour la *descente*.

Pour les positions extérieures du levier à droite ou à gauche, toute résistance est retirée du circuit de l'induit. Dans ces positions, le talon du levier L vient en prise avec les évidements de deux leviers enclencheurs B et B' mobiles autour de l'axe O_1 . Le commutateur reste ainsi dans la position de montée ou de descente à grande vitesse.

D'autre part, sur l'axe O du levier L est clavetée une roue dentée R sur laquelle passe une chaîne de Galle; celle-ci porte à chacune de ses extrémités un contrepoids P ou P' . Quand le levier L est dans la position de repos ou d'arrêt pour le moteur, qui est ici verticale, ces contrepoids reposent sur le fond de leur logement-guide; quand, au contraire, on déplace le levier L à droite ou à gauche, l'un des contrepoids se trouve soulevé, tandis que l'autre demeure appuyé sur ses cales. Si l'on vient alors à libérer le levier L , le premier contrepoids tend à le ramener dans la position de repos verticale.

Dans cette position de repos, le commutateur rompt d'ailleurs le courant dans l'induit du moteur et met ce dernier en court-circuit pour l'arrêt brusque.

Le levier de manœuvre L peut être actionné *de la soute seulement pour la montée et de la batterie seulement pour la descente*, au moyen d'un dispositif représenté par la figure 78 *bis*.

Sur l'axe O du levier de manœuvre sont montés et clavetés deux bras X et X' portant aux extrémités des doigts Y et Y'. Ces bras sont mis en mouvement à l'aide de deux secteurs S et S' montés fous sur l'axe O et recevant les extrémités des tirettes de manœuvre M et D; la tirette M, pour la montée, aboutit dans la soute et la tirette D, pour la descente, se rend dans la batterie.

Les glissières, visibles sur les secteurs S et S', permettent de limiter le mouvement angulaire donné au levier de manœuvre L. Dans le modèle que nous décrivons ici, ce système de commande est placé derrière le commutateur de manœuvre.

422 ter. — Voici maintenant le mécanisme du déclenchement automatique du levier L du commutateur de manœuvre (*fig. 78*).

L'axe du tambour d'enroulement du câble sur le treuil porte, en outre de sa roue dentée de commande, un pignon qui entraîne par une chaîne de Galle un autre pignon K monté sur l'axe d'une vis sans fin Z. Celle-ci actionne une roue striée R₁ et un tourteau T₀ clavetés sur le même arbre O₂. Sur ce tourteau se trouvent deux bras mobiles Q et Q' munis des tocs T et T' que l'on peut déplacer à volonté selon la course de montée des munitions et maintenir dans la position choisie, grâce aux écrous *t* et *t'*. Les tocs T ou T' peuvent d'ailleurs, par suite de la rotation du tourteau T₀, venir buter contre l'extrémité *l* d'un levier *lpI* à trois branches et à contrepois *p* goupillé sur l'axe O₁, autour duquel se meuvent les leviers enclencheurs B et B'. D'ailleurs des ergots portés par ces derniers sont disposés de telle sorte que, lorsque la partie *l* du levier à trois branches est poussée sur la gauche, le levier enclencheur B est entraîné et son extrémité s'abaisse; si *l* est poussée sur la droite, c'est le levier enclencheur B' qui est entraîné et dont l'extrémité s'abaisse.

Supposons maintenant qu'on ait manœuvré le commutateur pour la montée, en tirant de la soute la tirette de montée M.

Le levier de manœuvre L a tourné de manière que le frotteur f soit à gauche en haut et que le talon soit en prise avec le levier enclencheur de droite B . L'électromoteur tournant dans le sens de la montée communique au tourteau T_0 un mouvement dans le sens de la flèche m .

Lorsque le tambour d'enroulement du câble du treuil a décrit une certaine course, le toc T vient appuyer sur le bras l du levier $l p I$ et le pousse vers la gauche ; le levier enclencheur B s'abaisse et le levier de manœuvre L , libéré, est ramené par le contrepoids P à sa position de repos verticale, ce qui provoque l'arrêt du moteur.

En même temps, un levier-butoir b , articulé sur B , fait saillie et empêche de ramener le levier de manœuvre dans la position qu'il vient de quitter.

Si, pour une cause quelconque, le levier L ne revenait pas à la position d'arrêt, le mouvement du treuil continuerait et le levier l serait de plus en plus poussé vers la gauche ; son bras $O_1 I$ en descendant entraînerait la plaque d'enclenchement H . Or, en fonctionnement normal, cette plaque maintient le levier L' de l'interrupteur de sécurité C , malgré un ressort antagoniste, dans une position telle que le circuit de l'induit est fermé. Lorsque H est abaissée, le levier L' , rappelé par son ressort, ouvre le circuit de l'induit et en même temps met ce dernier en court-circuit, ce qui provoque l'arrêt rapide.

Les choses se passent de même lors de la descente ; c'est ici le levier enclencheur B' qui maintient L dans la position de marche. Le tourteau T_0 tournant dans le sens de la flèche d , c'est le toc T' qui vient pousser le levier l vers la droite et déclencher le levier L . En cas de non-fonctionnement, la plaque H monterait et le levier L' de l'interrupteur de sécurité serait encore libéré.

422 quater. — Comme on le voit, le déclenchement du commutateur de manœuvre et l'arrêt du moteur s'opèrent pour un certain point de la course du tambour d'enroulement

du treuil ; en raison de l'allongement du câble et des modifications que les réparations peuvent faire aussi subir à sa longueur, une même position de la benne ne correspond pas toujours à une même position du tambour d'enroulement du câble. Par conséquent, si l'on a réglé la position des bras Q et Q' (*fig. 78*) de manière que la benne s'arrête exactement à une position déterminée, ce réglage ne peut se conserver et doit être fréquemment modifié. D'ailleurs, ici encore l'influence des variations de la différence de potentiel à la génératrice se fait sentir, quoique dans une proportion beaucoup moindre qu'avec le système du bloquage. Aussi ne peut-on compter sur une manœuvre automatique absolument exacte, telle qu'il la faut avec le système de benne à rail. On a donc résolu de corriger la manœuvre automatique par la manœuvre à la main, de la manière suivante.

Deux verrous sont placés en un point de la partie haute des guides de la benne, de telle sorte que celle-ci en montant les fasse rentrer et puisse continuer son mouvement ascendant, mais qu'ensuite sa descente soit arrêtée par les verrous ; lorsque la benne repose sur les verrous, le porte-charge se trouve alors à la hauteur exacte pour laquelle la décharge est facile.

On dispose le toc d'arrêt correspondant à la montée de manière que l'arrêt de la benne se fasse un peu au-dessus de la position d'appui sur les verrous ; on la fait alors redescendre à *petite vitesse* jusqu'à ce qu'elle repose sur ces verrous.

Pour réaliser sûrement cette petite vitesse à la main, sans avoir besoin de repères pour la manœuvre des câbles de commande, on a disposé sur le commutateur de manœuvre (*fig. 78*) un levier à deux branches V, v, mobile autour d'un axe concentrique à O₁. La branche v, située derrière le plateau du commutateur, appuie son extrémité arrondie sur la came excentrée N du tourteau T₀. Tant que v appuie sur N, la branche V, terminée par un bec en saillie et placée en avant du commutateur, se trouve relevée ; elle s'oppose ainsi à l'enclenchement définitif du levier L *pour la descente à grande*

vitesse, tout en permettant la mise en marche pour la descente avec introduction d'une partie de la résistance, c'est-à-dire à petite vitesse. Tant qu'il en est ainsi, le levier L revient à la position de repos dès qu'on abandonne la tirette D et le secteur S' (*fig. 78 bis*) ; on peut donc alors provoquer un mouvement de descente lent et l'arrêter à volonté par la manœuvre de la tirette D.

Pour la descente normale, il faudra maintenir le secteur S' relevé en tirant sur D d'une façon continue, jusqu'à ce que le levier *v* ait dépassé la came excentrée N. Alors seulement la tirette D pourra être tirée à bloc et le levier L enclenché pour la descente à grande vitesse.

423. — MODIFICATIONS APPORTÉES AU SYSTÈME DU DÉCLENCHEMENT. — Les dispositifs que nous venons de décrire appartiennent au modèle le plus ancien de treuil électrique à déclenchement. Les modèles les plus récents ont subi quelques modifications. Sans y insister, nous signalerons d'abord quelques changements sans grande importance dans la disposition des organes de manœuvre. C'est ainsi que la roue striée et la vis sans fin qui la commande sont maintenant placées non plus au-dessous du commutateur de manœuvre, mais sur le côté ; les secteurs permettant d'agir sur le levier de manœuvre à l'aide des tirettes sont placés devant le commutateur qu'ils masquent en grande partie. Les divers leviers d'enclenchement ou les butoirs ont actuellement des formes un peu différentes de celles représentées par la figure 78, leur action restant d'ailleurs la même. L'ensemble est plus compact, moins volumineux.

Une modification plus importante consiste en la suppression des contrepoids destinés à ramener le levier de manœuvre dans la position d'arrêt et leur remplacement par un ressort-spirale logé dans une boîte entourant l'axe de ce levier.

423 bis. — De plus, la manœuvre à la main par le moyen de la tirette de la batterie, permettant d'amener à petite vi-

tesse la benne à reposer sur les verrous, a été remplacée par une commande du moteur à l'aide d'un électro-aimant-relais et d'un bouton fermant le circuit de cet électro-aimant. Nous allons entrer dans quelques détails à ce sujet.

La figure 79 représente schématiquement un relais.

L'armature a de l'électro-aimant e oscille autour de l'axe O_1 ; elle est rappelée par le ressort antagoniste r quand l'électro-aimant n'est pas actionné.

Le levier de l'armature porte 5 ponts isolés de ce levier $P_1, P_2, P_3, P'_1, P'_2$. Chacun d'eux est formé de lames de lai-

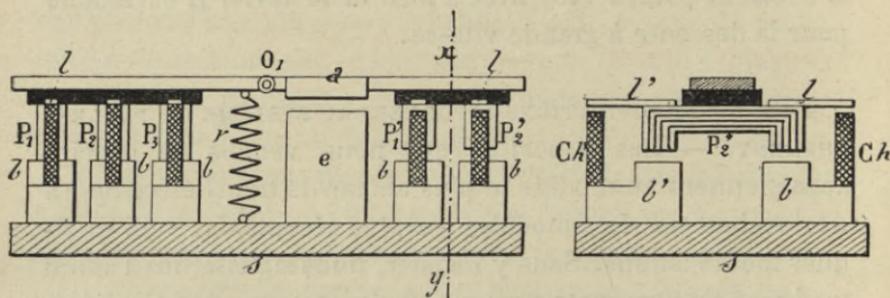


Fig. 79. — Électro-aimant-relais.

ton empilées comme le représente la partie droite de la figure, qui est une coupe par xy rabattue. Ces ponts permettent d'établir une communication électrique entre les bornes b et b' .

Pour éviter l'action destructive des étincelles de rupture, les ponts sont munis de *pare-étincelles*. Ils consistent en deux morceaux de charbon Ch et Ch' en communication avec les bornes b et b' et deux lames métalliques élastiques l et l' fixées sur le pont. Lorsque ce dernier est abaissé pour établir la communication entre b et b' , les lames l et l' viennent d'abord porter sur les charbons, de sorte que quand le point appuie sur b et b' les lames se sont un peu infléchies. Si le pont se relève, le portage cesse d'abord sur b et b' et la communication continue par les lames l et l' et les charbons, la rupture définitive se fait donc sur ces derniers; l'étincelle

est moins forte et, en tous cas, si les charbons brûlent quelque peu, ils peuvent être aisément remplacés.

Lorsque l'électro-aimant e n'est pas actionné, trois des ponts P_1, P_2, P_3 établissent la communication ; cette communication est rompue et elle est remplacée par celle des ponts P_1' et P_2' , lorsque l'électro-aimant étant actionné attire son armature.

423 ter. — La figure 79 bis est le schéma des connexions établies entre la génératrice, l'électromoteur et le relais dans les nouveaux modèles de treuils.

On voit en G la génératrice, en C un interrupteur général permettant de rompre le circuit quand on ne fait pas usage du treuil, cet interrupteur pouvant d'ailleurs faire partie d'un tableau de distribution.

En C_m est le commutateur de manœuvre à déclenchement dont nous avons précédemment parlé (**422 bis**), avec l'interrupteur de sécurité C_s ; on a représenté en C_r le commutateur à relais, I étant l'induit de l'électromoteur et K son inducteur. En m, m sont deux boutons permettant de fermer le circuit de l'électro-aimant e dérivé sur la génératrice.

Supposons l'interrupteur C fermé, mettant en communication B et B_1 , l'interrupteur de sécurité C_s armé dans la position indiquée par la figure 79 bis.

Si on n'appuie pas sur les boutons m , l'électro-aimant e n'est pas actionné ; les ponts P_1, P_2, P_3 sont fermés, les ponts P_1', P_2' sont ouverts. Si, par exemple, le levier L du commutateur de manœuvre est tourné comme l'indique la figure, ce qui correspond à la position de descente D, le courant partant de la génératrice G suit le chemin :

Pont P_2 , du commutateur à relais C_r , borne A, interrupteur de sécurité C_s de H_1 en H, lame U du commutateur de manœuvre C_m , frotteur f' , lame E, borne A_2 , balai F de l'électromoteur, induit I, balai F', pont P_1 , borne A_3 , lame E' du commutateur de manœuvre, frotteur f , résistance R, borne A_1 , pont P_3 , interrupteur C, génératrice G.

Le circuit de l'induit du moteur étant fermé, l'inducteur K étant d'ailleurs excité, le monte-charge descend.

Le monte-charge monte pareillement si le levier du commutateur de manœuvre est manœuvré du côté de la montée M.

Lorsque, le déclenchement du levier L ne s'étant pas opéré, l'interrupteur de sécurité fonctionne, son levier L' rompt la

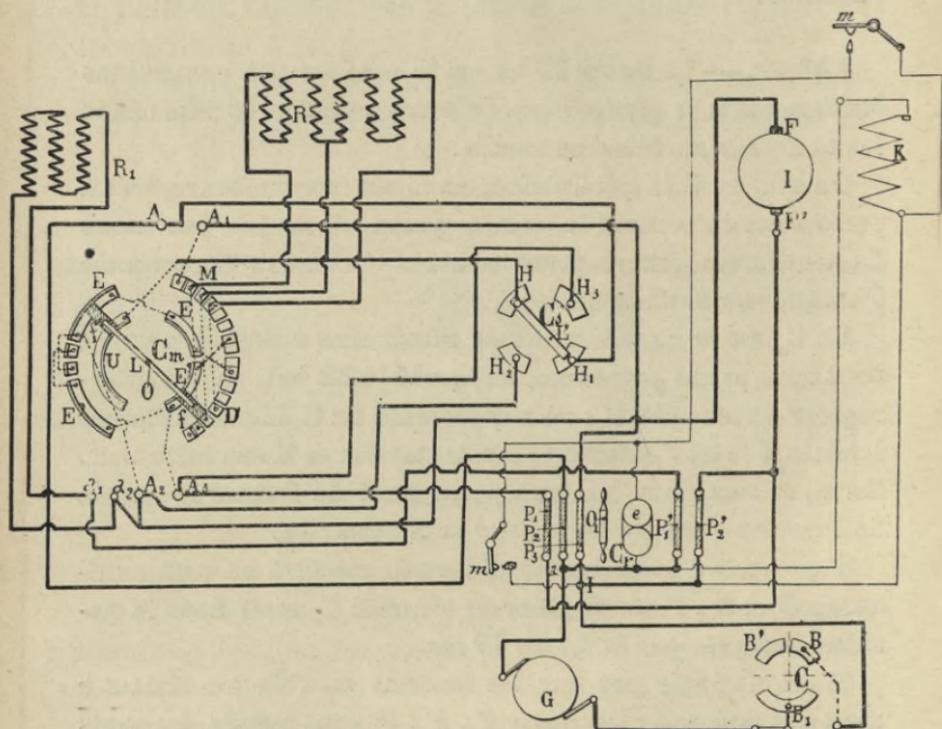


Fig. 79 bis. — Schéma des connexions d'un treuil à déclenchement avec relais.

communication entre H et H₁ et établit une communication entre H₂ et H₃. Or, comme H₂ et H₃ sont reliés par A₂ et A₃ aux balais F et F', l'induit de l'électromoteur est alors mis en court-circuit et l'arrêt est instantané.

Lorsqu'après la montée de la benne au-dessus des verrous le déclenchement du levier L du commutateur de manœuvre a eu lieu, si l'on veut faire redescendre la benne jusqu'à la faire reposer sur ses verrous, on appuie sur un des boutons m ;

l'électro-aimant e étant actionné, les ponts P_1 , P_2 , P_3 sont ouverts, les ponts P'_1 et P'_2 sont fermés.

Le courant, partant de la génératrice G , passe alors de la borne a à travers le pont P'_1 , va par la borne a_1 dans la résistance R_1 , revient à la borne a_2 ; de là il gagne le balai F , traverse l'induit I et retourne à la génératrice G par le balai F' , le pont P'_2 et l'interrupteur C .

Le moteur tourne alors dans le sens de la descente et pendant le temps que dure la pression du doigt sur le bouton m . Lorsqu'on cesse d'appuyer sur le bouton, l'armature de l'électro-aimant e se relevant, comme le levier L du commutateur de manœuvre est dans la position du court-circuit, l'arrêt du moteur est instantané. On peut ainsi, en procédant par petits coups successifs sur le bouton m , amener la benne très doucement à reposer sur les verrous.

424. Système des relais. — Ce système de manœuvre est dû à MM. Savatier et de La Gabbe, ingénieurs des Forges et Chantiers de la Méditerranée.

Le treuil électrique est à commande par galet de friction (412) et à frein automatique Mégy (413). Le moteur est généralement du type représenté par les figures 63 et 64. L'excitation est toujours faite en dérivation.

L'inversion du sens du courant dans l'induit et l'introduction d'une résistance dans le circuit, pour le démarrage ou la réduction de vitesse, se fait au moyen d'un commutateur composé de trois électro-aimants disposés sur une même table.

Lorsque la bobine d'un de ces électro-aimants est traversée par un courant, une armature de fer mobile est attirée malgré l'effort antagoniste d'un ressort. L'effet de cette attraction est d'appliquer fortement un pont, porté par l'extrémité du levier de l'armature et isolé de ce dernier, contre deux plots de contact. Ce pont est formé de plusieurs lames de laiton superposées d'où résulte une certaine élasticité favorable pour obtenir un bon contact.

L'effet destructif des étincelles à la rupture du circuit est reporté sur les pare-étincelles en charbon, comme d'ailleurs dans les relais précédemment étudiés (423 bis).

Deux des électro-aimants portent un pont double, mettant en communication deux paires de plots de contact; le troisième électro-aimant ne porte qu'un pont simple.

Un électro-aimant-relais semblable à ceux employés ici est d'ailleurs représenté par la figure 88 à propos d'une autre installation faite également par les Forges et Chantiers de la Méditerranée.

424 bis. — La figure 80 représente schématiquement l'ensemble des trois électro-aimants formant le commutateur, en C_m , et leurs connexions avec l'induit I de l'électromoteur, un rhéostat R' , la génératrice, ou plutôt le petit tableau de distribution T qui est relié à cette source, deux commutateurs de commande C et C' placés en haut et en bas aux extrémités du tube du monte-charge, et enfin les deux interrupteurs C_r et C'_r de l'appareil de mise en vitesse fixé sur le bâti du treuil.

Les fils i partant du tableau T sont de gros fils conduisant le courant à l'induit de l'électromoteur. Les fils e sont les fils conduisant le courant à l'inducteur en dérivation; enfin, les fils r constituent un circuit dérivé de fil fin sur lequel sont branchés les circuits des électro-aimants relais.

Les trois électro-aimants du commutateur C_m sont désignés par *Montée*, *Descente*, R. On voit en D et E, D' et E' les deux paires de plots reliés par les ponts F et F' portés par le levier l ou le levier l' des électro-aimants *Descente* ou *Montée*, quand les armatures sont attirées. En D_1 et E_1 sont les plots mis en relation par le pont unique F_1 de l'électro-aimant R quand cet électro-aimant est actionné.

Supposons l'électro-aimant de droite, marqué *Montée*, actionné, ses ponts F et F' abaissés et les plots de droite D et E, D' et E' en communication. Supposons de plus que l'électro-aimant de gauche marqué *Descente* ait au contraire son

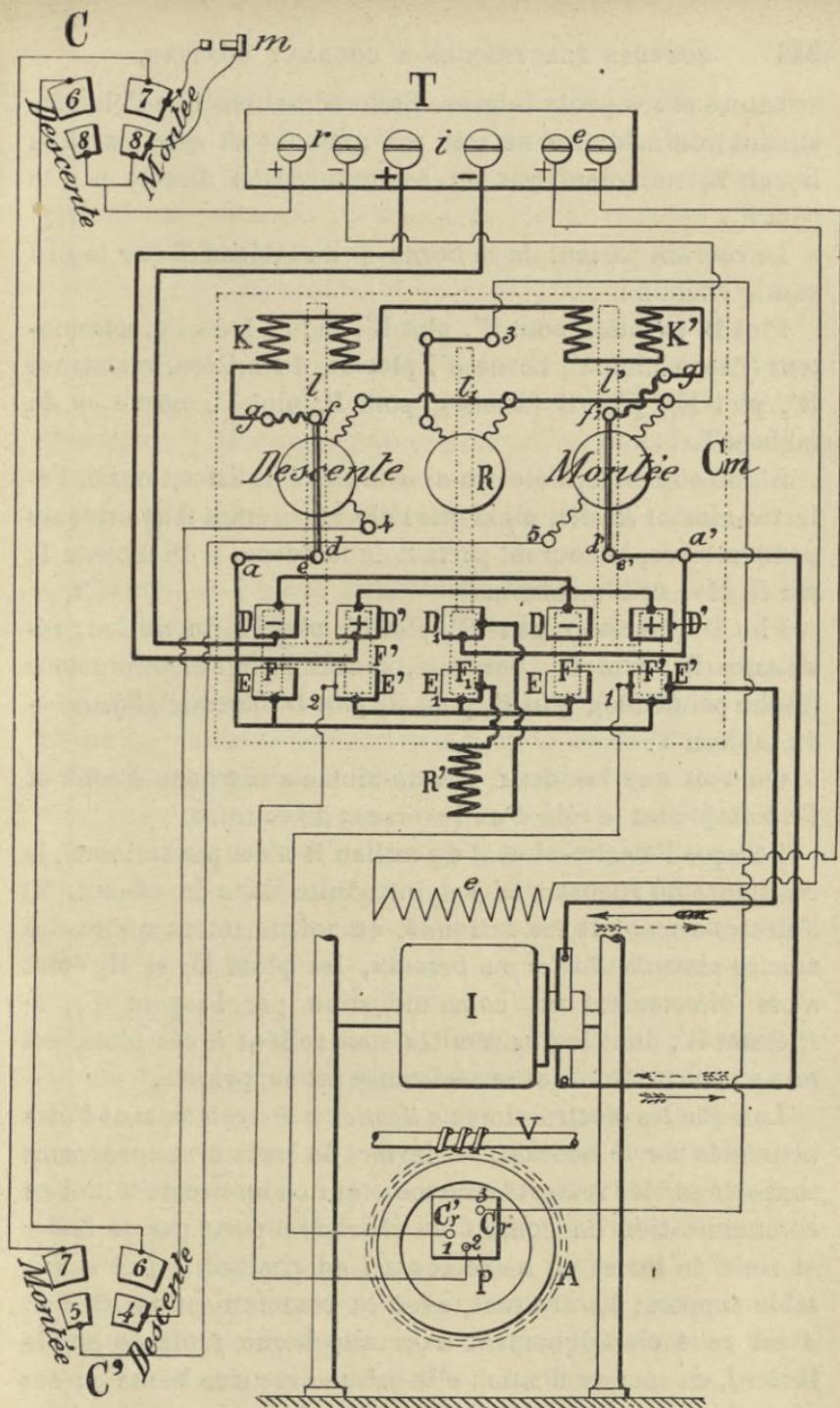


Fig. 80. — Monte-charge électrique à relais ; schéma des connexions.

armature et ses ponts relevés. Enfin admettons que l'électro-aimant intermédiaire ne soit pas actionné et que les plots D_1 et E_1 ne soient pas en communication directe par le pont F_1 .

Le courant partant de la borne + du tableau T par le fil i suit le chemin :

Plot D' (*Montée*), pont F' , plot E' , induit I de l'électromoteur (flèche pleine), borne a' , plot D_1 du milieu, résistance R' , plot E_1 , plot E (*Montée*), pont F, plot D, borne — du tableau T.

Si, au contraire, l'électro-aimant *Descente* est actionné, l'électro-aimant *Montée*, ainsi que l'électro-aimant R ayant leurs ponts relevés, le courant partant de la borne + du tableau T, par le fil i , suit le chemin :

Plot D' (*Descente*), pont F' , plot E' , plot E_1 du milieu, résistance R' , plot D_1 , borne a' , induit I de l'électromoteur (flèche pointillée), plot E, pont F, plot D (*Descente*), borne — du tableau T.

On voit que les deux électro-aimants marqués *Montée* et *Descente* jouent le rôle d'un inverseur de courant.

Lorsque l'électro-aimant du milieu R n'est pas actionné, la résistance du rhéostat R' est introduite dans le circuit. Si l'électro-aimant R est actionné, en même temps qu'un des électro-aimants *Montée* ou *Descente*, les plots D_1 et E_1 étant alors directement en communication par le pont F_1 , le rhéostat R' , dont les extrémités sont reliées à ces plots, est mis en court-circuit et sa résistance est supprimée.

Lorsque les électro-aimants *Montée* ou *Descente* cessent d'être actionnés par le courant, les leviers de leurs armatures sont rappelés par les ressorts antagonistes ; ce mouvement met en communication un contact en charbon d porté par le levier et isolé de lui et un autre contact en charbon e fixé sur la table-support ; d'autre part, e est en communication avec a , d est relié électriquement avec une borne f placée sur le levier l , en communication elle-même avec une borne g ; ces dispositions sont symétriques pour les deux électro-aimants ;

enfin g et g' sont reliées par des bobines K et K' et a et a' communiquent avec les deux conducteurs allant aux balais du moteur ; il s'ensuit que, lorsque les électro-aimants extrêmes ne sont pas actionnés et que le courant n'est pas lancé dans l'induit de l'électromoteur, ce dernier est mis en court-circuit. Les bobines K et K' sont des bobines d'électro-aimants auxiliaires qui attirent l'extrémité des leviers l et l' sous l'influence des courants d'induction intenses développés dans l'induit de l'électromoteur, en vertu du faible mouvement dont il est encore animé pendant un court instant après la mise en court-circuit. Le contact entre d et e est ainsi énergiquement assuré et les étincelles réduites.

424 ter. — Voyons maintenant comment les circuits des électro-aimants *Montée* et *Descente* sont fermés à la main pour la mise en marche de l'électromoteur dans le sens convenable, comment ces circuits s'ouvrent automatiquement lorsque la benne du monte-charge arrive à bout de course et enfin comment l'électro-aimant R est actionné automatiquement au moment convenable, de façon à retirer le rhéostat R' du circuit.

Les commutateurs de commande C et C' , disposés en haut et en bas du tube du monte-charge, permettent de fermer à volonté, à la main, en agissant sur un levier de manœuvre, le circuit de l'électro-aimant *Montée*, ou celui de l'électro-aimant *Descente*.

La manœuvre du levier entraîne une lame de contact enfermée dans une boîte étanche qui met à volonté en communication, en haut, les plots 7 et 8, ou les plots 6 et 8 ; en bas, les plots 7 et 5, ou les plots 6 et 4 (*fig. 80*). Pour que le circuit de l'électro-aimant *Montée* soit fermé, il faut à la fois faire communiquer, en haut 7 et 8, en bas 7 et 5, c'est-à-dire mettre les deux leviers de manœuvre dans la position de *Montée*. Il faut pareillement mettre les deux leviers de manœuvre sur la position marquée *Descente* pour fermer le circuit de l'électro-aimant de gauche et mettre le moteur en marche pour la *Descente*.

Cette disposition a pour but d'empêcher, par exemple, la mise en marche du monte-charge par le poste inférieur quand le poste supérieur n'est pas prêt pour recevoir la benne, ou ne veut pas la recevoir.

De même, on ne peut ainsi, du poste supérieur, mettre l'électromoteur en marche, si le poste inférieur, pour une raison quelconque, une avarie, par exemple, dans le treuil ou la benne, juge qu'un arrêt dans le fonctionnement est nécessaire.

Lorsque le treuil a été ainsi mis en marche pour la montée par exemple, et que la benne arrive à bout de course, une came qui lui est fixée rencontre un doigt placé sur le levier de manœuvre du commutateur supérieur et ramène ce levier dans la position de repos. L'électro-aimant *Montée* cessant alors d'être actionné, le courant cesse de passer dans l'induit du moteur qui est en même temps mis en court-circuit, comme nous l'avons vu ; le treuil s'arrête alors très vite.

Un bouton de manœuvre *m* (fig. 80) permet de fermer à la main le circuit de l'électro-aimant *Montée*, quand ce circuit a été rompu par la came de la benne agissant automatiquement sur le levier du commutateur de commande supérieur.

Voici le but de cette disposition :

Le chargement et le déchargement de la benne se faisant ici encore par le moyen d'un réseau de rails fixes avec lequel vient se mettre de niveau un bout de rail placé sur la benne (411), il faut donc, en particulier, que le monte-charge s'arrête, à la montée, dans une position rigoureusement déterminée. Or, malgré l'arrêt très brusque du moteur, la position d'arrivée de la benne peut encore varier quelquefois de plus de 1 centimètre, lorsque la différence de potentiel fournie par la génératrice éprouve elle-même de grandes variations.

Pour être sûr de la manœuvre dans tous les cas, on a réglé la came fixée à la benne de manière que l'arrêt normal automatique se fasse à 1 ou 2 centimètres au-dessous du point qu'il faudrait atteindre pour amener la coïncidence exacte des rails. Lors d'une montée, la benne s'étant arrêtée ainsi automatiquement, il suffit de presser le bouton *m* pour que

le monte-charge, se remettant en marche, atteint la position exacte nécessaire. Une butée empêche d'ailleurs cette position d'être dépassée.

Afin d'amortir les chocs contre la butée, le rhéa sur lequel passe le câble du monte-charge, est suspendu par l'intermédiaire de *ressorts Belleville* qui peuvent céder de 2 centimètres, ce qui correspond à un jeu double pour la benne.

A cause des deux interrupteurs en série placés sur le circuit des relais, il est bon de suivre une règle précise pour la manœuvre. On peut, par exemple, convenir que, lorsque la benne vient d'effectuer un parcours, les deux postes manœuvrent le levier de leur commutateur de commande de manière à obtenir le parcours inverse, *au plus tôt paré*.

424 quater. — L'appareil de mise en vitesse est destiné à actionner automatiquement l'électro-aimant R pour retirer du circuit, au moment convenable, le rhéostat R' ou l'y remettre.

Il se compose essentiellement d'une roue striée A entraînée par une vis sans fin V participant au mouvement du treuil (*fig. 80*). Deux interrupteurs C_r et C_r' placés sur un plateau P fixé au bâti du treuil et immobile permettent d'établir ou de rompre la communication entre les bornes marquées 1 et 3 ou entre 2 et 3. Si l'on suit les connexions sur la figure, on voit que la communication entre 1 et 3 établie par l'interrupteur C_r' combinée à la communication de D' et E' par le pont F' (*Montée*) ferme le circuit de l'électro-aimant R et par suite supprime le rhéostat du circuit de l'électromoteur.

De même, si l'interrupteur C_r établit le contact entre 2 et 3 et qu'en même temps, l'électro-aimant *Descente* étant actionné, le pont F correspondant soit abaissé, le circuit de l'électro-aimant R est encore fermé et la résistance du rhéostat retirée du circuit de l'induit de l'électromoteur.

L'appareil de mise en vitesse est disposé de manière qu'au moment de la mise en marche, soit pour la montée, soit pour la descente, les deux interrupteurs C_r' et C_r interrompent la

communication entre 1 et 3 ou 2 et 3; la résistance du rhéostat est alors en circuit et le démarrage de l'électromoteur peut se faire sans danger.

La mise en marche effectuée et un certain chemin étant déjà parcouru, l'un des deux interrupteurs, C' à la montée, C à la descente, est fermé et la résistance de démarrage est retirée du circuit; le treuil prend alors toute sa vitesse.

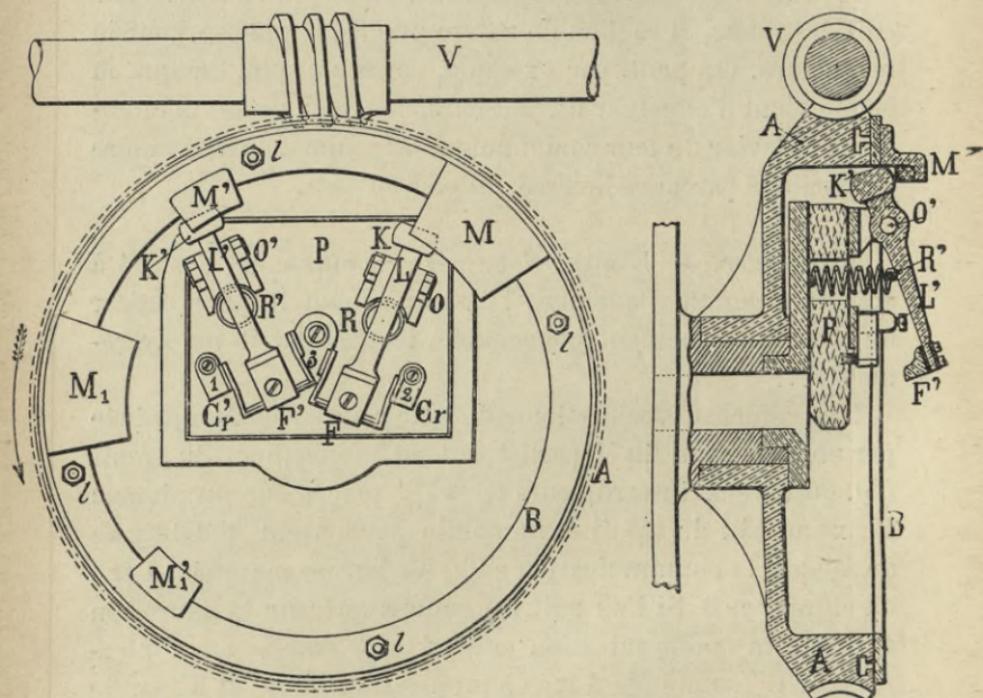


Fig. 80 bis. — Monte-charge à relais, appareil de mise en vitesse.

Un peu avant que la benne arrive à bout de course, soit en montant, soit en descendant, la communication établie par l'interrupteur est rompue automatiquement et, la résistance étant de nouveau en circuit, le treuil ne tourne plus qu'à petite vitesse, jusqu'à ce qu'il soit arrêté définitivement par la manœuvre automatique des commutateurs de manœuvre comme nous l'avons expliqué.

La figure 80 bis représente en plan et en coupe la roue

striée et les interrupteurs qui constituent l'appareil de mise en vitesse.

On voit en A la roue striée, en V la vis sans fin qui la commande, en P le plateau de marbre fixe portant les interrupteurs C_r et C'_r . Ceux-ci sont constitués par les leviers L et L', mobiles autour des axes O et O'. Ils portent à une extrémité un contact isolé F ou F' établissant, lorsque le levier obéit à l'effort du ressort R ou R', une communication soit entre les pièces de contact 2 et 3, soit entre les pièces 1 et 3. L'interrupteur C'_r sert pour la *Montée*, l'interrupteur C_r pour la *Descente*.

Une couronne B fixée à la roue striée porte deux jeux de cames M, M_1 et M', M'_1 , entraînées avec la roue par le mouvement du treuil. Les cames M et M_1 , en passant sur l'extrémité K de l'interrupteur C_r (*Descente*), abaissent le levier L et interrompent la communication entre 2 et 3; à cause de leur forme et de la position de l'interrupteur C'_r (*Montée*), ces cames ne peuvent agir sur ces derniers; les cames M' et M'_1 au contraire peuvent agir sur l'extrémité K' du levier L' de *Montée*, mais non sur celui de *Descente*.

Supposons la benne en bas; la position des cames est telle que M maintient K abaissée et la communication 2 et 3 rompue; M', de son côté, maintient K' abaissée et la communication 1 et 3 également rompue, ainsi que le représente la figure 80 bis.

Le treuil étant mis en marche pour la montée, avec la résistance de démarrage en circuit par conséquent, la roue A et les cames tournent dans le sens de la flèche; après un court parcours de la benne, la came M' abandonne l'extrémité K' du levier L' et la communication s'établit grâce au ressort R' entre 1 et 3; la résistance de démarrage est alors supprimée, le treuil tourne plus vite. Puis la came M'_1 vient prendre la place de M' et de nouveau, la communication étant rompue entre 1 et 3, la résistance de démarrage est remise en circuit; puis le moteur s'arrête à bout de course.

Il en est de même pour le mouvement de descente.

Il est clair que la distance angulaire entre les cames M et M_1 ou entre les cames M' et M'_1 d'un même jeu doit être la même et doit correspondre à la distance à parcourir ; la distance angulaire entre deux cames de jeux différents, M et M par exemple, est au contraire invariable, puisque les deux cames doivent recouvrir en même temps les extrémités K et K' des deux leviers L et L'.

Pour régler la position des cames de manière qu'elles soient dans la position indiquée par la figure 80 bis, quand le monte-charge est à bout de course en bas, on a rendu la couronne B, portant les cames, mobile par rapport à la roue striée A sur laquelle elle peut glisser, lorsque les boulons *l* ont leurs écrous desserrés et peuvent alors courir dans une rainure pratiquée dans la roue A. Lorsque la position des cames est satisfaisante, on serre les écrous des boulons *l*, ce qui rend solidaires la couronne B et la roue A.

Ce réglage devra être effectué à nouveau chaque fois qu'on aura modifié, par suite de rupture par exemple, la longueur du câble portant la benne.

425. Modifications apportées au système des relais. — Le système des relais, très répandu à bord des navires, a subi un certain nombre de modifications de détails ; nous allons en indiquer quelques-unes.

La figure 80 ter représente schématiquement les divers organes de manœuvre et leurs liaisons électriques pour les monte-charges du *Davout* et de beaucoup d'autres navires.

La disposition générale est la même que celle indiquée par la figure 80. La forme des relais est toutefois différente. La mise en court-circuit de l'induit du moteur I s'opère par la réunion des bornes *f* et *f'*, au moyen de ponts qui s'abaissent lorsque les armatures des électro-aimants de *Montée* D ou de *Descente* E ne sont pas attirées, c'est-à-dire lorsque ces électro-aimants ne sont pas excités.

En outre, un *interrupteur général* H est intercalé sur les conducteurs venant de la génératrice S et un *commutateur* de

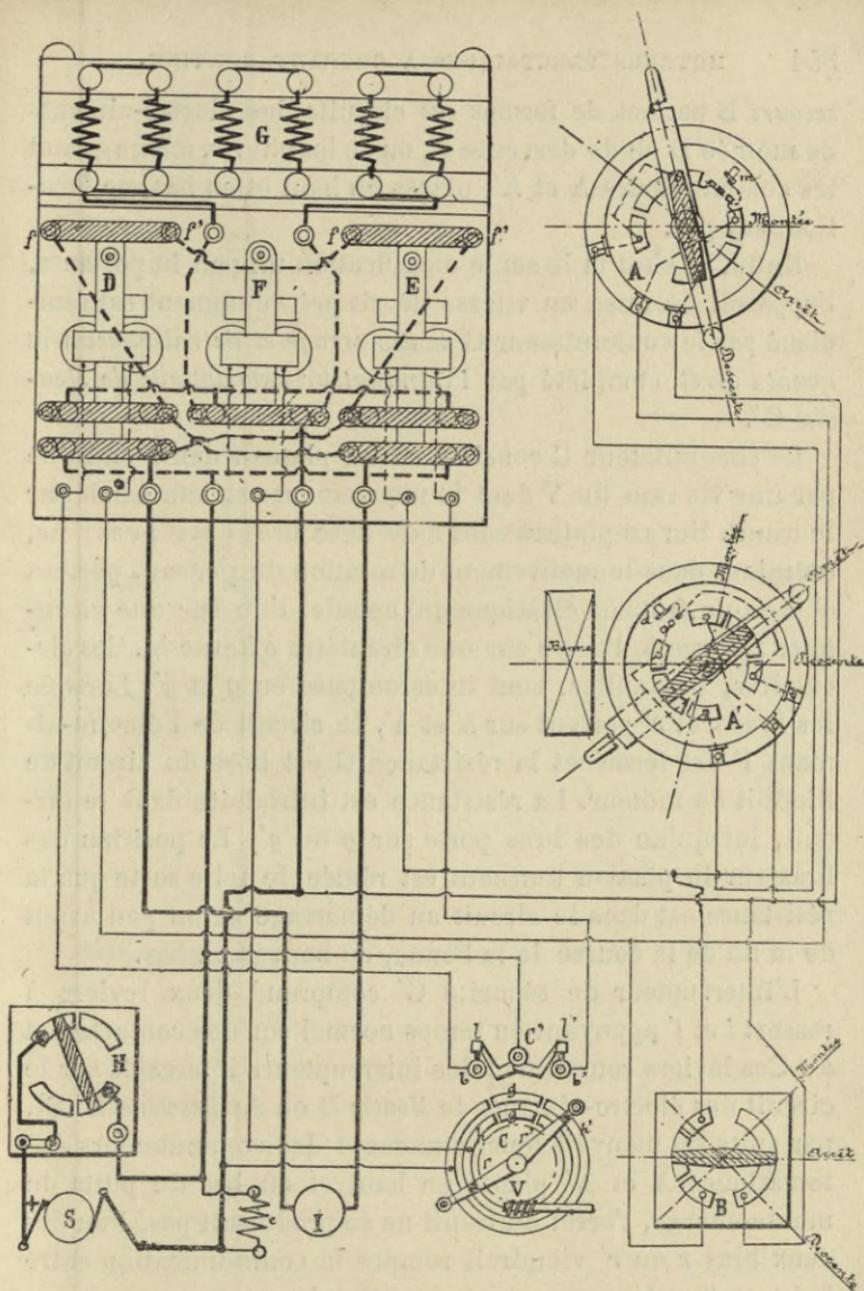


Fig. 80 ter. — Système des relais pour la commande des monte-charges électriques. Connexions des appareils du Davout.

LÉGENDE

- | | |
|--|---------------------------------|
| A, A'. — Commutateurs d'arrêt automatique et de mise en marche, haut et bas. | E. — Relais de descente. |
| B. — Commutateur de secours. | F. — Relais de la résistance G. |
| C. — Commutat. automat. de démarrage et de ralentissement avant l'arrêt. | G. — Résistance de démarrage. |
| C'. — Interrupteur automatique de sécurité. | H. — Interrupteur général. |
| D. — Relais de montée. | I. — Induit du moteur. |
| | e. — Inducteur du moteur. |
| | S. — Génératrice. |

secours B permet de fermer les circuits des électro-aimants de montée D ou de descente E, ou de les ouvrir, même quand les commutateurs A et A', placés en haut et en bas, ne fonctionnent pas.

Enfin, et c'est là la seule modification un peu importante, l'appareil de mise en vitesse décrit précédemment est remplacé par le commutateur C de *démarrage et de ralentissement avant l'arrêt*, complété par l'*interrupteur automatique de sécurité* C'.

Le commutateur C consiste en un plateau denté entraîné par une vis sans fin V dont le mouvement est commandé par le treuil. Sur ce plateau sont fixés deux bras r et r' ; ces bras, entraînés dans le mouvement de rotation du plateau, portent chacun un frotteur élastique qui appuie, l'un sur une circulaire interne h , l'autre sur une circulaire externe h' . Ces circulaires, immobiles, sont interrompues en g et g' . Lorsque les bras r et r' portent sur h et h' , le circuit de l'électro-aimant F est fermé et la résistance G est hors du circuit de l'induit du moteur. La résistance est introduite dans le circuit, lorsqu'un des bras porte sur g ou g' . La position des bras sur le plateau tournant est réglée de telle sorte que la résistance est dans le circuit au démarrage et un peu avant de la fin de la course de la benne, en haut et en bas.

L'interrupteur de sécurité C' comprend deux leviers à ressort l et l' appuyant en temps normal sur des contacts b et b' . Ces leviers constituent des interrupteurs intercalés sur le circuit des électro-aimants de *Montée* D ou de *Descente* E. Si, par suite du mauvais fonctionnement des commutateurs automatiques A et A' placés en haut et en bas du puits du monte-charge, l'arrêt du treuil ne se produisait pas, l'un des deux bras r ou r' viendrait rompre la communication entre l et b ou l' et b' , provoquant ainsi l'arrêt.

Dans la figure 80 *quater*, on a représenté les organes et les connexions pour les monte-charges du *Carnot*. Tout y est disposé comme dans la figure 80 *ter*, sauf une modification assez importante des commutateurs d'arrêt et de mise en marche A

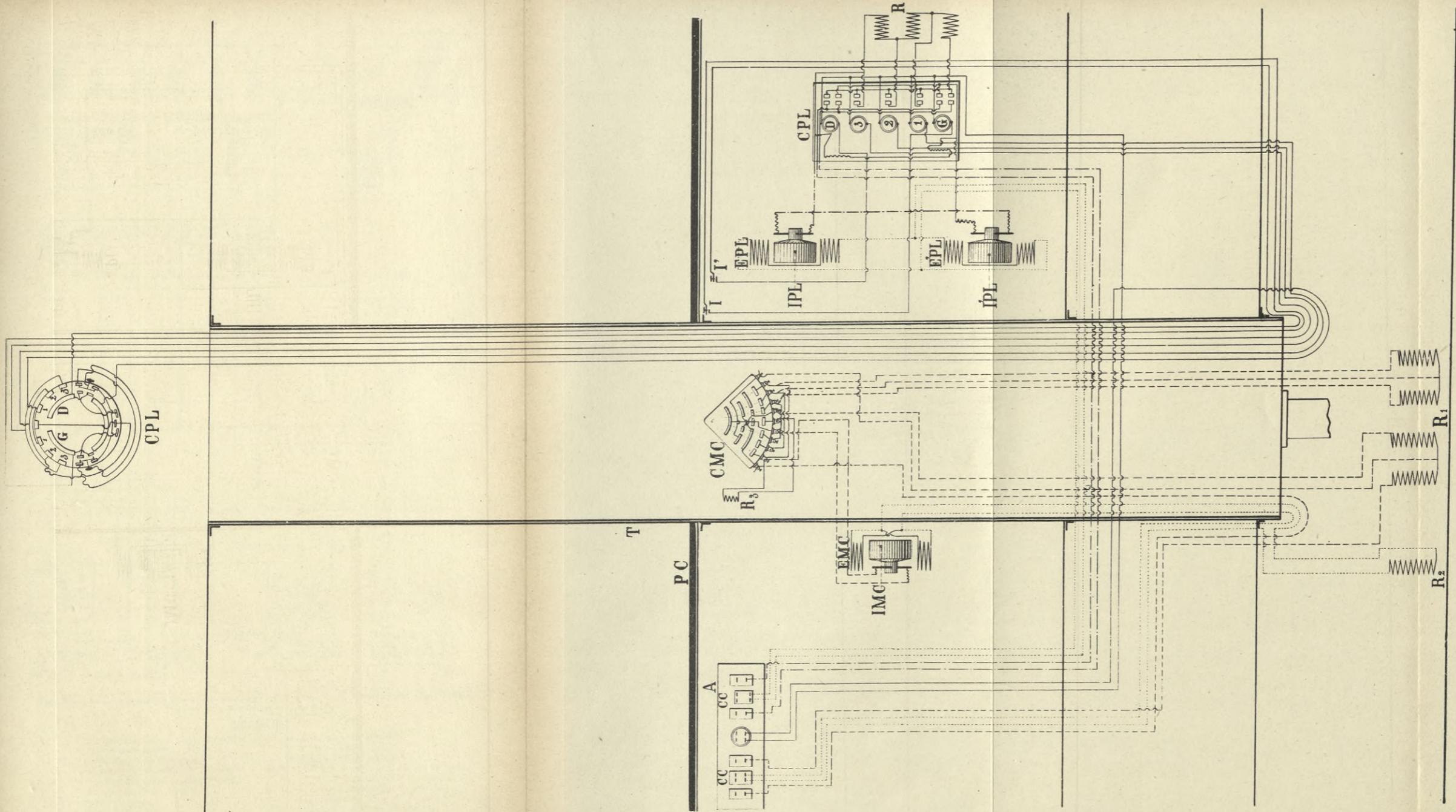


Fig. 92.— CROISEUR CHILIEN CAPITAN PRAT.

Disposition schématique des connexions entre les commutateurs et les électromoteurs du pointage latéral et du monte-charge, pour une tourelle de 24 cm.

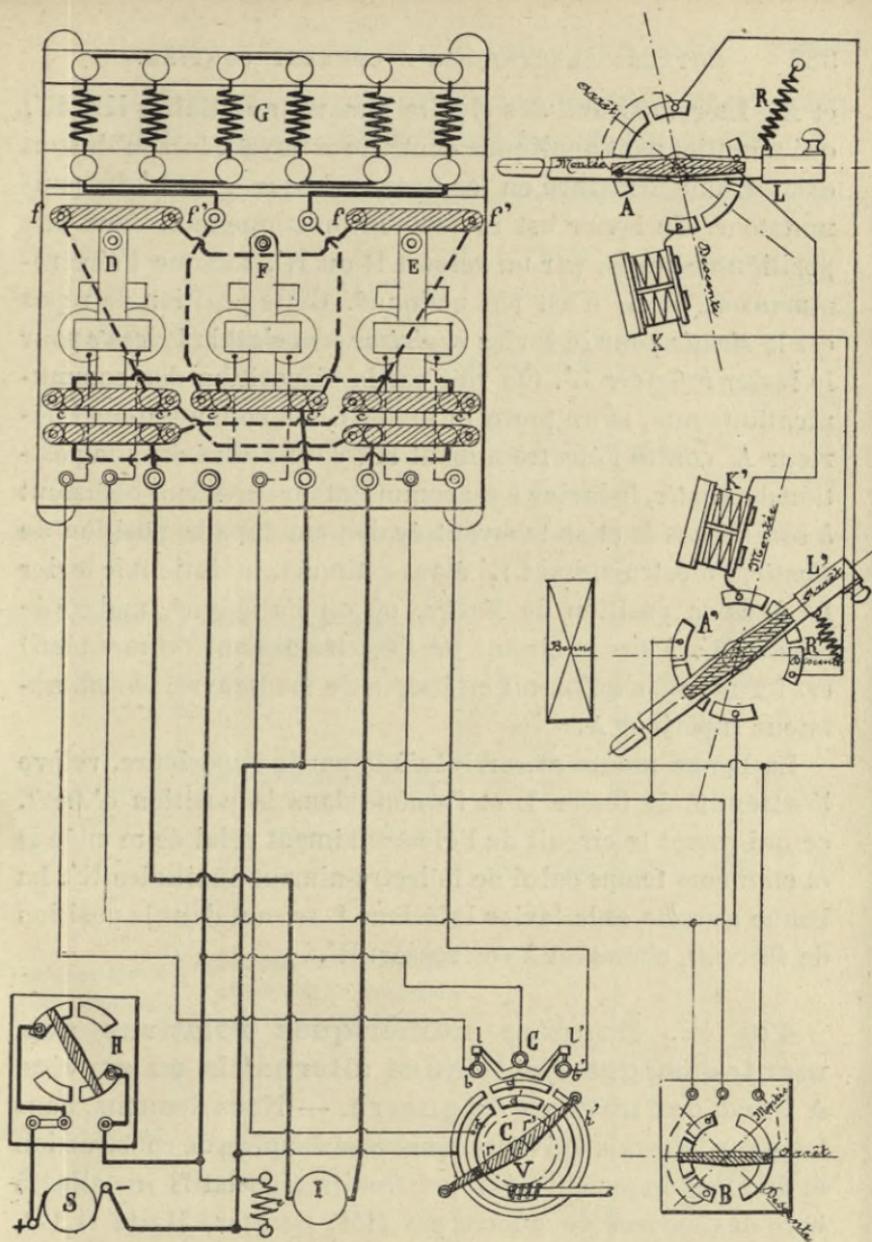


Fig. 80 quater. — Système des relais pour la commande des monte-charges électriques. Connexions des appareils du Carnot.

LÉGENDE

- | | |
|--|--|
| A, A'. — Commutateurs d'arrêt automatique et de mise en marche, haut et bas. | H. — Interrupteur général. |
| B. — Commutateur de secours. | I. — Induit du moteur. |
| C. — Commutateur automat. de démarrage et de ralentissement avant l'arrêt. | <i>e.</i> — Inducteur du moteur. |
| C'. — Interrupteur de sécurité. | K, K'. — Électros maintenant les commutateurs A et A' sur <i>Descente</i> ou sur <i>Montée</i> . |
| D. — Relais de montée. | L, L'. — Leviers de manœuvre des commutateurs A et A'. |
| E. — Relais de descente. | R, R'. — Ressorts de rappel des leviers. |
| F. — Relais de la résistance G. | S. — Génératrice. |
| G. — Résistance de démarrage. | |

et A'. Ils comportent des électro-aimants auxiliaires K et K', qui maintiennent appliquée contre leur noyau, lorsqu'ils sont excités, une armature en fer fixée au levier L ou L' du commutateur. Ce levier est ramené automatiquement dans une position de repos, par un ressort R ou R', lorsque l'électro-aimant K ou K' n'est pas actionné. Cette position de repos est la *Montée* pour le levier *supérieur* L et c'est la *Descente* pour le levier *inférieur* L'. On voit par la disposition des communications que, si on porte le levier L' du commutateur inférieur A' contre l'électro-aimant K', c'est-à-dire dans la position de *Montée*, le levier L du commutateur supérieur obéissant à son ressort R et se trouvant également dans la position de *Montée*, l'électro-aimant K' étant actionné, maintient le levier L' dans la position de *Montée*, où on l'a amené, malgré le ressort R'. Alors le circuit de l'électro-aimant de montée D est fermé, sans qu'on ait eu besoin de manœuvrer le commutateur supérieur A.

La benne monte et, arrivée à la partie supérieure, relève l'extrémité du levier L et l'amène dans la position d'*Arrêt*, ce qui rompt le circuit de l'électro-aimant relai de montée D et en même temps celui de l'électro-aimant auxiliaire K'. La benne s'arrête et le levier inférieur L se met dans la position de *Descente*, obéissant à son ressort R'.

425 bis. Données numériques relatives aux monte-charges électriques alternatifs en service à bord des navires de guerre. — Nous donnons, dans les deux tableaux suivants, quelques données de construction et de fonctionnement pour les treuils alternatifs installés à bord des navires de guerre par MM. Sautter, Harlé et C^{ie}, ou par la maison Bréguet.

**Treuil électrique pour monte-charges alternatifs
construits par MM. Sautter, Harlé et C^{ie}.**

DÉSIGNATION du treuil.	MODE DE TRANSMISSION du mouvement de l'induit au tambour d'enroulement ; système de frein.	VITESSE		POIDS soulevé, en kilogr.	PUISSANCE absorbée par l'électro- moteur, en watts.	POIDS du treuil et des appareils de ma- nœuvre, en kilogr.
		de l'induit, en tours, par minute.	de la charge, en mètres, par seconde.			
Treuil de 180 kgm pour canons de 14 et 16 cm.	Double train d'engrena- ges ; frein automatique Mégy.	1000	0,450	400	4200	800
Treuil de 200 kgm pour canons de 16 cm	Entraînement par friction et un train d'engrena- ges ; frein automatique Mégy.	1000	0,500	380	4700	800
Treuil de 140 kgm pour canons de 10, 14 et 16 cm.	Entraînement par friction et un train d'engrena- ges ; frein automatique Mégy.	1000	0,350	380	3300	600
Treuil de 60 kgm pour canons de 47 mm.	Vis tangente non réver- sible.	"	0,400	450	2300	450
Treuil de 140 kgm à bennes équi- librées.	Entraînement par friction et un train d'engrena- ges ; double frein auto- matique Mégy.	1000	0,450	300	3500	650

Treuils électriques pour monte-charges alternatifs de la maison Bréguet.

DÉSIGNATION du treuil.	MODE DE TRANSMISSION du mouvement de l'induit au tambour d'enroulement ; système de frein.	VITESSE de la charge, en mètres par seconde.	POIDS soulevé, en kilogr.	PUISSANCE électrique absorbée par l'électro- moteur, en watts.	POIDS du treuil, en kilogr.
Treuil de 75 kgm	Vis tangente et un train d'engrenages ; frein à main ; encliquetage . .	0,3	260	2250	500
Treuil de 75 kgm	Triple train d'engrenages ; frein à main ; encliquetage	0,3	260	1650	500
Treuil de 110 kgm	Vis tangente et un train d'engrenages ; frein à main ; encliquetage . .	0,133	800	2775	580
Treuil de 110 kgm à 180 kgm	Double train d'engrenages ; frein à main et encliquetage	0,5	200	1800	650
	Id.	0,35	400	2625	Id.
	Id.	0,6	300	3075	Id.
Treuil de 180 kgm à 200 kgm	Triple train d'engrenages ; frein à main et encliquetage	0,2	1000	3000	750
	Id.	0,3	800	3375	Id.
	Id.	0,45	450	3000	Id.
Treuil de 200 kgm à 300 kgm	Double train d'engrenages ; frein à main et encliquetage	0,45	500	4000	840
	Id.	1,10	250	4400	Id.
Treuil de 310 kgm	Double train d'engrenages ; frein à main et encliquetage	1	310	4530	960
Treuil de 450 kgm	Double train d'engrenages ; frein à main et encliquetage	0,9	500	7200	1150

425 ter. Monte-charges continu ou norias électriques. — L'idée de l'emploi des norias électriques pour l'alimentation en projectiles des canons à tir rapide est séduisante, *à priori*. Une ou deux chaînes de Galle entraînées par des noix, mises en mouvement elles-mêmes par un moteur électrique, montent, *d'une manière continue*, des cartouches placées isolément dans des godets distribués le long de la chaîne, ou par paquets dans des caisses soutenues par des taquets convenablement disposés. Le mouvement de l'électromoteur est toujours de même sens, tant qu'on alimente l'artillerie. Le mouvement ne doit être inversé que si l'on veut non plus monter les cartouches, mais les embarquer et les descendre dans la soute. Pendant toute la durée d'un combat, il n'est donc point nécessaire de manœuvrer le moteur électrique ; tout au plus doit-on, de temps en temps, stopper et remettre en marche, si l'on ne veut faire tourner le moteur que pendant les périodes de fonctionnement effectif de la noria en charge.

Au point de vue électrique, l'emploi des norias est donc très simple et tout à fait comparable à celui des ventilateurs et des pompes.

Mais des difficultés se présentent pour le chargement en cartouches de la chaîne de Galle *en mouvement*.

Si la noria ne comporte qu'une seule chaîne avec godets, l'introduction d'une cartouche dans chacun d'eux, à son passage, ne laisse pas que d'être délicate et d'exiger de l'opérateur du soin et de l'adresse, ou une grande précision dans les organes, s'ils sont automatiques.

Pour vaincre cette difficulté, on peut donner à la noria deux chaînes parallèles munies de taquets à la même hauteur qui, passant dans des échancrures d'une planche, ou *distributeur*, convenablement disposée, emportent les caisses de cartouches qu'on a fait glisser sur ces échancrures, ou qui y glissent par leur propre poids. Mais alors un nouvel inconvénient survient presque inévitablement : l'inégale tension que prennent à l'usage les deux chaînes et qui donne aux

taquets une inclinaison fâcheuse pour la stabilité des caisses qu'ils soutiennent. Il y a lieu de craindre avec ces norias que les caisses puissent s'engager dans les guides, ce qui pourrait entraîner non seulement la rupture des chaînes, mais aussi la fracture des caisses et l'explosion des cartouches.

Le déchargement des munitions dans la batterie supérieure présente encore des difficultés.

Aussi l'installation des norias électriques réclame-t-elle des études et des soins au même titre que celle des treuils.

A bord des navires de guerre français, les norias n'existent qu'à un très petit nombre d'exemplaires.

Nous donnons dans la figure 81 la disposition schématique des organes de transmission dans une noria à deux chaînes. L'électromoteur a un seul électro-aimant inducteur K excité en dérivation.

Le pignon D, monté sur l'arbre de l'induit I commande la roue E calée sur un arbre intermédiaire; cet arbre porte un second pignon F engrenant avec une roue G montée sur l'arbre de commande entraînant les noix H et H'. Le tambour O figure un frein automatique Mégy.

Sur les noix H et H' passent des chaînes de Galle M et M' portant les taquets N et N'. Ceux-ci passent à travers les échancrures de la planche L et enlèvent les caisses de cartouches C. La manœuvre peut aussi se faire à la main au moyen de manivelles commandant l'arbre intermédiaire.

La manœuvre électrique de ce type de noria se fait au moyen d'un interrupteur et d'un commutateur de manœuvre ou rhéostat-inverseur. Le principe de ce dernier est le même que celui de l'inverseur du treuil représenté par la figure 77 bis. Nous donnons d'ailleurs dans la figure 81 bis les connexions existant entre l'induit I, l'inducteur K de l'électromoteur d'une noria, la génératrice G, l'interrupteur C, le commutateur de manœuvre et le rhéostat SS'.

Les plots de contact du commutateur sont ici disposés circulairement autour des lames hémicylindriques E et E'; ils

forment une sorte de collecteur F ; un certain nombre de ces

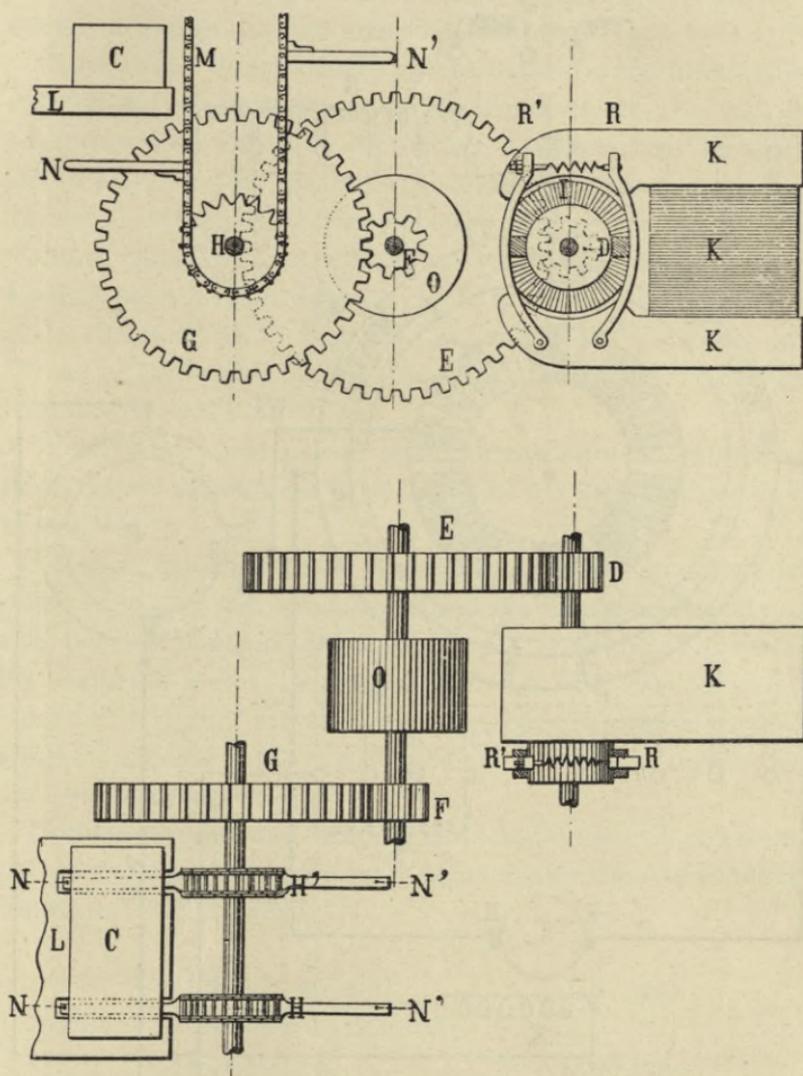


Fig. 81. — Disposition schématique des organes de transmission d'une noria électrique pour canons à tir rapide.

Modèle de MM. Sautter et Harlé. Élévation et plan.

plots sont réunis métalliquement malgré l'isolant qui les sépare ; ils sont indiqués par les hachures. Des contacts en

charbon, disposés diamétralement à la circonférence d'un

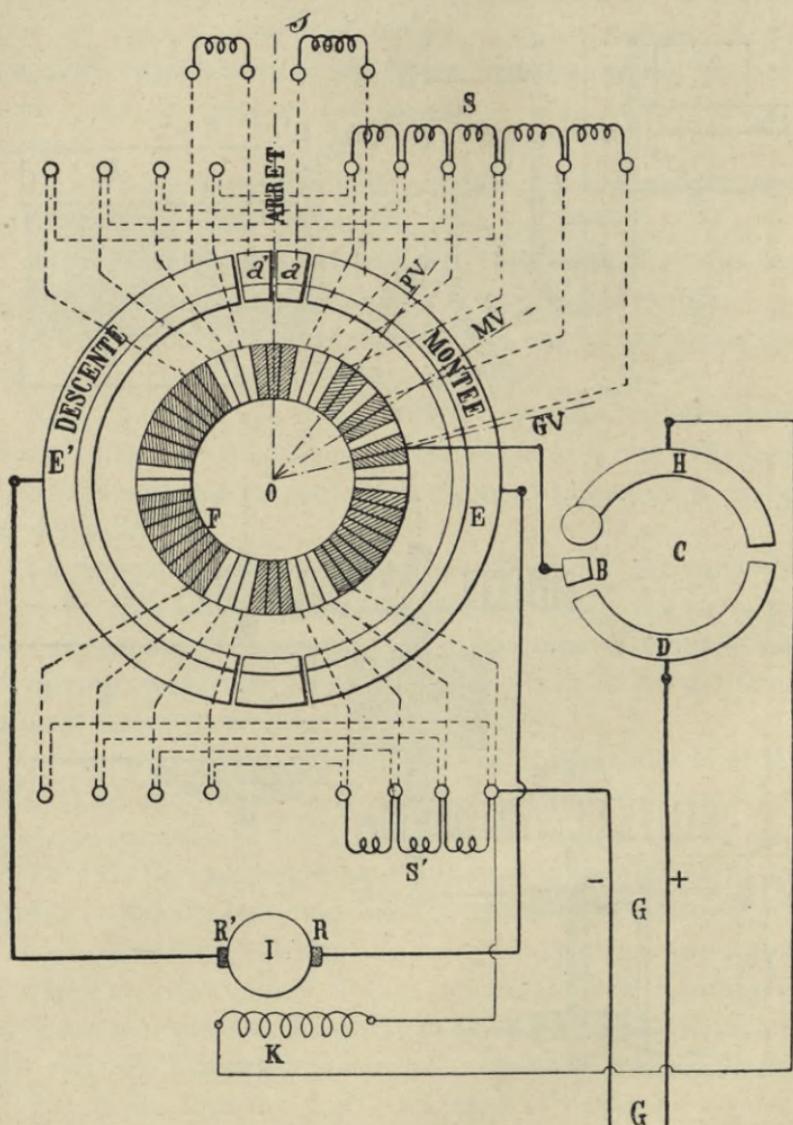


Fig. 81 bis. — Rhéostat inverseur d'une noria électrique pour canons à tir rapide, modèle de MM. Sautter et Harlé. — Connexions schématiques entre le moteur et le rhéostat-inverseur.

volant de manœuvre, permettent d'établir une communication entre E, E' et les touches du collecteur F.

L'inducteur K du moteur est en dérivation sur les conducteurs venant de la génératrice G lorsque l'interrupteur C établit la communication entre les touches de contact D et H.

Si en même temps l'interrupteur établit la communication entre D et B, le moteur est prêt à fonctionner. On voit, en effet, que si on tourne le volant de manœuvre vers la droite (MONTÉE), autour de l'axe O, le courant passe dans l'induit avec interposition d'une portion des résistances S et S' d'autant plus faible que l'on va davantage vers la droite. Pour la position marquée GV, toute résistance est supprimée et le moteur tourne à *grande vitesse*; il tourne à *moyenne vitesse*, ou *petite vitesse*, pour les positions des contacts en charbon marquées MV ou PV.

Pour la descente, on voit qu'on se contente de supprimer la partie des résistances correspondant à la petite vitesse pour la montée.

Lorsque, pour arrêter le moteur électrique, on amène les contacts en charbon suivant le diamètre marqué ARRÊT, on voit que ces contacts établissent une communication entre les segments *a* et *a'* réunis aux lames E et E' par les résistances S. L'induit est alors en court-circuit, avec interposition de ces résistances entre les balais. L'arrêt du moteur est donc assez brusque.

Nous indiquons ci-dessous quelques données de construction et de fonctionnement pour la noria représentée schématiquement par la figure 81.

Induit . . .	{	Diamètre du fil.	1,6 mm
		Nombre de rangées.	3
		Résistance.	0,38 ohm
Inducteur.	{	Diamètre du fil.	0,8 mm
		Nombre de rangées.	38
		Résistance.	81,5 ohms
Différence de potentiel aux bornes.		80	volts
Intensité du courant		25	ampères env.
Vitesse de l'induit, par minute . . .		1100 à 1200	tours

Vitesse de l'axe des noix par minute.	30 à 32 tours
Poids soulevé	300 kgr
Vitesse du poids, par seconde. . . .	0,25 mètre
Vitesse du poids, par la manœuvre à la main, avec deux hommes.	0,07 mètre

§ 5. — Manœuvre électrique des canons.

426. Généralités. — La manœuvre électrique des canons paraît devoir, dans un avenir prochain, constituer l'application la plus importante des électromoteurs à bord des navires de guerre. Outre que les électromoteurs employés pour la manœuvre de la grosse artillerie auront une puissance supérieure à celle réclamée par les ventilateurs ou les treuils électriques, le problème à résoudre est ici d'une complexité bien plus grande que pour ces derniers.

La manœuvre des canons nécessite, en effet, un grand nombre d'opérations diverses : pointage en direction, pointage en hauteur, mise au recul, mise en batterie, ouverture et fermeture de la culasse, chargement, écouvillonnage.

Si toutes ces opérations doivent se faire électriquement et si l'on veut pouvoir les exécuter simultanément, il faut employer un grand nombre d'électromoteurs indépendants ; si les opérations doivent être successives, un même électromoteur ne peut les effectuer qu'avec des transmissions mécaniques assez complexes. Lorsqu'on songe de plus que tous ces mouvements divers doivent s'exécuter avec une très grande précision et avec une sécurité non moins grande, on comprend que la solution électrique complète de la manœuvre des canons ne peut être très simple. La solution hydraulique employée actuellement pour les gros canons est elle-même fort compliquée, et il semble que les grandes vitesses des électromoteurs ne doivent s'appliquer que malaisément et au prix de transmissions multiples à certains mouvements lents et de peu d'amplitude.

Bien qu'à notre connaissance aucune application de manœuvre complètement électrique d'un canon n'ait été faite encore, les applications de manœuvre partielle existant déjà permettent de croire cependant que la solution complète du problème serait réalisable, *si elle était nécessaire*.

Mais aujourd'hui que l'on semble avoir renoncé pour les canons aux très grands calibres, un certain nombre des opérations dont se compose leur manœuvre restent toujours possibles à bras, dans de bonnes conditions, et l'on peut en profiter pour simplifier la partie mécanique de la manœuvre. La manœuvre mécanique des canons, qu'elle soit hydraulique ou électrique, doit, en effet, être considérée comme un mal nécessaire et une complication à laquelle il ne faut pas avoir recours sans nécessité, si l'on considère que les canons sont des engins de guerre dont la première qualité doit être la sécurité de fonctionnement.

Aussi, un des avantages qu'à notre point de vue la manœuvre électrique possède sur la manœuvre hydraulique, c'est que la première permet d'y substituer instantanément la manœuvre à bras, sans aucune modification dans la liaison des organes.

Nous allons, en quelques mots, indiquer quelques essais de manœuvre électrique de canons, puis étudier le principe des applications faites à bord des navires de guerre. Nous décrirons particulièrement l'installation du croiseur chilien *Capitan Prat*.

427. Pointage électrique système Canet. — A l'Exposition de 1889 figurait un canon à tir rapide de 15 cm du système Canet, établi par la Compagnie des Forges et Chantiers de la Méditerranée et dont le pointage en hauteur et en direction s'effectuait électriquement à l'aide de deux électromoteurs.

Un des électromoteurs commandait le pointage en direction, au moyen d'un pignon engrenant avec la crémaillère circulaire de la base de l'affût. Il pesait 33 kgr et pouvait dé-

velopper 45 ou 90 kgm/s, en absorbant 7,5, ou 15 ampères sous 70 volts.

Le second électromoteur commandait le pointage en hauteur, par l'intermédiaire d'une vis sans fin agissant sur une roue dentée montée sur un arbre qui portait à son extrémité un pignon engrenant avec une crémaillère de pointage fixée au canon.

La commande électrique, aussi bien pour le pointage en direction que pour le pointage en hauteur, pouvait être débrayée et le pointage se faisait alors à la main.

428. Pointage des canons, système Fiske. — Ce système de pointage a ceci de particulier qu'il emploie un véritable servomoteur électrique.

Deux électromoteurs C et D (*fig. 82*) commandent, l'un le pointage en hauteur par l'intermédiaire de deux pignons d'angle, une vis sans fin, une roue dentée, un pignon et un secteur denté ; l'autre le pointage en direction par un pignon et la crémaillère circulaire.

Chacun de ces électromoteurs est mis en mouvement par la manœuvre d'un commutateur tel que *o*.

Un levier E à joint sphérique *m*, guidé par deux coulisses croisées *u* et *u'*, peut être manœuvré à l'aide d'une poignée. Quand on soulève ou abaisse ce levier, il coulisse en *u'* et fait, par l'intermédiaire de la crémaillère *s*, tourner le commutateur *o* ; l'électromoteur C du pointage en hauteur tourne alors dans un sens tel que le canon monte ou descend. Mais la rotation de l'électromoteur ramène d'elle-même le commutateur, sa crémaillère et le levier E à leurs positions primitives, de telle sorte que le canon s'arrête après avoir pivoté d'un angle proportionnel à celui du levier.

De la même manière, quand on déplace le levier E à droite ou à gauche, il coulisse en *u* et commande par la crémaillère *s'* le commutateur *o'* de l'électromoteur D ; ce commutateur et le levier reprennent les positions correspondant au

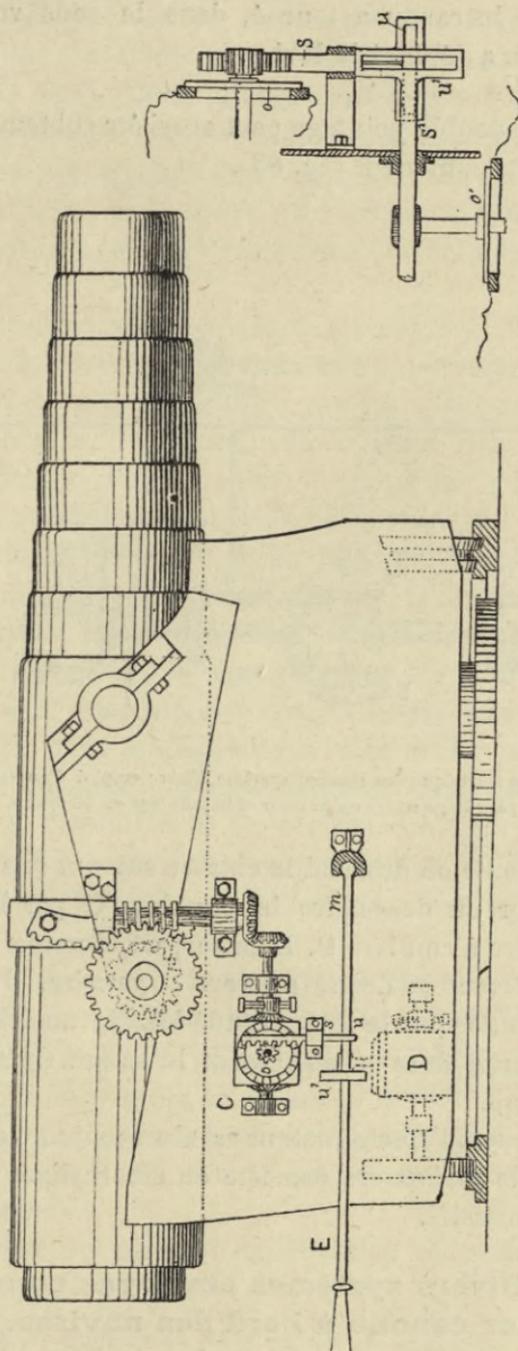


Fig. 82. — Pointage électrique des canons, système Fiske, avec servo moteur électrique.

repos lorsque le canon a tourné, dans le sens voulu, de l'angle dont on a déplacé le levier.

429. — Ce double pointage peut aussi être obtenu à l'aide d'un seul électromoteur F (fig. 83).

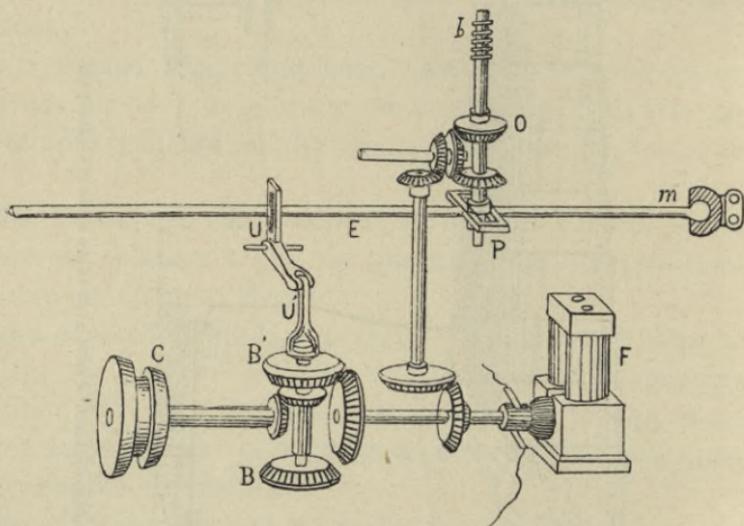


Fig. 83. — Pointage électrique des canons, système Fiske; emploi d'un seul électromoteur pour le pointage en hauteur et le pointage en direction.

La vis *b* monte ou descend la culasse suivant que le levier *E* fait monter ou descendre le manchon *O* par l'intermédiaire du cadre à coulisse *P*. D'autre part, lorsque le levier *E* est déplacé vers la droite ou vers la gauche, il fait descendre ou monter par le levier coudé *UU'* le manchon *BB'*; la roue *C* tourne alors en entraînant le canon dans un sens ou dans l'autre.

Il est clair que l'électromoteur est alors toujours en mouvement et que la manœuvre consiste en embrayages et désembrayages successifs.

429 bis. Divers systèmes employés pour la manœuvre des canons à bord des navires. — Après divers essais partiels, ayant donné des résultats médiocres, à

bord de quelques navires, on a réalisé, en France, plusieurs installations complètes de manœuvre de canons, ou mieux de manœuvre de tourelles cuirassées renfermant des canons.

Deux systèmes complètement différents ont été adoptés parallèlement, le système de la *cartouche électrique* de MM. Canet et Hillairet, et le *système des relais* de MM. Savatier et de La Gabbe, ingénieurs des Forges et Chantiers de la Méditerranée.

Nous étudierons d'une manière complète, dans un autre ouvrage¹, les divers appareils électriques ressortant du service de l'artillerie à bord des navires. Nous mettrons alors en évidence les modifications, souvent très importantes, qu'un même système a subies d'un navire à l'autre. Dans cette nouvelle édition du présent ouvrage, où la manœuvre des canons ne constitue qu'un fragment de chapitre, nous ne pouvons développer cette question, si importante actuellement, autant qu'il le faudrait et que nous le ferons dans l'ouvrage spécial qui lui sera consacré.

Nous nous contenterons donc actuellement d'exposer le principe des deux systèmes dont nous avons parlé. Nous ne donnerons en détail, comme d'ailleurs dans l'édition précédente, que l'installation du croiseur chilien *Capitan Prat*, qui a été la première installation complète de manœuvre de l'artillerie réalisée par des ateliers de construction français.

429 ter. Système de la cartouche électrique pour la manœuvre des canons. — Ce système n'a été appliqué jusqu'à présent qu'au pointage en direction de tourelles blindées renfermant un canon de 19 à 14^{cm}. Le pointage en hauteur des canons eux-mêmes, ainsi que les diverses opérations de chargement, sauf la montée des projectiles, étant effectués à bras.

Le moteur du pointage en direction est placé sur le pont

1. H. Leblond. *Applications de l'électricité au service de l'artillerie à bord des navires.*

cuirassé ; il est excité en dérivation. L'axe de son induit entraîne par une vis sans fin une roue striée, montée sur un arbre intermédiaire ; celui-ci porte un pignon denté qui engrène avec une couronne dentée portée par le tube de la tourelle ; il en résulte une double réduction de vitesse. Pour éviter l'effet désastreux des chocs, au démarrage ou à l'arrêt, le pignon denté dont nous venons de parler n'est pas claveté sur l'arbre intermédiaire ; il est entraîné par frottement ; un glissement pourrait donc se produire, dans le cas où l'effort résistant opposé par la tourelle deviendrait trop considérable, ou bien dans le cas de chocs violents.

La mise en marche du moteur, ses variations de vitesse, l'inversion de la marche de la droite vers la gauche, ou réciproquement, le stoppage s'effectuent directement au moyen d'une série d'organes tous renfermés dans une boîte cylindrique en laiton placée dans la tourelle, sous la main du pointeur, et dénommée *cartouche électrique*. Les conducteurs amenant le courant de la source électrique doivent donc, avant de se rendre au moteur du pointage, monter dans la tourelle, où ils sont connectés de diverses façons, par les organes de manœuvre de la cartouche électrique, avec d'autres conducteurs redescendant jusqu'à l'induit du moteur, placé sous le pont cuirassé ; l'inducteur de ce moteur est d'ailleurs excité par une dérivation spéciale prise directement de la source.

Afin d'obtenir quelque précision dans la manœuvre, l'arrêt du moteur est obtenu instantanément par la mise en court-circuit de l'induit succédant à l'interruption du courant venant de la source (256).

Enfin, il a fallu prévoir l'arrêt automatique de la tourelle, lorsqu'elle arrive à bout de course, à droite ou à gauche. A cet effet, des *butées électriques*, ou interrupteurs, s'ouvrent par l'effet d'un doigt porté par la tourelle, provoquent ainsi automatiquement l'interruption du courant de la source et l'arrêt instantané du moteur par mise en court circuit. Mais comme, la tourelle ayant ainsi été arrêtée automatiquement

à bout de course, à droite par exemple, s'il faut qu'on ne puisse plus, le voulût-on, remettre la tourelle en marche dans le même sens, il faut aussi néanmoins qu'on ait toute liberté de mettre en marche vers la gauche; cette condition peut être réalisée par divers dispositifs; c'est le dispositif particulier adopté ici qui fait presque toute l'originalité de la cartouche électrique. Nous allons décrire cette dernière et indiquer comment on manœuvre une tourelle par son intermédiaire.

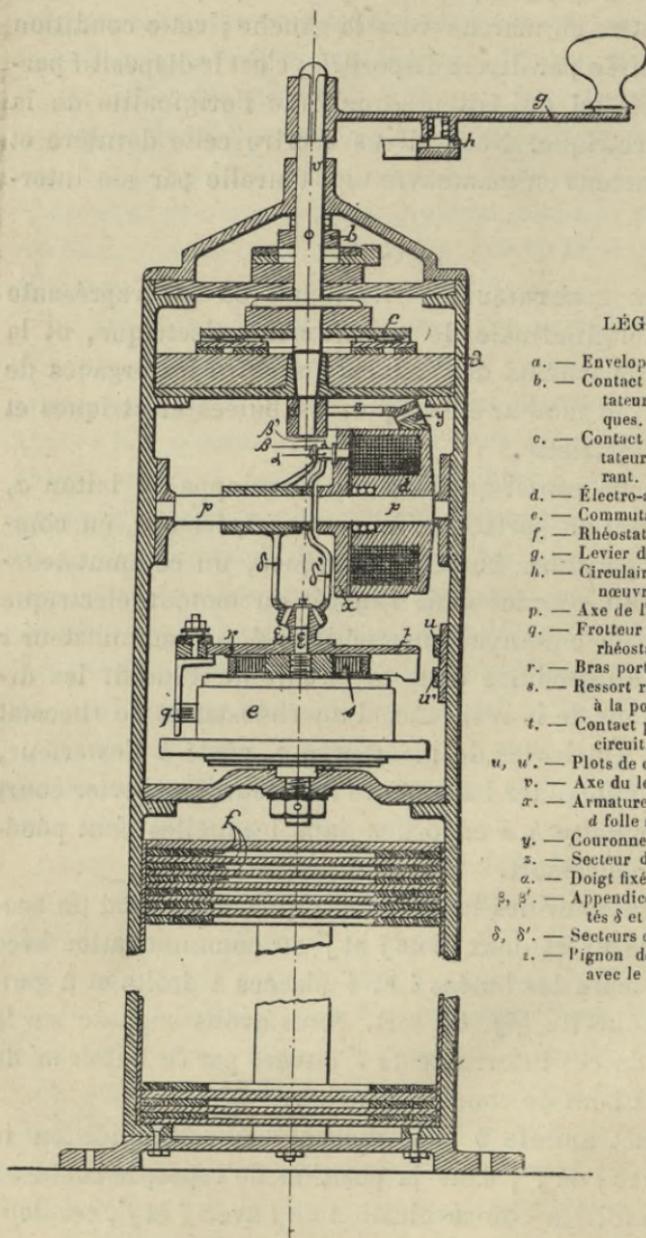
CARTOUCHE ÉLECTRIQUE. — La figure 83 *bis* représente une coupe longitudinale de la cartouche électrique, et la figure 83 *ter* le schéma des connexions entre les organes de la cartouche, le moteur électrique, les butées électriques et la source d'électricité.

La cartouche renferme dans son enveloppe de laiton *a*, successivement en partant de la partie supérieure, un commutateur *b* pour les butées électriques, un commutateur-inverseur *c* du courant dans l'induit du moteur électrique (*fig. 83 bis*), un embrayeur magnétique *d*, un commutateur *e* permettant d'introduire dans le circuit de l'induit les diverses fractions de la résistance d'un rhéostat et ce rhéostat lui-même *f*. Un levier de manœuvre *g*, placé à l'extérieur, permet de commander les organes intérieurs; ce levier court sur une circulaire *h* à encoches dans lesquelles peut pénétrer un teton à ressort.

Le commutateur des butées électriques comprend un secteur de contact *i* et deux plots *j* et *j'* en communication avec les interrupteurs des butées *l* et *l'* placées à droite et à gauche de la tourelle (*fig. 83 ter*). Nous avons supposé sur la figure l'un de ces interrupteurs *l'* ouvert par le butoir *m'* de la tourelle à bout de course à gauche.

Un contact mobile *b* peut mettre en communication le secteur *i* avec *j* ou *j'*; dans la position de repos, le contact *b* établit à la fois la communication de *i* avec *j* et *j'*, ces deux derniers étant, à cet effet, assez rapprochés l'un de l'autre.

L'inverseur de courant dans l'induit se compose, comme toujours, de deux secteurs n et n' en communication avec



LÉGENDE

- a. — Enveloppe de la cartouche.
- b. — Contact mobile du commutateur des butées électriques.
- c. — Contact mobile du commutateur inverseur du courant.
- d. — Électro-aimant embrayeur.
- e. — Commutateur du rhéostat.
- f. — Rhéostat.
- g. — Levier de manœuvre.
- h. — Circulaire du levier de manœuvre.
- p. — Axe de l'électro-aimant d.
- q. — Frotteur du commutateur de rhéostat.
- r. — Bras portant le frotteur q.
- s. — Ressort rappelant le frotteur à la position neutre.
- t. — Contact produisant le court-circuit.
- u, u'. — Plots de court-circuit.
- v. — Axe du levier de manœuvre.
- x. — Armature de l'électro-aimant d folle sur l'axe p.
- y. — Couronne dentée de d.
- z. — Secteur denté claveté sur v.
- a. — Doigt fixé à l'armature x.
- β, β'. — Appendices des secteurs dentés δ et δ'.
- δ, δ'. — Secteurs dentés fous sur p.
- ε. — Pignon denté faisant corps avec le bras r.

Fig. 83 bis. — Cartouche électrique. — Coupe verticale.

les deux pôles de la source S, et de deux secteurs o et o' à 90° des premières et en communication avec les deux balais de

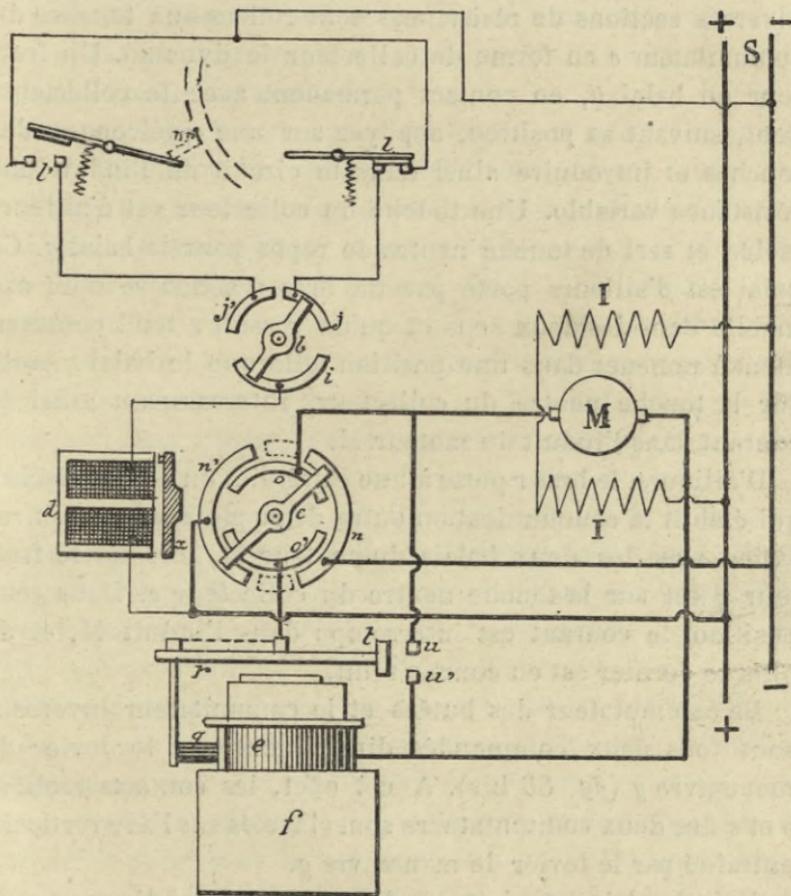


Fig. 83 ter. — Cartouche électrique. — Schéma des connexions.

l'induit du moteur M, dont l'inducteur I est excité par une dérivation prise directement sur les deux pôles de la source.

Un contact mobile c permet d'établir suivant sa position les communications de l'induit avec la source, dans un sens ou dans l'autre. Deux plots isolés (figurés en pointillé) marquent la position de repos du contact c .

D'ailleurs, sur le trajet du secteur o' au balai du moteur M

est intercalé le rhéostat f . Celui-ci est formé de résistances en forme de bobines plates superposées les unes sur les autres au fond de la cartouche électrique (*fig. 83 bis*). Les diverses sections de résistances sont reliées aux touches du commutateur e en forme de collecteur de dynamo. Un frotteur ou balai q , en contact permanent avec le collecteur, peut, suivant sa position, appuyer sur une quelconque des touches et introduire ainsi dans le circuit de l'induit une résistance variable. Une touche du collecteur est d'ailleurs isolée et sert de touche neutre de repos pour le balai q . Ce balai est d'ailleurs porté par un bras r solidaire d'un axe mobile dans les deux sens et qu'un ressort s tend constamment à ramener dans une position telle que le balai q porte sur la touche neutre du collecteur, interrompant ainsi le courant dans l'induit du moteur M.

D'ailleurs, le bras r porte à une extrémité un contact isolé t qui établit la communication entre deux plots u et u' en relation avec les deux balais du moteur M, lorsque le frotteur q est sur la touche neutre du collecteur e . Dans cette position, le courant est interrompu dans l'induit M, et de plus ce dernier est en court-circuit.

Le commutateur des butées et le commutateur inverseur sont tous deux commandés directement par le levier de manœuvre g (*fig. 83 bis*). A cet effet, les contacts mobiles b et c des deux commutateurs sont clavetés sur l'axe vertical v entraîné par le levier de manœuvre g .

Mais le rhéostat n'est pas directement lié à l'axe v , et sa commande par le levier de manœuvre g se fait par l'intermédiaire de l'embrayage magnétique dont nous avons parlé déjà.

Celui-ci consiste en un électro-aimant d , dont la bobine de fil fin est, par une extrémité, reliée au secteur i du commutateur des butées, et par l'autre avec l'un des pôles de la source électrique, le positif dans la figure *83 ter*. Cet électro-aimant sera par suite excité, lorsque le contact mobile b du commutateur des butées établit la communication du sec-

teur i avec celui des plots j et j' qui est relié à un interrupteur de butée l ou l' fermé, parce que d'autre part ces interrupteurs sont reliés au second pôle (négatif ici) de la source.

Dans la figure 83 *ter*, le contact b étant tourné sur la droite, comme l'interrupteur l de la butée de droite est fermé, l'électro-aimant est actionné.

Lorsque l'électro-aimant d est excité, il attire une armature x . D'ailleurs, la culasse de l'électro-aimant porte une couronne dentée y engrenant avec un secteur denté z claveté sur l'axe v commandé par le levier de manœuvre g ; de sorte que lorsqu'on tourne ce levier à droite ou à gauche, non seulement on manœuvre vers la droite ou la gauche les contacts mobiles b du commutateur des butées et c du commutateur-inverseur, mais encore on fait tourner, dans un sens ou dans l'autre, l'électro-aimant autour de son axe horizontal p .

L'armature x , montée sur l'axe p , porte un doigt α placé parallèlement à l'axe p entre les appendices β et β' de deux secteurs dentés δ et δ' montés fous sur l'axe p et engrenant avec le pignon ϵ de part et d'autre de ce pignon; ce dernier fait corps avec le bras r qui porte le frotteur q .

On conçoit alors que, si l'électro-aimant est excité, et qu'on tourne le levier de manœuvre à droite ou à gauche, l'électro-aimant, participant à ce mouvement, entraîne aussi son armature x collée sur lui, malgré un ressort antagoniste, et par le doigt α et les appendices β ou β' , l'un ou l'autre des secteurs δ ou δ' ; finalement le pignon ϵ et le bras r , avec son frotteur q , tournent dans un sens ou dans l'autre.

Si, au contraire, l'électro-aimant n'est pas excité, il est encore entraîné par le mouvement du levier de manœuvre, mais cesse d'entraîner lui-même l'armature x et le bras r . Ce dernier, sous l'influence du ressort s , revient alors automatiquement dans la position de repos, le frotteur q appuyant sur la touche isolée du collecteur e et le moteur électrique étant en court-circuit.

Pour faciliter l'entraînement de l'armature x par l'électro-

aimant d , cette armature porte un petit teton, non représenté par la figure 83 *bis*, qui vient s'encastrier dans une encoche du noyau de l'électro-aimant, quand l'armature se colle sur ce dernier. Il faut toutefois remarquer que ce teton ne peut pénétrer dans l'encoche que lorsque, l'armature étant ramenée par le ressort s dans la position de repos, le levier de manœuvre est lui-même dans sa position de repos.

Enfin, entre le doigt α et les appendices β et β' il existe un certain jeu, si bien qu'il faut avoir déjà fait tourner le levier de manœuvre g d'un certain angle pour provoquer le mouvement du frotteur q du rhéostat; à ce moment, l'angle dont ont tourné les contacts mobiles b et c est suffisant déjà pour mettre l'électro-aimant d en communication avec l'un des plots j ou j' du commutateur des butées, et pour établir dans le commutateur-inverseur les communications propres à faire passer, dans l'induit du moteur, le courant de la source, dans un sens ou dans l'autre.

Nous pouvons maintenant nous rendre compte aisément de la manœuvre d'une tourelle au moyen de la cartouche électrique.

Supposons la tourelle au repos et à peu près à mi-course; le levier de manœuvre g étant à sa position médiane de repos, l'électro-aimant embrayeur d est excité, puisque le courant qui lui vient du pôle positif de la source peut retourner au pôle négatif, soit par i, j et l , soit par i, j' et l' , les deux interrupteurs l et l' étant tous les deux fermés et le contact b à cheval sur j et j' .

L'armature x est attirée et disposée pour entraîner le frotteur q du rhéostat; ce frotteur est actuellement sur la touche neutre et met l'induit du moteur en court-circuit.

D'ailleurs, l'inverseur c est dans la position de repos verticale sur les plots isolés.

Si maintenant on tourne le levier de manœuvre vers la droite, par exemple, on commence par mettre le contact b du commutateur des butées sur le plot j , et l'électro-aimant n'est plus excité que par le chemin i, j, l . En même temps, le

contact c de l'inverseur est mis dans une position permettant au courant de passer dans l'induit du moteur dans un sens tel qu'il tende à faire tourner la tourelle vers la droite.

Pendant ce temps, l'électro-aimant a tourné avec son armature et le doigt α est venu appuyer, en regagnant le jeu, sur l'appendice β .

Si on continue à appuyer le levier de manœuvre sur la droite, le doigt α entraîne l'appendice β et, par le pignon ϵ , le frotteur q . Le court-circuit du moteur cesse, et le frotteur q passe sur des touches du collecteur e en communication avec la source; la résistance introduite dans le circuit sera de plus en plus faible à mesure qu'on tournera davantage sur la droite le levier de manœuvre. Le moteur démarra à un certain moment et sa vitesse pourra être, à volonté, augmentée ou diminuée, suivant qu'on tournera davantage le levier g vers la droite, ou qu'on le ramènera ensuite quelque peu vers la position de repos.

La tourelle tournera vers la droite, plus ou moins vite, suivant les besoins du pointage. Lorsque le pointage est effectué, pour stopper la tourelle, on ramène vivement le levier de manœuvre à sa position de repos; le frotteur q suit le mouvement, grâce au ressort s , et vient occuper la touche neutre, mettant en plus l'induit en court-circuit.

On manœuvre vers la gauche de la même manière. Si, pendant une manœuvre, à gauche par exemple, la tourelle arrive à bout de course, le butoir m' , agissant sur l'interrupteur l' , ouvre cet interrupteur, le circuit i, j, l' est coupé. Comme on manœuvrait vers la gauche, le contact b étant justement sur j' , l'électro-aimant embrayeur d cesse d'être excité; l'armature x est arrachée par son ressort antagoniste et le ressort s agit librement pour ramener le frotteur q sur la touche neutre; le moteur s'arrête. On ne peut plus remettre en marche le moteur vers la gauche, mais on pourra le faire partir vers la droite. Dans la figure 83 *ter*, on a précisément supposé que, la tourelle étant arrivée à bout de course sur la gauche, on repart vers la droite.

429 quater. Système des relais pour la manœuvre des canons. — Le principe essentiel de la manœuvre des canons par le système des relais est que tous les appareils de manœuvre proprement dits, tels que l'inverseur du courant, le rhéostat pour le démarrage et les changements de vitesse, etc., restent tous près des moteurs électriques, à l'abri sous le pont cuirassé. Dans la tourelle se trouve uniquement un petit commutateur qui sert à commander les organes de manœuvre proprement dits, si bien que ce commutateur de la tourelle et les fils fins qui y aboutissent peuvent être avariés et détruits sans que la manœuvre électrique de cette tourelle soit empêchée, puisque les organes essentiels restent intacts.

On a résolu simplement ce problème de commande à distance, en employant d'une manière générale comme commutateurs-inverseurs de courant, commutateurs de démarrage et de changements de vitesse, des commutateurs actionnés par des électro-aimants relais. Ce sont les armatures de ces électro-aimants qui, attirées par ces derniers excités, établissent, au moyen de ponts s'appuyant sur des plots, les communications nécessaires pour les manœuvres. Il n'y a plus dès lors qu'à exciter, dans un ordre convenable, de la tourelle, ces électro-aimants qui restent placés sous le pont cuirassé. Comme les électro-aimants, enroulés de fil fin, sont établis sur une dérivation prise aux bornes de la source, un courant assez faible suffit pour les exciter; le commutateur de commande placé dans la tourelle est donc de petites dimensions et les fils qui le relie aux électro-aimants de faible section; d'où un encombrement très faible de la tourelle, une protection aisée des appareils et des réparations faciles. Étant donnée d'ailleurs la faible dépense nécessitée par ces appareils de commande, il est tout indiqué d'avoir à l'avance un rechange tout disposé, soit en fils, soit en commutateurs.

Le système de commande par relais des tourelles cuirassées a pris, dans ces dernières années, un développement

considérable; c'est le seul qui ait été appliqué à la manœuvre des grosses tourelles pesant jusqu'à 450 tonnes et renfermant des canons du plus gros calibre. Il est probable qu'on rencontrerait de sérieuses difficultés à appliquer le système de la cartouche électrique à ces mêmes tourelles, ne fût-ce que par suite des dimensions exagérées que devrait avoir la cartouche électrique, qui renferme, il ne faut pas l'oublier, tous les organes de manœuvre principaux des moteurs électriques.

Nous ne donnerons ici qu'un seul exemple de l'application du système de la commande par relais à la manœuvre des canons, celle faite sur le croiseur chilien *Capitan Prat*, réservant l'étude des autres applications pour un autre ouvrage.

MANŒUVRE ÉLECTRIQUE DES CANONS SUR LE CROISEUR CHILIEN

« CAPITAN PRAT »

430. Dispositions générales. — L'artillerie du croiseur *Capitan Prat*, construit à la Seyne, par la Compagnie des Forges et Chantiers de la Méditerranée, comprend :

1° Quatre canons Canet de 24 cm en tourelles barbettes, sur affût système Canet. Ces canons sont disposés en losange, un en chasse, un en retraite et deux en encorbellement de chaque bord.

2° Huit canons Canet à tir rapide de 12 cm placés deux par deux dans quatre tourelles fermées; deux des tourelles sont placées à l'avant et les deux autres à l'arrière.

Les canons de 24 cm ont une longueur de 30 calibres; ils lancent un projectile de 170 kg avec une vitesse de 680 mètres.

Les canons de 12 cm ont 45 calibres; ils lancent un projectile de 21 kg à la vitesse de 680 mètres.

Le pointage latéral de ces huit tourelles est actionné électriquement; il en est de même des monte-charges alimentant les pièces.

On passe d'ailleurs aisément de la manœuvre électrique à la manœuvre à bras.

Nous décrivons spécialement le pointage latéral des tourelles de 24 cm et leur monte-charge électrique dont l'installation très réussie est due à M. Savatier, ingénieur-électricien des Forges et Chantiers.

431. Pointage des tourelles de 24 cm. — Les tourelles de 24 cm sont à chargement central ; elles sont équilibrées par rapport à leur axe de rotation afin de faciliter la manœuvre à bras ; le poids a d'ailleurs été réduit au minimum par la forme ovoïde de la carapace.

Les tourelles sont portées sur une couronne de galets horizontaux placée sous la plate-forme et elles sont guidées à la partie haute par une autre couronne de galets verticaux s'appuyant sur le tube, maintenu lui-même à la partie basse par un pivot portant dans une crapaudine.

Le pointage latéral se fait à bras ou électriquement en agissant sur la partie basse du tube.

Pour éviter les efforts latéraux sur le tube, on l'actionne au moyen d'un couple réalisé par deux électromoteurs identiques agissant aux extrémités d'un même diamètre. Pour que ces deux moteurs développent constamment le même effort et tournent à la même vitesse, ils sont excités en dérivation, cette dérivation étant d'ailleurs prise aux bornes mêmes de la génératrice, ou plus exactement au tableau de distribution auquel sont reliées les génératrices ; de plus, les inducts sont couplés en tension ; on a ici réalisé le système de distribution mixte dont nous avons parlé plus haut (332) et qui est représenté schématiquement par la figure 44. L'excitation des inducteurs et le courant dans l'induit sont ainsi identiques à chaque instant pour les deux moteurs et, comme les deux moteurs sont appliqués au même travail résistant, au lieu de se dérégler, ils tendent, au contraire, à se régler mutuellement.

Les moteurs de pointage latéral sont des machines bipo-

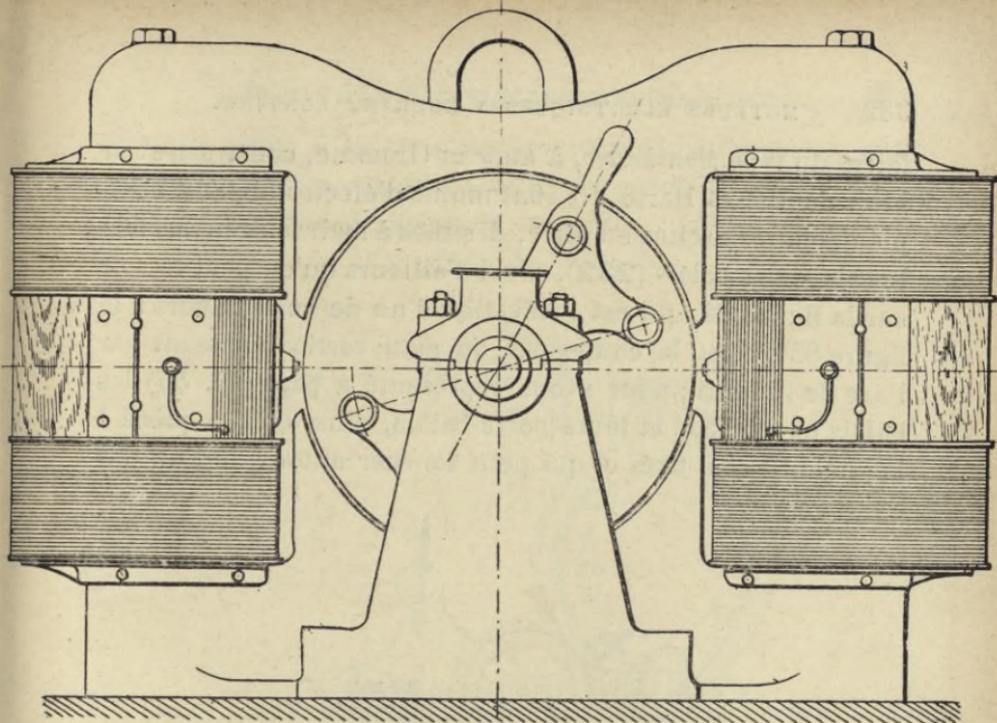


Fig. 84. — Croiseur *Capitan Prat*. Électromoteur du pointage latéral d'une tourelle de 24 cm. Élévation, échelle $\frac{1}{10}$.

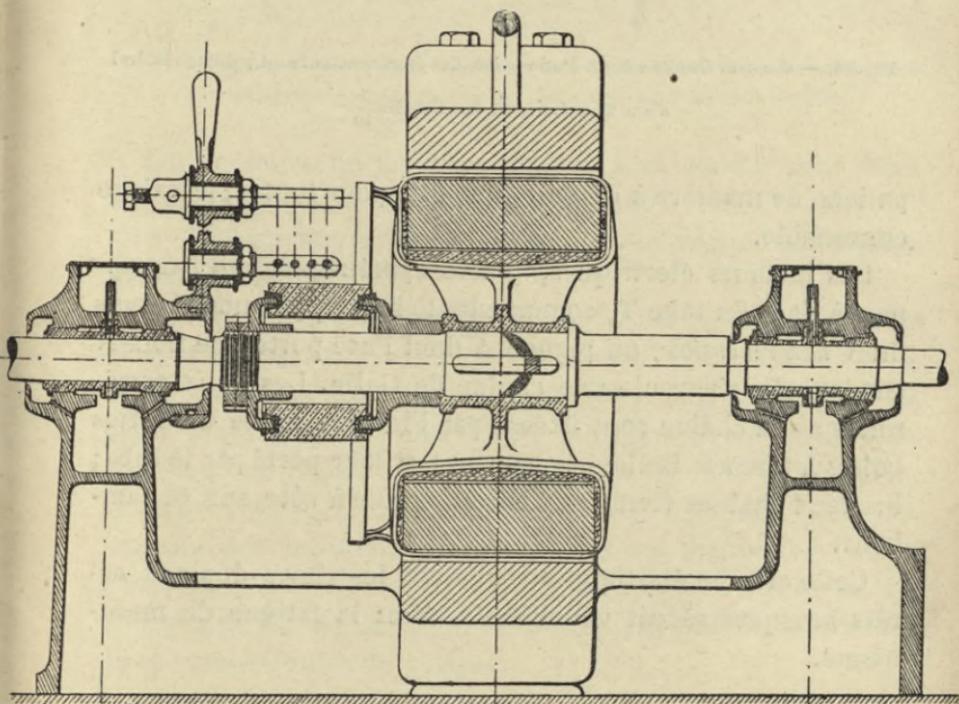


Fig. 85. — Croiseur *Capitan Prat*. Électromoteur du pointage latéral d'une tourelle de 24 cm. Coupe par l'axe, échelle $\frac{1}{10}$.

laires du type *Manchester*, à anneau Gramme, construites par MM. Sautter et Harlé. Ils sont munis d'électro-aimants complémentaires excités en série, destinés à maintenir invariable le calage des balais (232), ainsi d'ailleurs qu'on peut le voir sur la figure 84, qui est l'élévation d'un de ces moteurs ; la figure 85 en est la coupe par un plan vertical passant par l'axe de l'induit ; nous avons représenté à part (*fig. 86*) les balais en charbon et leurs porte-balais, ainsi que la pièce à laquelle ils sont fixés et qui peut tourner autour de l'un des

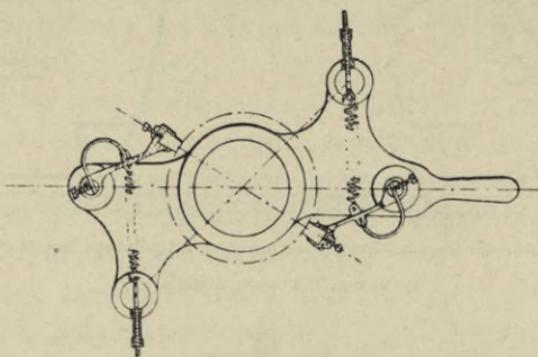


Fig. 86. — Croiseur *Capitan Prat*. Porte-balais des électromoteurs du pointage latéral
d'une tourelle de 24 cm. Échelle $\frac{1}{10}$.

paliers, de manière à obtenir, une fois pour toutes, le calage convenable.

Les moteurs électriques, placés symétriquement par rapport à l'axe du tube T, commandent chacun, par une vis sans fin V *non réversible*, un pignon A dont l'axe porte une noix N sur laquelle s'enroule une chaîne de Galle. Les deux extrémités de la chaîne sont fixées, par l'intermédiaire de fortes boîtes à ressorts Belleville, sur un tambour porté par le tube ; les deux chaînes viennent s'enrouler côte à côte sur ce tambour.

Cette attache élastique amortissant les chocs dus aux arrêts brusques réduit considérablement la fatigue du mécanisme.

Nous avons d'ailleurs représenté schématiquement cette liaison des électromoteurs P et P' du pointage latéral et de la tourelle T dans la figure 87.

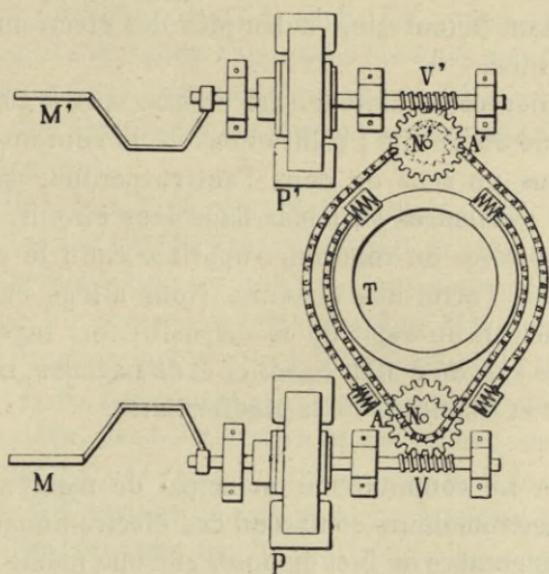


Fig. 87. — Croiseur *Capitan Prat*. Commande du pointage latéral des tourelles de 24 cm par deux moteurs électriques formant un couple sur l'axe de la tourelle.

Les moteurs du pointage latéral sont établis pour faire 300 tours par minute à grande vitesse et la tourelle doit décrire 270° en une minute environ. La réduction de vitesse est donc considérable.

On a représenté également sur la figure 87 les manivelles M et M' permettant la manœuvre à bras. Pour manœuvrer à bras, il suffit d'interrompre le courant dans les induits et aussi les inducteurs des électromoteurs et de relier, au moyen d'une transmission par pignons et chaîne de Galle, les arbres des électromoteurs aux arbres des manivelles. On entraîne les induits, en agissant sur les manivelles ; mais l'excitation des inducteurs étant coupée, il n'en résulte aucun effort supplémentaire à produire ; les induits font alors tout simplement l'office de volants.

432. Commande des électromoteurs actionnant le pointage des tourelles de 24 cm. — La manœuvre des électromoteurs du pointage latéral se commande au moyen de deux commutateurs, l'un placé sous la main du pointeur, dans la tourelle, l'autre près des électromoteurs, à la base du tube.

Le premier commutateur sert uniquement à commander la manœuvre du second ; celui-ci envoie le courant dans les induits dans un sens ou dans l'autre, permet, par l'introduction de résistances variables dans leur circuit, d'obtenir plusieurs vitesses de rotation, supprime enfin le courant et produit ainsi l'arrêt des moteurs. Nous allons entrer dans quelques détails au sujet de ce dispositif fort ingénieux, et surtout très sûr, dû à MM. Savatier et de Lagabbe, ingénieurs des Forges et Chantiers de la Méditerranée.

433. — Le commutateur principal de manœuvre placé près des électromoteurs comprend des électro-aimants interrupteurs au nombre de 5 et disposés sur une même table.

Lorsque la bobine d'un de ces électro-aimants G (fig. 88)

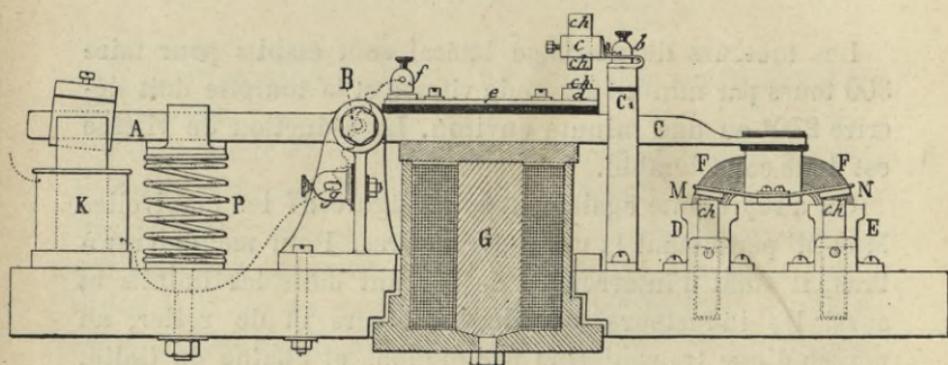


Fig. 83. — Électro-aimant relais du commutateur du pointage latéral électrique des tourelles de 24 cm. Échelle $\frac{10}{25}$.

est traversée par un courant, le noyau central de fer doux et le cylindre également en fer qui enveloppe cette bobine s'ai-

maintient et attire l'armature H en fer fixée à un levier AC mobile autour de l'axe B, malgré l'effort résistant d'un ressort antagoniste P. L'effet de cette attraction est d'appliquer un pont FF, porté par l'extrémité du levier et isolé de lui, contre deux plots de contact D et E. Le pont est formé de plusieurs lames de laiton appliquées les unes sur les autres, de sorte que grâce à l'élasticité qui en résulte et à l'attraction énergique de l'électro-aimant sur son armature le contact obtenu est excellent.

Pour éviter, lors de la rupture du contact, l'effet destructif des étincelles sur les blocs métalliques D, E et le pont F avec des courants aussi intenses que ceux qui doivent les traverser, le pont FF porte une lame élastique MN dont les deux extrémités viennent appuyer sur des cylindres de charbon *ch* reliés à D et E. Les choses sont ainsi disposées que si le levier C se relève, sous l'influence de son ressort antagoniste, le contact est d'abord rompu entre le pont F et les plots D, E, la lame MN restant encore pendant quelque temps appuyée sur les cylindres de charbon; puis, le mouvement de montée du levier continuant, la rupture se fait enfin entre MN et le charbon; c'est donc sur ce dernier, facile à remplacer, que se porte l'effet destructif des étincelles.

Trois des électro-aimants interrupteurs ne portent qu'un seul pont FF; les deux autres portent un double pont mettant en communication deux paires de contacts D, E et D', E'. Ces deux électro-aimants (c'est l'un d'eux qui est représenté par la figure 88) sont munis d'un dispositif complémentaire comprenant :

1° Un contact de charbon *ch* dans une monture de laiton *c* reliée à une borne *b* isolée du guide C₁ du levier C; cette borne *b* est d'ailleurs elle-même reliée métalliquement à une autre *a* placée près de la base de l'électro-aimant, mais masquée sur la figure par C₁;

2° Un contact de charbon *d* porté par le levier C, mais isolé de lui; il est relié métalliquement, par l'intermédiaire

de la borne f , à une autre isolée g ; celle-ci à son tour communique avec l'une des extrémités du fil excitateur d'un petit électro-aimant auxiliaire K , appelé *électro-aimant de mise en court-circuit*. On voit que si le courant cesse de passer dans la bobine de l'électro-aimant principal G , le levier AC rappelé par son ressort antagoniste établit une communication entre la borne a et l'une des extrémités du fil de l'électro-aimant K .

Un rhéostat placé près du commutateur et près des électromoteurs de pointage est divisé en sections introduites ou enlevées successivement du circuit des induits quand les électro-interrupteurs sont actionnés.

434. — Le commutateur placé près du pointeur, dans la tourelle, et qui commande celui que nous venons de décrire, constitue extérieurement une boîte cylindrique en laiton de 25 cm environ de diamètre, qu'on voit en C dans la figure 89, qui est la représentation schématique des liaisons entre le commutateur supérieur et le commutateur inférieur.

Dans cette boîte se trouvent un certain nombre de plots ou bandes de contact disposés comme l'indique la figure.

Un levier ou manipulateur permet, lorsqu'il est tourné vers la droite, d'établir une communication électrique entre la bande S et la bande D d'une part, et, d'autre part, entre S et l'un quelconque des plots de droite marqués 1, 2, 3. Il en est de même quand on tourne le manipulateur vers la gauche, sauf que la bande G remplace la bande D .

Si le manipulateur est abandonné à lui-même, il revient à sa position de repos, par suite de son élasticité. Dans cette position, la communication est établie entre la bande S et le plot m d'une part, et, d'autre part, entre les plots h , h' et l .

Deux boutons à ressort, B' et B , l'un à droite, l'autre à gauche du commutateur, permettent, lorsqu'on appuie sur l'un d'eux, d'établir une communication entre D et h' , ou G et h . En même temps, si le manipulateur est dans sa position

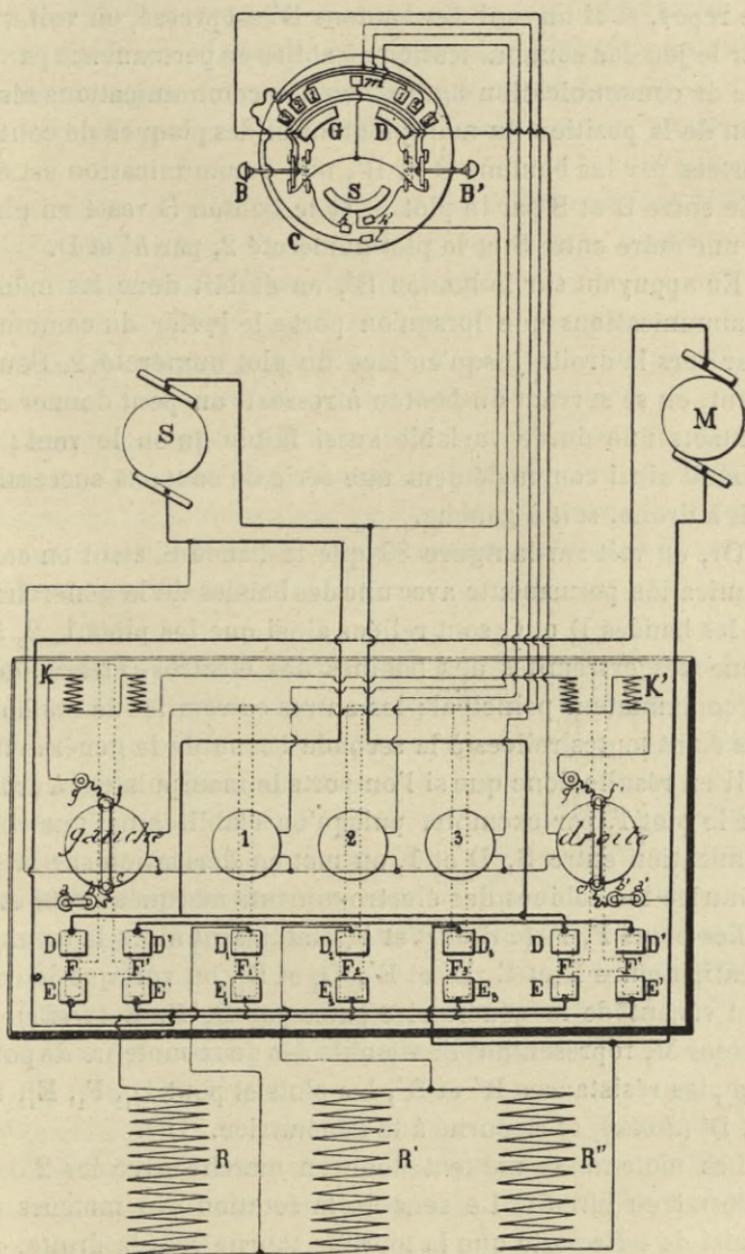


Fig. 89. — Pointage électrique des canons de 24 cm sur le croiseur chilien *Capitan Prat*.
 Connexions entre le commutateur supérieur et le commutateur-relais inférieur.

de repos, et si un seul des boutons B' est pressé, on voit que, par le jeu des communications établies en permanence par les fils de communication figurés, ou des communications résultant de la position du manipulateur et des plaques de contact portées par les boutons B et B', une communication est établie entre D et S par le plot *m* et le bouton B resté en place et une autre entre S et le plot numéroté 2, par *h'* et D.

En appuyant sur le bouton B', on établit donc les mêmes communications que lorsqu'on porte le levier du commutateur vers la droite jusqu'en face du plot numéroté 2. Seulement, en se servant du bouton à ressort, on peut donner aux contacts une durée variable aussi faible qu'on le veut; on produit ainsi commodément une série de contacts successifs, soit à droite, soit à gauche.

Or, on voit sur la figure 89 que la bande S étant en communication permanente avec une des bandes de la génératrice S, les bandes D et G sont reliées ainsi que les plots 1, 2, 3 à l'une des extrémités des bobines des électros-interrupteurs du commutateur principal; les autres extrémités de ces bobines étant toutes reliées à la seconde borne de la génératrice.

Il en résulte donc que si l'on porte le manipulateur à droite sur le plot 1, par exemple, puisqu'on établit ainsi une communication entre S, D et 1, on met en dérivation sur la génératrice les bobines des électro-aimants marqués *Droite* et 1.

Les ponts F, F' (*à droite*) et F₁ établissant alors la communication entre D et E, D' et E', D₁ et E₁, on voit que le courant venant de la génératrice passe par D, F, E (*droite*), le moteur M, représentant l'ensemble des deux moteurs de pointage, les résistances R'' et R', les plots et pont D₁, F₁, E₁, E', F', D' (*droite*), et retourne à la génératrice.

Les moteurs se mettent donc en marche avec les 2/3 du rhéostat en circuit. Le sens de la rotation des moteurs est choisi de telle sorte que la tourelle tourne vers la droite.

En amenant le manipulateur du commutateur de la tourelle, *à droite*, sur le plot 2 ou 3, on voit que le courant passe encore dans les électromoteurs dans le sens de la

rotation à droite, mais avec interposition de $1/3$ seulement de la résistance du rhéostat, ou suppression complète de toute résistance. Quand le manipulateur porte seulement sur la bande D, les moteurs tournent avec le rhéostat entier en circuit.

On voit donc qu'on peut donner aux électromoteurs quatre vitesses différentes, d'autant plus grandes que le manipulateur est tourné davantage vers la droite.

Il en est de même quand on manœuvre le levier à gauche, sauf que le courant passant cette fois dans l'électro-aimant de *Gauche*, le courant est inversé dans les moteurs.

On voit qu'en résumé les électros *Droite* et *Gauche* constituent un inverseur de courant et que les électros 1, 2, 3 constituent un commutateur de rhéostat. L'ensemble du commutateur de la tourelle et du commutateur d'en bas forme un commutateur à relais.

435. — Lorsque le manipulateur de la tourelle étant dans sa position de repos, aucun électro-aimant du commutateur-relais n'étant actionné, l'électro-aimant *Droite* et l'électro-aimant *Gauche* établissent une communication entre a' , K' et entre a , K (**433**) ; comme a et a' communiquent avec les deux conducteurs venant des balais des électromoteurs, et que K et K' sont reliés entre eux, on voit que, dans la position de repos, les électromoteurs sont fermés en court-circuit sur la résistance des électros K et K' . Ces électros traversés par le courant prenant naissance dans l'induit au moment de sa mise en court-circuit, assurent énergiquement le contact entre d et c (*fig. 88*).

Les inducteurs des électromoteurs restant, bien entendu, excités, l'arrêt est très brusque, malgré la grande inertie de la masse en mouvement et le pointage est très facile (**256**).

436. — Lorsque le pointage de la tourelle a été dégrossi par la manœuvre du manipulateur, on l'achève en agissant sur les boutons B et B' . La pression sur l'un de ces boutons,

comme nous l'avons expliqué, actionne les électros *Gauche* ou *Droite* et en même temps l'électro 2. Les moteurs sont donc mis en mouvement à une vitesse moyenne et cela pendant un temps variable avec la durée de la pression. On peut ainsi faire tourner la tourelle d'un angle aussi faible qu'on le veut, celle-ci s'arrêtant instantanément, aussitôt que le bouton pressé est abandonné, puisque les moteurs sont mis en court-circuit. Un quart d'heure d'apprentissage suffit, à une personne quelconque, pour apprendre à pointer avec précision une tourelle de 24 cm ; car aucune précaution pour la manœuvre du commutateur n'est nécessaire ; on ne peut, en effet, arriver à la grande vitesse qu'après avoir passé par les vitesses plus faibles et, inversement, si, étant à la grande vitesse, on veut stopper la tourelle, on ne peut le faire qu'en repassant par toute la série de vitesses. Le levier du commutateur retourne d'ailleurs de lui-même au repos, quand on l'abandonne.

437. — Le mouvement de la tourelle est limité nécessairement à droite et à gauche. Pour éviter tout accident, des interrupteurs automatiques, placés à droite et à gauche du tube, sur le trajet des fils reliant le commutateur de la tourelle aux électros *Droite* et *Gauche*, sont manœuvrés par des butées fixées au tube lui-même.

La tourelle est ainsi arrêtée à fin de course. Les interrupteurs automatiques sont indiqués en I et I' dans la figure 92. Lorsque la tourelle étant à bout de course un des interrupteurs a fonctionné, il est impossible au pointeur de remettre les moteurs et la tourelle en marche dans le même sens, malgré une fausse manœuvre du manipulateur.

438. — Le système de commutateur à relais que nous venons de décrire présente les avantages suivants :

L'encombrement dans la tourelle est réduit au minimum ; le commutateur de la tourelle peut être manœuvré, sans au-

cun effort, par le pointeur pendant qu'il conserve l'œil à la ligne de miré ;

Les fils aboutissant dans la tourelle et qui sont uniquement les fils de commande des électro-aimants du commutateur principal sont de faible section et peuvent être aisément protégés ; les électros fonctionnent en effet avec un courant d'environ 0,8 ampère et ils portent, avec ce faible courant, une charge de 60 kilogr. environ pour ceux à simple contact et de 120 kilogr. pour les plus gros à double contact ;

Une avarie dans ces fils ou même dans le commutateur de la tourelle peut bien empêcher la commande directe du pointage ; mais elle n'intéresse aucun des appareils essentiels, tous placés sous le pont cuirassé, de telle sorte que le pointage peut encore s'effectuer électriquement en manœuvrant à la main les électros-interrupteurs au commandement du pointeur ; ces fils de faible diamètre pourraient être d'ailleurs aisément réparés.

439. Montage des canons de 24 cm. — Le portecharge des canons de 24 cm consiste en une plate-forme sur laquelle prennent place la gargousse et l'obus et qui est munie d'un parachute.

Un électromoteur M, semblable à ceux du pointage latéral (*fig. 85 et 86*), quoique de dimensions un peu réduites, est fixé sur le tube T de la tourelle (*fig. 90*), dans la par-

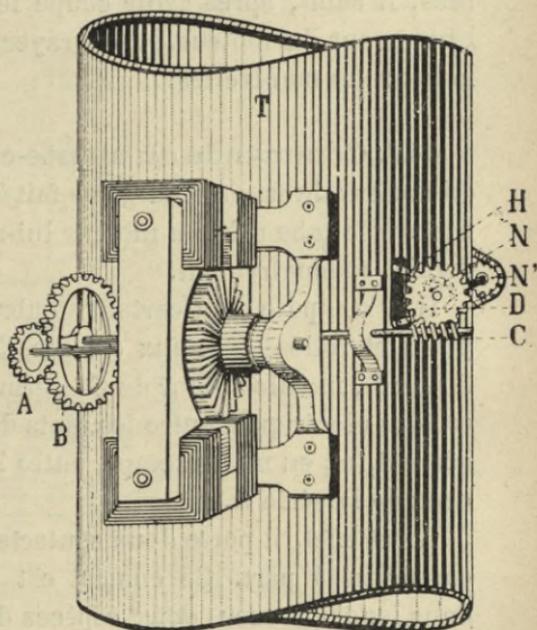


Fig. 90. — Croiseur *Capitan Prat*. Électromoteur actionnant le monte-charge des tourelles de 24 cm.

tie traversant la chambre des appareils du pointage latéral; il commande, par un pignon A monté sur l'arbre de son induit, une roue dentée B, dont l'arbre est terminé par une vis sans fin *non réversible* C en prise avec un pignon D; sur l'axe de ce dernier sont fixées des noix N sur lesquelles s'enroulent les chaînes de Galle H commandant le mouvement du porte-charge, dans les deux sens. La vitesse normale prévue pour le moteur est de 500 tours par minute.

L'excitation des inducteurs du moteur est encore faite en dérivation, cette dérivation étant prise au tableau de distribution de la génératrice; un rhéostat d'excitation est d'ailleurs intercalé sur le circuit inducteur. Les électros auxiliaires sont toujours en série avec l'induit (431).

Pour passer de la manœuvre électrique à la manœuvre à bras, il suffit, après avoir coupé le courant dans l'induit et l'inducteur du moteur, d'embrayer son arbre avec un autre mû par des manivelles.

440. Commande du monte-charge. — La commande du moteur du monte-charge se fait à l'aide d'un commutateur fixé sur le tube près du moteur lui-même et que nous allons décrire sommairement.

Il se compose d'un certain nombre de plots de contact disposés et reliés entre eux comme l'indique la figure 91. Un levier L, mobile autour de O, permet d'établir des communications électriques entre les plots de la série A et ceux de la série B, et, en même temps, entre les plots de la série C et ceux de la série D.

A cet effet, il porte deux contacts isolés de lui et dont l'un est figuré à part. Ce contact est formé d'un cylindre F, dans lequel glissent deux espèces de pistons G, reliés l'un à l'autre par un ressort *r* et un câble souple *f*; ce sont ces pistons G qui, glissant entre les deux séries de plots, établissent entre eux les contacts électriques.

La manœuvre du levier, à droite ou à gauche, lance le

courant dans l'électromoteur, dans un sens ou dans l'autre, pour la montée ou la descente, avec interposition dans le circuit de l'induit, d'une fraction d'autant plus faible d'un rhéostat que la position du levier est plus inclinée. Ce rhéos-

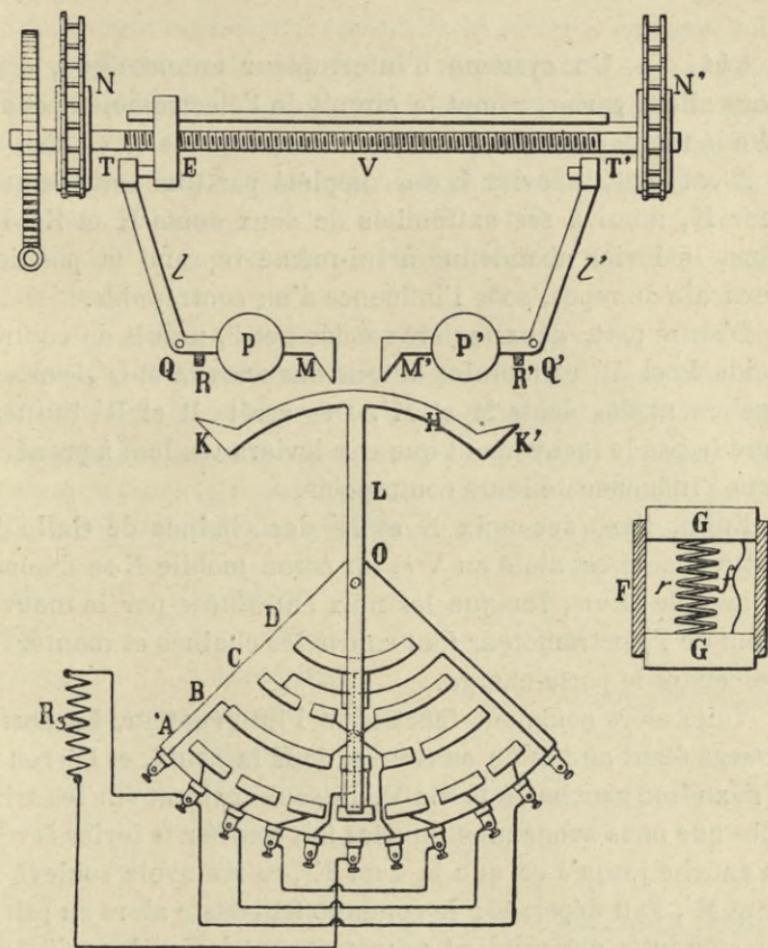


Fig. 91. — Monte-charge électrique des canons de 24 cm du *Capitan Prat*.
Commutateur-rhéostat et interrupteur automatique.

tat est placé dans la cale, près de la crapaudine du tube de la tourelle.

Quand le levier est dans sa position verticale de repos, la communication de l'induit avec la génératrice est interrom-

pue et en même temps l'induit est mis en court-circuit sur une résistance auxiliaire, ce qui provoque l'arrêt instantané du monte-charge.

Le levier L est manœuvré de la soute même au moyen d'un système de tringles.

441. — Un système d'interrupteur automatique, dont nous allons parler, rompt le circuit de l'électromoteur et arrête le monte-charge à bout de course, en haut ou en bas.

A cet effet, le levier L est complété par une sorte de secteur H, muni à ses extrémités de deux dents K et K'. De plus, le levier abandonné à lui-même reprend la position verticale de repos, sous l'influence d'un contrepoids.

D'autre part, deux leviers coudés l et l' , munis de contrepoids P et P' et mobiles autour des axes Q et Q', portent également des dents M et M'. Des arrêts R et R' limitent vers le bas le mouvement que ces leviers tendent à prendre, sous l'influence de leurs contrepoids.

Enfin, l'axe des noix N et N' des chaînes de Galle du porte-charge est fileté en V et un écrou mobile E se déplace le long de la vis, lorsque les noix entraînées par le mouvement de l'électromoteur font courir les chaînes et monter ou descendre le porte-charge.

Voici alors comment fonctionne l'interrupteur. Le porte-charge étant au bas de sa course, dans la soute, et l'écrou E à l'extrême gauche de la vis V, le soulier tirant sur les tringles que nous avons mentionnées fait tourner le levier L vers la gauche jusqu'à ce que la dent K', après avoir soulevé la dent M', l'ait dépassée ; le commutateur reste alors en prise. Le courant a été pendant ce mouvement lancé dans l'induit du moteur avec des résistances de plus en plus faibles intercalées et dans un sens tel que le porte-charge se met en marche pour la montée.

La vis V, en tournant, fait avancer graduellement l'écrou E vers la droite.

Les choses ont été ainsi réglées que, lorsque le porte-charge

est à bout de course en haut, l'écrou E vient appuyer sur une butée T', placée à l'extrémité du levier l' qui bascule, libérant ainsi la dent K' du levier L. Celui-ci reprend alors sa position verticale, sous l'influence de son contrepoids. Le moteur est ainsi arrêté instantanément. En même temps, le mouvement du levier l' verrouille le levier L au moyen d'un dispositif de sûreté non figuré ici, de manière à l'empêcher de reprendre une position inclinée sur la gauche, c'est-à-dire de manière à empêcher de lancer de nouveau dans le moteur un courant pour la montée, même dans le cas d'une fausse manœuvre.

Il est clair que les choses se passeront de la même manière pour la descente.

442. — Nous avons, dans la figure 92, représenté schématiquement les connexions entre la génératrice S, les électromoteurs du monte-charge et du pointage latéral, leurs commutateurs et rhéostats, pour une tourelle de 24 cm.

Voici la légende des principaux organes représentés :

IMC,	Induit	} du monte-charge.
EMC,	Inducteur	
CMC,	Commutateur	
R ₁ ,	Rhéostat de l'induit	
R ₂ ,	Rhéostat d'excitation	
R ₃ ,	Rhéostat de court-circuit	
IPL, I'PL,	Induits	} du pointage latéral.
EPL, E'PL,	Inducteurs	
C'PL,	Commutateur de tourelle	
CPL,	Commutateur-relais	
R,	Rhéostat d'induit	
I, I',	Interrupteurs automatiques	
CC,	Coupe-circuits.	
T,	Tube de la tourelle.	
PC,	Pont cuirassé.	
A,	Tableau de distribution.	

- — — — — Conducteurs de l'induit du monte-charge.
- Conducteurs d'excitation du monte-charge.
- — · — · — Conducteurs des inducts du pointage latéral.
- Conducteurs d'excitation du pointage latéral.
- Conducteurs des commutateurs du pointage latéral.

Les coupe-circuits CC placés sur le petit tableau de distribution A relié aux génératrices sont disposés sur les conducteurs positifs, comme sur les conducteurs négatifs. Comme ce sont des coupe-circuits à barrette mobile, ils peuvent en même temps servir d'interrupteurs ; mais les choses sont disposées de manière qu'on ne puisse jamais couper le circuit des inducteurs avant celui de l'induit, ni le fermer après.

Nous donnons enfin (*fig. 93*) une coupe verticale faite par l'axe de l'un des tubes de tourelle (celle de l'arrière). Les détails donnés précédemment et les lettres de la figure suffisent pour la faire comprendre.

443. Résultats du fonctionnement du pointage latéral et du monte-charge des tourelles de 24 cm.

— Les circuits d'excitation, tant des moteurs du pointage latéral que de celui du monte-charge, sont toujours reliés à des points présentant une différence de potentiel de 70 volts, quelle que soit la source électrique alimentant les moteurs.

Au contraire, l'ensemble des deux inducts en tension du pointage latéral et l'induit du monte-charge peuvent être soumis à une différence de potentiel de 140 volts ou de 70 volts, la première se rapportant à la marche normale et la seconde à une vitesse réduite (250).

Voici quels ont été les résultats obtenus aux essais :

444. POINTAGE LATÉRAL. — L'amplitude de la rotation étant de 270°, les arrêts étant d'ailleurs obtenus automati-

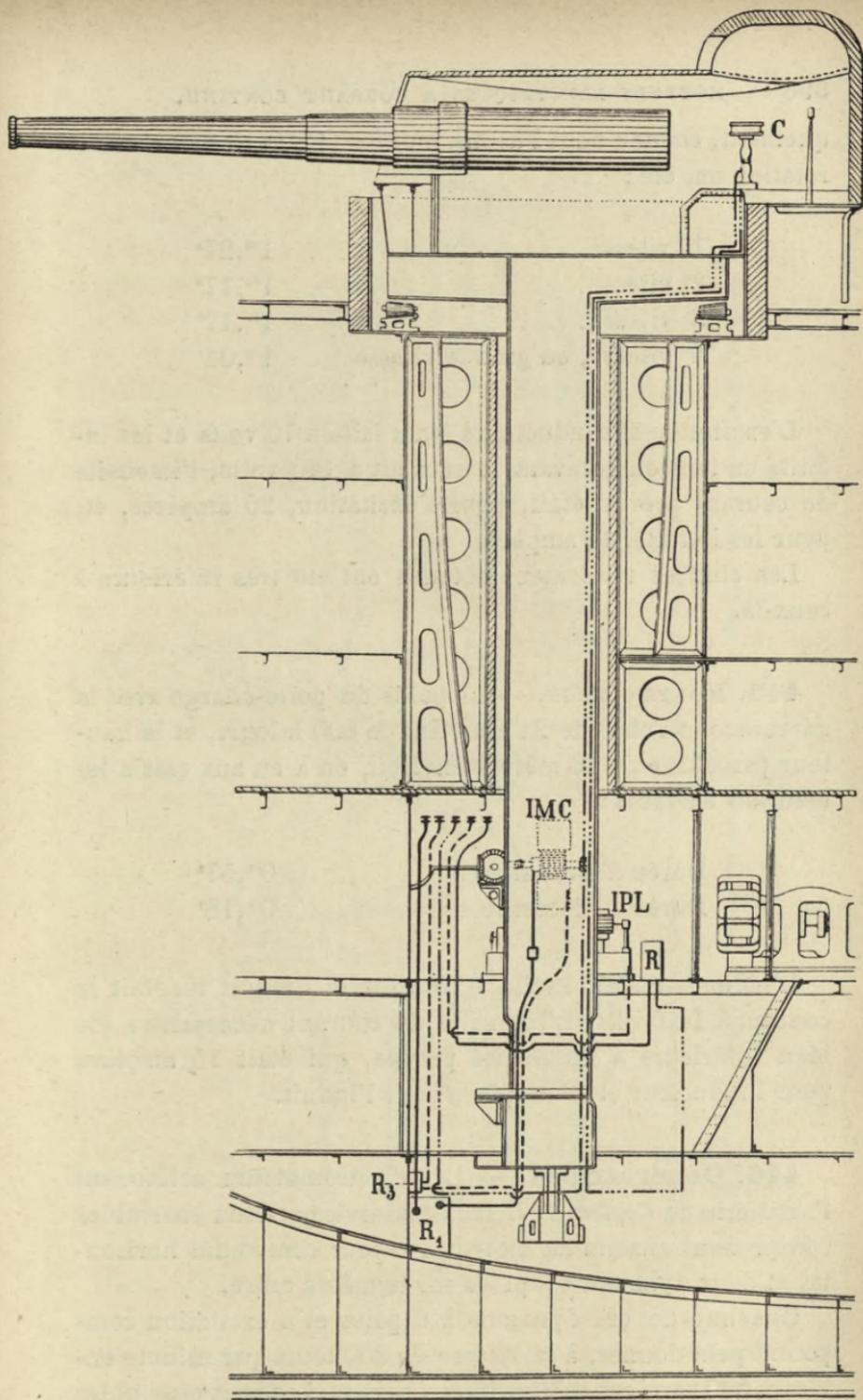


Fig. 93. — Croiseur chilien *Capitán Prat*. Coupe par l'axe de la tourelle de 24 cm arrière montrant les connexions générales pour le pointage latéral et le monte-charge électriques. Échelle $\frac{1}{100}$.

quement, comme nous l'avons indiqué (437), les durées de rotation ont été :

1 ^{re} vitesse.	1 ^m ,27 ^s
2 ^e vitesse.	1 ^m ,17 ^s
3 ^e vitesse.	1 ^m ,12 ^s
4 ^e vitesse, ou grande vitesse . .	1 ^m ,04 ^s

L'excitation des inducteurs étant faite à 70 volts et les induits en tension recevant le courant à 140 volts, l'intensité de courant prévue était, pour l'excitation, 25 ampères, et, pour les induits, 45 ampères.

Les chiffres réellement obtenus ont été très inférieurs à ceux-là.

445. MONTE-CHARGE. — Le poids du porte-charge avec la gargousse et l'obus de 24 cm étant de 800 kilogr., et la hauteur parcourue de 10 mètres environ, on a eu aux essais les résultats suivants :

Durée d'ascension	0 ^m ,57 ^s
Durée de descente	0 ^m ,18 ^s

L'inducteur était excité à 70 volts et l'induit recevait le courant à 140 volts. L'intensité de courant nécessaire a été bien inférieure à l'intensité prévue, qui était 15 ampères pour l'inducteur et 40 ampères pour l'induit.

446. Génératrices. — Les électromoteurs actionnant l'artillerie du *Capitan Prat* sont desservis par deux ensembles comprenant chacun un moteur à vapeur compound horizontal et deux dynamos couplées sur le même arbre.

Chacune de ces dynamos à 6 pôles et à excitation compound peut donner, à la vitesse de 300 tours par minute environ, 500 ampères et 70 volts aux bornes. Les deux ensembles

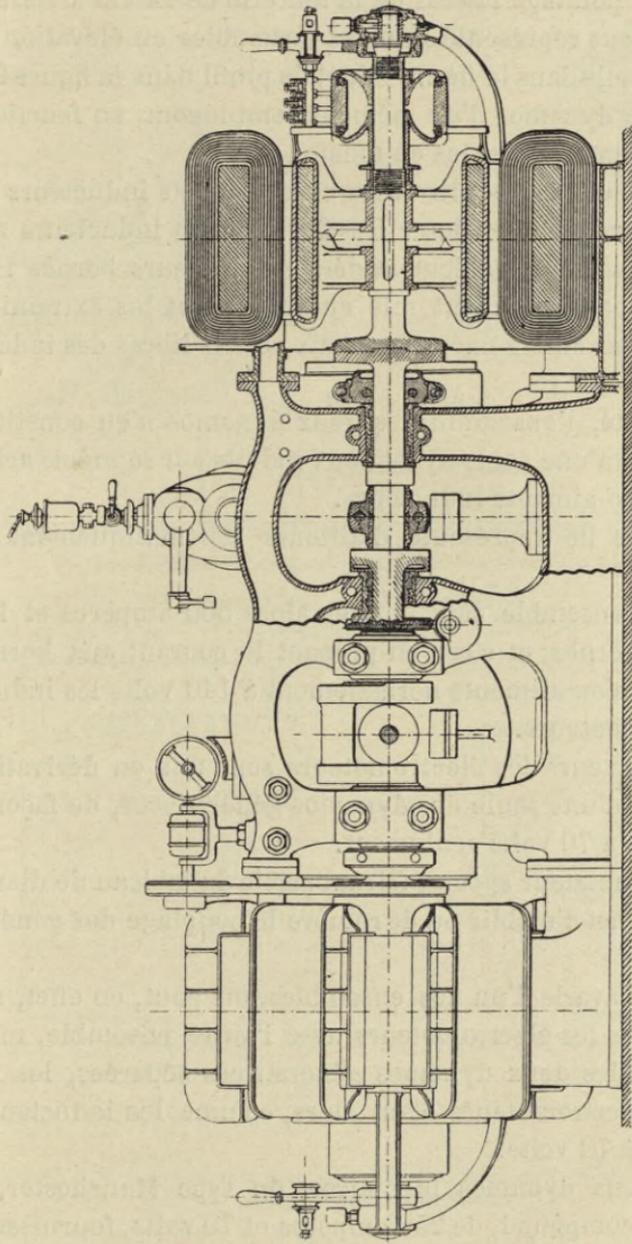


Fig. 94. — Croiseur *Capitan Prat*. Génératrices alimentant l'artillerie. Élévation et coupe partielle d'un ensemble.

Échelle $\frac{1}{25}$.

sont placés sur la plate-forme de cale, dans la chambre de manœuvre du pointage latéral de la tourelle de 24 cm arrière.

Nous avons représenté l'un des ensembles en élévation et coupe partielle dans la figure 94, et de profil dans la figure 95.

Les deux dynamos d'un même ensemble sont, en fonctionnement normal, associées en tension.

Dans ce but, les induits et les enroulements inducteurs en série sont mis en tension ; les fils fins des inducteurs des deux dynamos, préalablement détachés de leurs bornes respectives, sont également mis en tension et les extrémités libres de l'ensemble fixées aux deux bornes libres des induits réunis.

En réalité, l'ensemble des deux dynamos n'en constitue plus alors qu'une seule ayant deux induits sur le même arbre et 12 électro-aimants inducteurs.

La figure 96 représente d'ailleurs schématiquement ce couplage.

Chaque ensemble peut donner alors 500 ampères et 140 volts aux bornes, et c'est en prenant le courant aux bornes extrêmes qu'on alimente normalement à 140 volts les induits des électromoteurs.

Les inducteurs des électromoteurs sont mis en dérivation aux bornes d'une seule des dynamos génératrices, de façon à être excités à 70 volts seulement.

Un commutateur spécial faisant partie du tableau de distribution permet d'établir ou de rompre le couplage des génératrices.

En cas d'avarie d'un des ensembles, on peut, en effet, entretenir tous les électromoteurs avec l'autre ensemble, mais en laissant les deux dynamos génératrices séparées, les induits des électromoteurs étant alors, comme les inducteurs, alimentés à 70 volts.

Enfin deux dynamos bipolaires, du type Manchester, à excitation compound, de 250 ampères et 70 volts, fournissent en temps normal le courant nécessaire aux lampes à incandescence, aux arcs voltaïques et aux ventilateurs électriques.

Elles peuvent être également utilisées pour l'artillerie ;

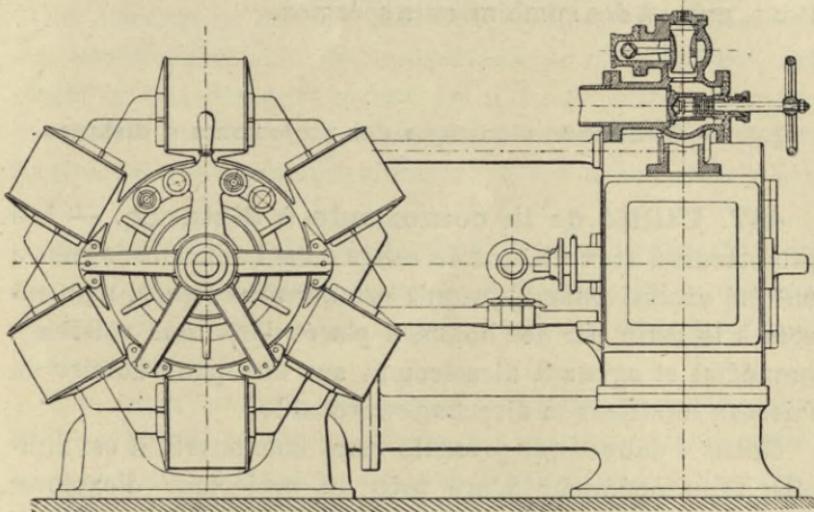


Fig. 95. — Croiseur *Capitan Prat*. Génératrices alimentant l'artillerie.

Profil d'un ensemble. Échelle $\frac{1}{25}$.

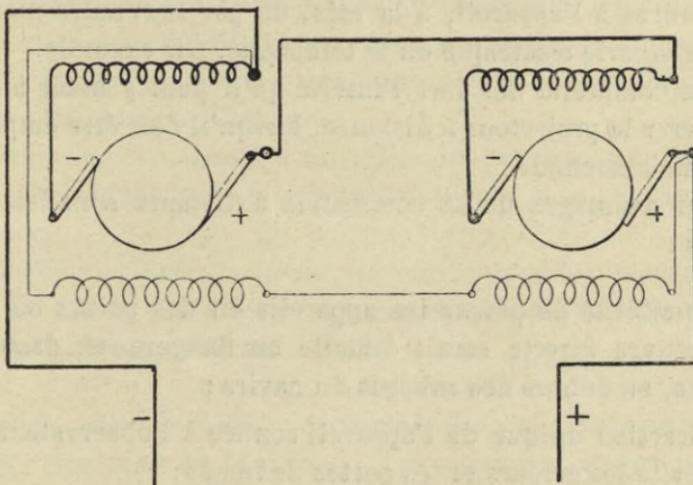


Fig. 96. — Croiseur *Capitan Prat*. Disposition schématique du couplage en tension des génératrices d'artillerie.

comme aussi les génératrices spéciales d'artillerie peuvent l'être pour l'éclairage.

Deux tableaux de distribution, un pour l'éclairage, l'autre pour l'artillerie, peuvent être, dans ce dessein, mis en relations, grâce à des combinateurs spéciaux.

§ 6. — Commande électrique des projecteurs à distance.

447. Utilité de la commande à distance. — Les projecteurs à arc voltaïque en usage dans la marine de guerre ont été exclusivement, jusqu'à ces derniers temps, manœuvrés à la main par des hommes placés dans leur voisinage immédiat et agissant directement sur eux pour donner au faisceau lumineux la direction convenable.

Outre le danger que présente cette manœuvre, il est difficile à un opérateur placé près du projecteur d'explorer lui-même du regard le champ à éclairer et d'imprimer au projecteur l'orientation désirée. Il faut alors qu'un second observateur, placé dans une position convenable, transmette ses ordres à l'appareil, à la voix, ou par tout autre moyen, une sonnerie électrique ou le téléphone, par exemple.

On comprend dès lors l'intérêt qu'il peut y avoir à manœuvrer le projecteur à distance, lorsqu'il doit être employé comme chercheur.

Les avantages de la commande à distance sont les suivants :

Possibilité de placer les appareils en des points où leur manœuvre directe serait difficile ou dangereuse, dans les hunes, en dehors des sabords du navire ;

Direction unique de l'appareil confiée à l'observateur, ce qui évite les erreurs et les pertes de temps ;

Liberté absolue de choisir les positions les plus favorables à l'observation ;

Réduction du personnel consacré au service des projecteurs.

448. Conditions à réaliser. — Tout d'abord, la lampe employée dans le projecteur doit être automatique.

Le mécanisme de direction du projecteur doit présenter une grande précision de mouvement. Il faut, en effet, déplacer un faisceau qui, comme celui du projecteur Mangin, présente souvent à peine 2 degrés de divergence et dont la section est alors peu considérable, même à une grande distance.

Pour la rapidité des recherches, il est indispensable que les déplacements horizontaux ou verticaux du projecteur, dans les deux sens, puissent être, à volonté, de faible amplitude ou très larges.

Une autre condition est que tout arrêt de l'appareil se produise instantanément dans toutes les positions, de manière à ne pas dépasser, avec le faisceau, le point que l'on cherche à mettre en pleine lumière.

Il faut, de plus, et c'est là une des conditions les plus importantes à remplir, une fois l'objet atteint par les rayons lumineux, que l'on puisse faire succéder aux déplacements d'assez grande amplitude, nécessaires pour la recherche, des déplacements angulaires très lents permettant de conserver l'objet dans le champ éclairé.

Enfin, la commande à la main doit pouvoir se substituer immédiatement, par un simple débrayage, à la commande à distance.

L'emploi d'électromoteurs est tout indiqué ici; nous allons décrire un de ces projecteurs commandés à distance, établi par MM. Sautter et Harlé.

449. Projecteur commandé à distance de MM. Sautter et Harlé. — Les appareils comprennent :

- 1° Le projecteur proprement dit avec son mécanisme moteur ;
- 2° Le poste de commande ;
- 3° Un câble à 6 conducteurs reliant le projecteur au poste de commande.

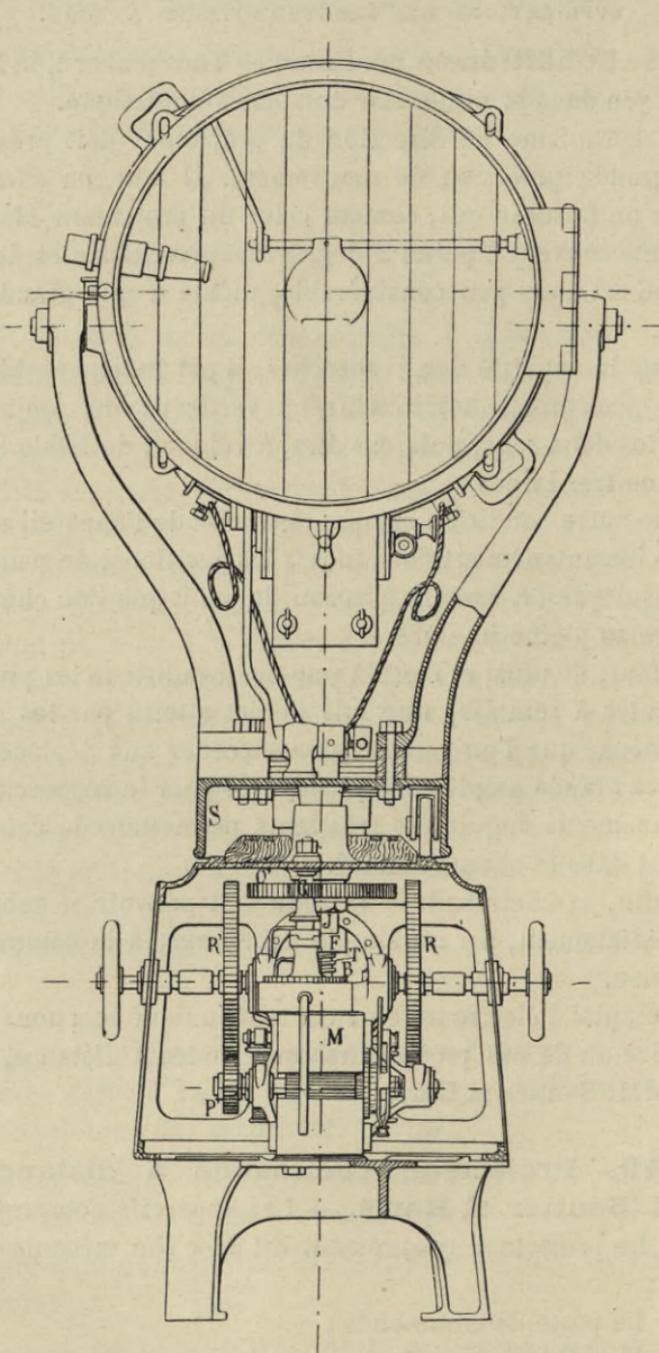


Fig. 97. — Projecteur commandé électriquement à distance, de MM. Sautter et Harlé.

Élévation.

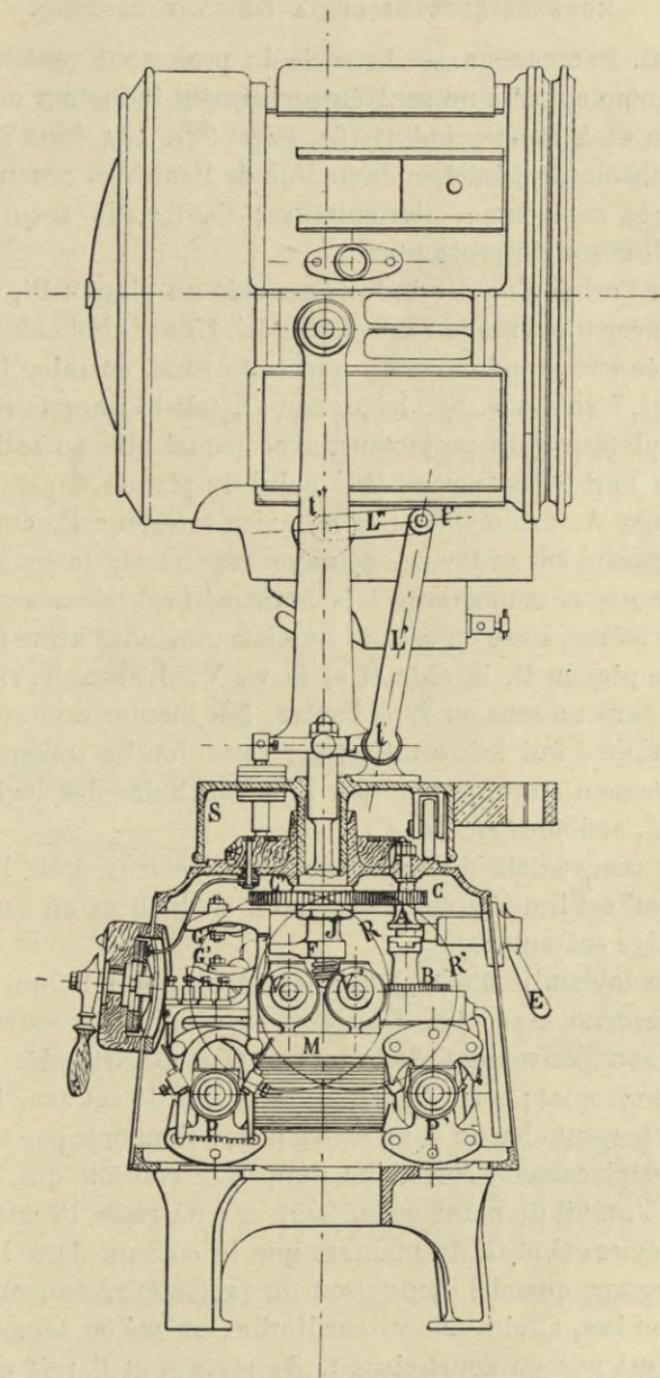


Fig. 98. — Projecteur commandé électriquement à distance, de MM. Sautter et Harlé.

Profil.

450. PROJECTEUR. — Le socle du projecteur renferme un électromoteur M à un seul électro-aimant inducteur en dérivation et à double induit (*fig. 97 et 98*). Les deux induits sont absolument indépendants l'un de l'autre et produisent : l'un, le mouvement d'orientation ; l'autre, le mouvement d'inclinaison du projecteur.

Sur l'arbre d'un des induits est calé un pignon P', engrenant avec une grande roue dentée R'. Une vis hélicoïdale V', montée sur le même arbre que cette roue, entraîne la roue B, qui, à son tour, par le pignon C, fait tourner la roue C' et le plateau S du projecteur, avec lequel elle est solidaire. Entre l'arbre de la roue B et celui du pignon C est un embrayage A, commandé par le levier extérieur E. On peut, en agissant sur ce levier, débrayer rapidement la commande électrique et manœuvrer à la main, s'il est nécessaire.

De même, l'axe du second induit commande l'arbre fileté T par le pignon P, la roue R et la vis V. L'arbre T, en tournant dans un sens ou dans l'autre, fait monter ou descendre la douille J qui lui sert d'écrou ; cette douille transmet son mouvement au projecteur par l'intermédiaire des leviers L, L', L'', articulés en *l, l', l''*.

Le mouvement d'inclinaison du projecteur dans le plan vertical est limité automatiquement en haut et en bas de la manière suivante :

Sur la douille filetée J est claveté un doigt F, qui monte ou descend avec elle. Ce doigt rencontre successivement, dans son mouvement, deux leviers G et G' articulés sur un axe horizontal ; il les fait basculer autour de cet axe. Les leviers portent chacun deux contacts qui viennent, par suite de leur déplacement, établir ou rompre le courant qui circule dans l'induit du pointage en hauteur ; on règle l'écartement des leviers G et G' de manière que le courant dans l'induit soit rompu quand l'inclinaison du projecteur, soit en haut, soit en bas, atteint une valeur limite ; en même temps, l'induit est mis en court-circuit, de sorte que l'arrêt est très brusque.

451. POSTE DE COMMANDE. — Le poste de commande se compose d'une caisse rectangulaire renfermant deux rhéostats R et R' et portant (fig. 99) un interrupteur d'arrêt ou de mise

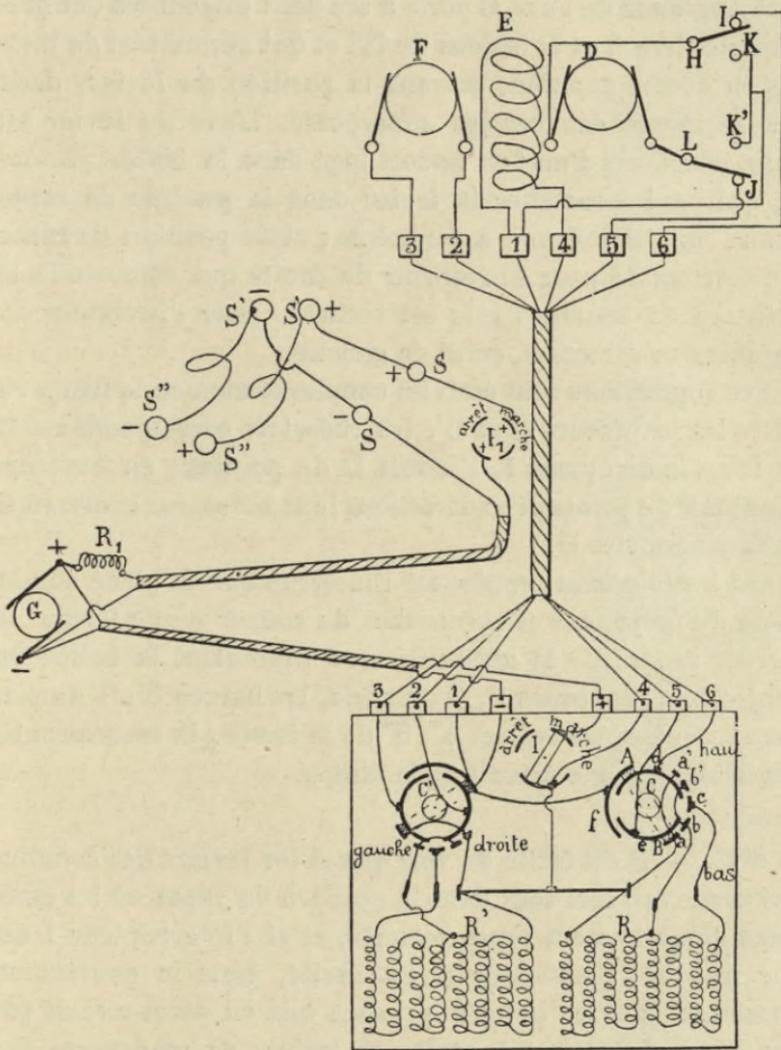


Fig. 99. — Commande électrique des projecteurs. Schéma des connexions.

en marche, ainsi que les commutateurs-inverseurs commandant le mouvement en direction et le mouvement en hauteur.

Un de ces inverseurs se compose de deux cercles en cuivre superposés et divisés en plusieurs segments f, a, b, c, b', a' et d, e . Sur le schéma, ces cercles ont été figurés concentriques ; en réalité, ils sont l'un au-dessus de l'autre. Un levier mobile autour de l'axe C porte à ses deux extrémités des pièces de cuivre A et B isolées de lui et qui permettent de mettre en communication, suivant la position du levier, deux des segments des cercles superposés. L'axe du levier est muni d'ailleurs d'un fort ressort logé dans la boîte-cylindre C, qui tend à ramener le levier dans la position de repos quand on l'abandonne à lui-même ; cette position de repos est horizontale pour l'inverseur de droite qui commande le pointage en hauteur ; elle est verticale pour l'inverseur du pointage en direction, celui de gauche.

Les connexions sont établies comme le montre la figure 99 entre les inverseurs C et C', les rhéostats correspondants R et R', l'interrupteur I, l'induit D du pointage en hauteur, l'induit F du pointage en direction, leur inducteur commun E et la génératrice G.

On a également représenté l'interrupteur I₁ placé sur le socle du projecteur et permettant de couper ou de fermer le circuit venant de la génératrice et alimentant la lampe du projecteur, les bornes S, S du socle, les bornes S', S' du plateau tournant, les bornes S'', S'' de la lampe, la résistance R₁ intercalée dans le circuit de la lampe.

452. — Il est facile de voir que si les leviers des commutateurs-inverseurs sont dans la position de repos où les amènent naturellement leurs ressorts, et si l'interrupteur I est sur marche, l'inducteur E est excité, mais le courant ne passe pas dans les induits qui sont mis en court-circuit par les pièces de contact A et B des leviers de manœuvre des inverseurs qui établissent alors une communication entre les secteurs d et e . Le courant venant de la source passe alors dans les rhéostats R et R' en dérivation et retourne à la génératrice en passant par le segment c de chaque

inverseur, la pièce A, les segments *d* et *e*, la pièce B, le segment *f*.

Si, au contraire, on vient à tourner l'un des leviers, on voit que le courant passe dans l'induit dans un sens ou dans l'autre, avec interposition d'une portion du rhéostat d'autant plus faible que le levier est écarté davantage de sa position de repos. Dans la position indiquée sur la figure, le courant passe dans chaque induit, sans qu'aucune résistance soit interposée; les mouvements du projecteur se produisent alors avec leur vitesse maximum.

453. — Pour produire de faibles mouvements angulaires, il suffit de donner au levier de l'inverseur des secousses légères et répétées, de manière que la pièce de contact B touche les segments *c*, *e* ou *c*, *d*, suivant le sens du déplacement à provoquer.

454. — Nous pouvons montrer sur la figure 99 d'une façon plus explicite que nous ne l'avons fait jusqu'à présent, comment est limité automatiquement le mouvement d'inclinaison du projecteur vers le haut ou vers le bas (30° en dessous et 20° au-dessus de l'horizontale au maximum).

Nous avons dit que le doigt F (*fig. 98*), en montant ou en descendant, venait rencontrer les leviers G ou G' qui basculent alors autour d'un axe horizontal; ces leviers, qu'un ressort maintient d'ailleurs en temps ordinaire dans leur position normale, portent deux contacts fixés à un même bloc rigide, mais isolés l'un de l'autre. Dans la figure 99, on a représenté en I et K les contacts portés par le levier G, par J et K' les contacts du levier G', et leurs connexions avec le reste des organes.

D'autre part, des étriers H et L reliés aux balais du moteur commandant le pointage en hauteur appuient dans la position normale des leviers G et G' sur les contacts I et J et permettent ainsi le passage du courant dans l'induit. Les étriers à ressort sont combinés de manière à basculer dans un

sens ou dans l'autre dès qu'ils dépassent la position horizontale. Ceci posé, supposons que le moteur tourne dans un sens tel qu'il fasse descendre le doigt F. Arrivé en un certain point de sa course correspondant à l'inclinaison maximum du projecteur, ce doigt appuie sur le levier G', le fait basculer et fait aussi monter le bloc portant les contacts J et K'. L'étrier L, entraîné par le contact J, s'élève et, aussitôt qu'il est horizontal, il quitte brusquement le contact J pour venir frapper le contact K'. Ainsi qu'on peut le vérifier, le courant est alors rompu dans l'induit du moteur qui, en même temps, est mis en court-circuit.

Si alors on tourne le levier de l'inverseur C de manière qu'il occupe une position perpendiculaire à celle figurée, le court-circuit de l'induit est rompu et il est parcouru par un courant inverse ; il tourne alors en sens inverse de son mouvement primitif, le doigt F remonte et libère le levier G', qui reprend sa position normale.

454 bis. Projecteur commandé à distance de la maison Bréguet. — Les appareils comprennent :

1° Le *projecteur proprement dit*, à miroir parabolique, avec le mécanisme moteur des mouvements d'orientation et d'inclinaison ;

2° Le *manipulateur à distance* ;

3° Un câble à 7 conducteurs reliant le projecteur au manipulateur à distance.

PROJECTEUR. — Le mécanisme de la commande à distance est presque entièrement renfermé dans le socle du projecteur. Il est représenté par les figures 100 et 101. Il comprend, pour l'orientation, un électromoteur *m'* dont l'arbre porte une vis tangente actionnant une roue hélicoïdale, pourvue d'un pignon Galle, relié par une chaîne Galle à un pignon fixé sur l'arbre *u'*. Une vis tangente, montée sur cet arbre *u'*, engrène avec une roue hélicoïdale *i* solidaire du moyeu du plateau mobile *o*. L'inducteur de l'électromoteur

m' étant excité en permanence par une dérivation constante prise sur la source, il suffit donc de lancer dans l'induit un courant dans un sens ou dans l'autre pour faire tourner le plateau mobile o vers la droite, ou vers la gauche. Le volant V' permet la manœuvre à la main. On peut débrayer l'axe u' pour manœuvrer rapidement à la main.

Le mouvement d'inclinaison est donné par un électromoteur a' , dont l'arbre agit, par l'intermédiaire d'une chaîne Galle sur l'axe u . Une vis tangente montée sur cet axe engrène avec la roue s formant écrou pour la tige filetée r . L'électromoteur étant encore excité en dérivation, il suffit de lancer dans son induit un courant, dans un sens ou dans l'autre, pour faire monter ou descendre la tige r et, par l'intermédiaire des leviers v , y , z , incliner le tambour du projecteur vers le haut ou vers le bas. Le volant V permet de manœuvrer à la main. On peut débrayer l'axe u pour manœuvrer rapidement à la main.

L'inclinaison du projecteur est limitée dans les deux sens par un interrupteur automatique de fin de course. A cet effet, la tige r agit aux extrémités de sa course, par les collets l et l' , sur un levier coudé g' , maintenu dans une de ses positions extrêmes par le ressort h' .

On voit que le petit bras du levier g' soulève à chacune des extrémités de la course de la tige r l'un des contacts d et d' , interrompant par ce fait le courant dans l'induit du moteur d'inclinaison, mais permettant encore la mise en marche de cet électromoteur dans le sens opposé à celui qui vient d'être interrompu automatiquement. Les deux leviers à contact d et d' sont reliés mécaniquement par un ressort isolé n .

MANIPULATEUR A DISTANCE. — Les mouvements d'orientation et d'inclinaison sont obtenus par des mécanismes identiques occupant chacun une moitié de l'appareil. A droite, se trouve le mécanisme réservé à l'orientation ; à gauche, le mécanisme de l'inclinaison. Deux rhéostats indépendants, l'un servant pour les mouvements d'orientation, l'autre pour

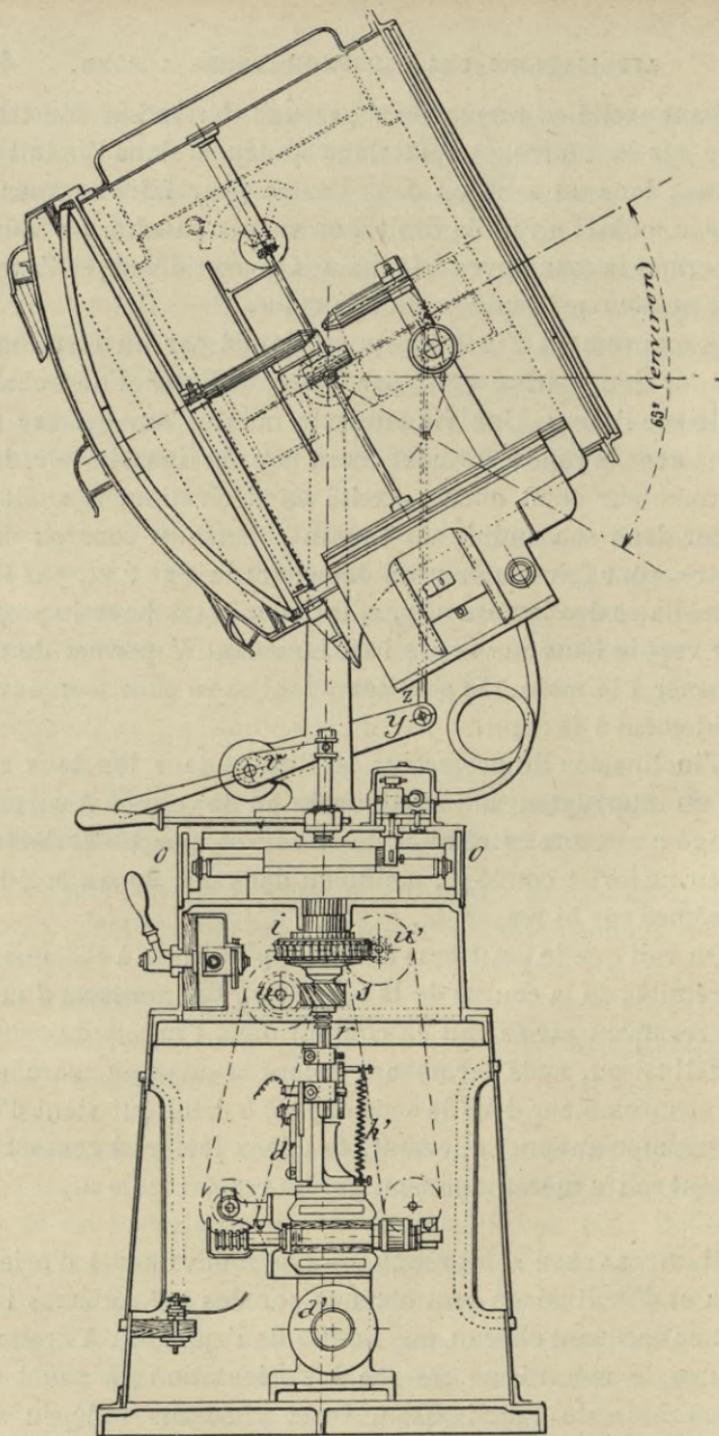


Fig. 100. — Projecteur à commande électrique, système Bréguet. Profil.

Échelle $\frac{1}{10}$

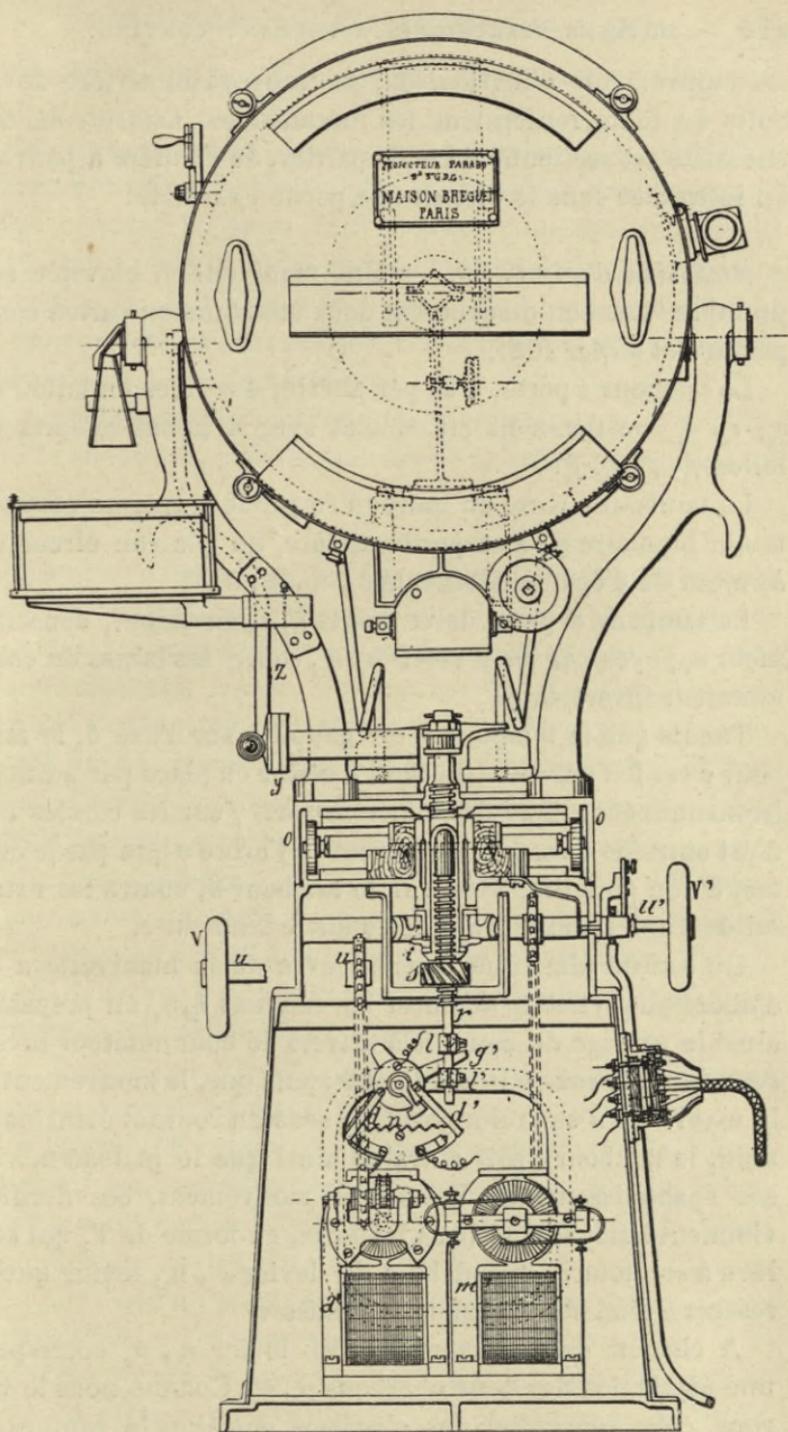


Fig. 101. — Projecteur à commande électrique, système Bréguet. Vue de face.

Échelle $\frac{1}{10}$.

les mouvements d'inclinaison, se trouvent en arrière de la boîte en fonte renfermant les mécanismes. Chacun de ces rhéostats est sectionné en trois parties, de manière à pouvoir en intercaler dans le circuit une portion variable.

Mécanisme d'orientation. — Une manivelle a , clavetée sur un arbre b , met en mouvement deux tambours en carton comprimé c et d (fig. 102).

Le tambour c porte, à sa périphérie, 4 cercles en laiton e_1, e_2, e_3, e_4 constamment en contact avec 4 lames-ressorts en laiton f_1, f_2, f_3, f_4 .

Le tambour c porte en outre, à sa partie avant, un commutateur bipolaire g ; à sa partie arrière, un plateau circulaire h , muni de 4 épanouissements h_1, h_2, h_3, h_4 .

Le tambour d porte deux doigts i_1, i_2 en laiton, constamment appuyés par les ressorts k_1, k_2 , contre les lames du commutateur inverseur g .

Tandis que le tambour d est goupillé sur l'axe b , le tambour c est fou sur cet axe, tend à rester en place par suite du frottement énergique des lames-ressorts f sur les cercles e et n'est entraîné dans le mouvement de l'arbre b que par le contact d'une goupille, fixée sur le tambour d , contre les extrémités d'une rainure pratiquée dans le tambour c .

On conçoit ainsi que la manœuvre de la manivelle a ait d'abord pour effet de déplacer les contacts i_1, i_2 en préparant ainsi le passage du courant à travers le commutateur inverseur dans un sens ou dans l'autre; puis que, le mouvement de la manivelle a se prolongeant, le sens du courant étant maintenu, le tambour c soit entraîné ainsi que le plateau h , avec ses épanouissements. Dans leur mouvement, ces derniers viennent buter sur un petit levier m , en forme de T, qui soulève à son tour le grand bras du levier n_1, n_2 , levier que le ressort o tend constamment à rabaisser.

A chacun des mouvements du levier n_1, n_2 correspond une séparation des deux charbons p_1, p_2 . Comme nous le verrons, cette séparation des charbons entraîne la rupture du

court-circuit entre les balais de l'électromoteur d'orientation.

En outre, le même soulèvement du levier n_1, n_2 , établit un contact entre les charbons q_1, q_2 , qui restent électriquement reliés pendant le temps d'un passage d'un épanouissement du plateau h sous le levier m . Nous verrons plus tard que ce contact q_1, q_2 , fait passer le courant électrique dans l'induit du moteur dans le sens préparé par le premier mouvement de la manivelle a sur l'inverseur g .

Le mécanisme d'orientation est complété par un commutateur de rhéostat r , placé au-dessus de la caisse renfermant les appareils.

Mécanisme d'inclinaison. — On retrouve les mêmes organes que pour le mécanisme d'orientation. Cependant, il existe sur le tambour en carton c' 5 cercles de laiton au lieu de 4, avec 5 lames-ressorts, frottant sur ces cercles. Le dédoublement d'un des cercles tient à la présence de l'interrupteur automatique à fin de course nécessaire pour le mouvement d'inclinaison. En effet, tandis que, pour l'orientation, les deux balais de l'électromoteur correspondant sont mis en relation par des fils avec les frotteurs f_3, f_4 , pour l'inclinaison, l'un des balais est mis en relation avec f'_5 et l'autre balai est mis en relation avec les contacts d, d' de l'interrupteur automatique, chacun des charbons sur lesquels ces contacts peuvent venir appuyer étant lui-même relié à des frotteurs f'_3, f'_4 .

Le mécanisme d'inclinaison est aussi complété par un commutateur de rhéostat r' placé à la partie supérieure.

La figure 103 contient une vue extérieure de la caisse, contenant les appareils manipulateurs. On y voit les manivelles a et a' commandant les deux mouvements, les deux commutateurs de rhéostat r et r' . En outre, deux aiguilles ou index t et t' ont un petit déplacement angulaire, dans un sens ou dans l'autre. Ce mouvement est lié par l'axe s (fig. 102) à celui que prend le levier m sous l'action des épanouissements du plateau h . L'inclinaison de ce levier m est diffé-

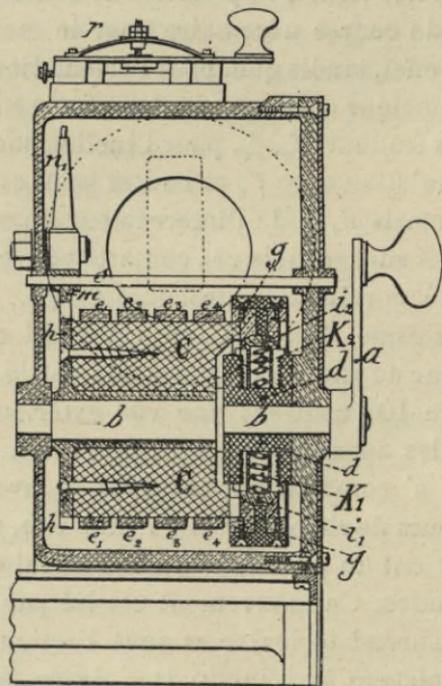
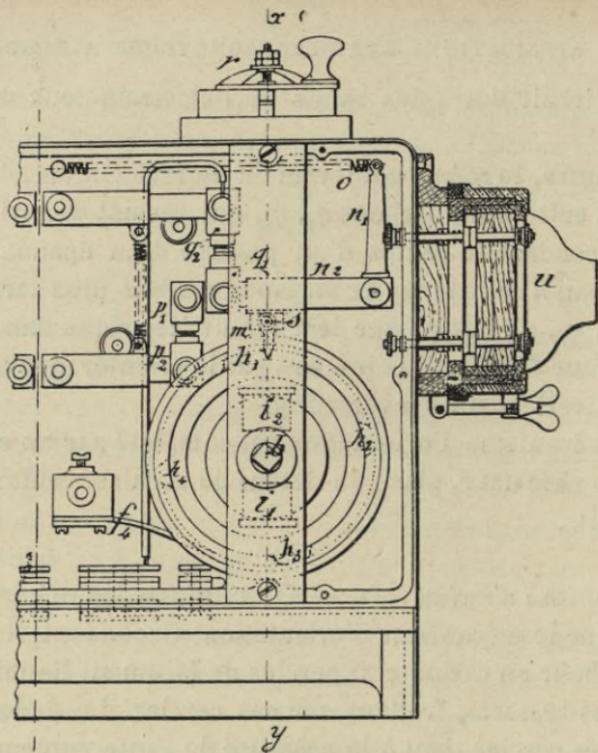


Fig. 102. — Commande électrique d'un projecteur, système Bréguet. Manipulateur.

Élévation et coupe verticale. Échelle $\frac{1}{4}$.

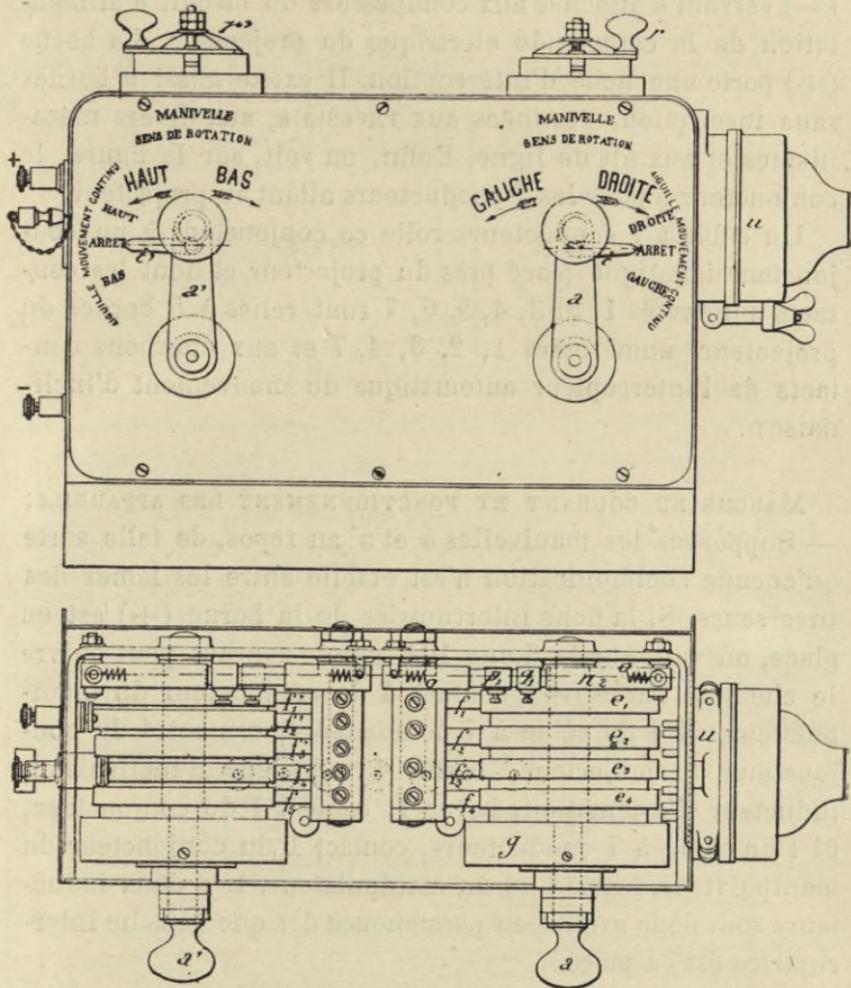


Fig. 103. — Commande électrique d'un projecteur système Bréguet. Manipulateur.

Vue extérieure et plan. Échelle $\frac{1}{5}$.

rente, suivant le sens de la rotation de la manivelle a et elle est indiquée par l'index l .

Sur la caisse, on aperçoit deux bornes marquées (+) et (-) servant d'attaches aux conducteurs du circuit d'alimentation de la commande électrique du projecteur. La borne (+) porte une fiche d'interruption. Il existe aussi 9 bornes sans inscription, destinées aux rhéostats, aux divers mécanismes et aux fils de ligne. Enfin, on voit, sur la figure, le conjoncteur u pour les 7 conducteurs allant au projecteur.

Un câble à 7 conducteurs relie ce conjoncteur à un conjoncteur identique placé près du projecteur et dont les contacts numérotés 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 sont reliés à 5 bornes du projecteur, numérotées 1, 2, 3, 4, 7 et aux charbons contacts de l'interrupteur automatique du mouvement d'inclinaison.

MARCHE DU COURANT ET FONCTIONNEMENT DES APPAREILS.

— Supposons les manivelles a et a' au repos, de telle sorte qu'aucune communication n'est établie entre les lames des inverseurs. Si la fiche interruptrice de la borne (+) est en place, on voit, sur la figure 104, que le courant peut suivre le chemin : borne (+), contact 4 du conjoncteur du manipulateur, fil 4 du câble à 7 conducteurs, contact 4 du conjoncteur du projecteur, borne 4 inducteur d'inclinaison, inducteur d'orientation, borne 1, contact 1 du conjoncteur, fil 1 du câble à 7 conducteurs, contact 1 du conjoncteur du manipulateur, borne (-) du manipulateur. Les deux inducteurs sont donc excités en permanence dès que la fiche interruptrice est en place.

De plus, le courant peut suivre le chemin : borne (+), borne du milieu sans désignation du socle du manipulateur, les deux rhéostats, bornes deuxième et sixième, sans désignation du socle, charbons supérieurs q_1 et q'_1 , charbons en contact p_1, p_2 d'une part, p'_1, p'_2 d'autre part, ressorts f_1 et f'_1 , borne (-).

Le courant se divise donc en deux parties, dont l'une tra-

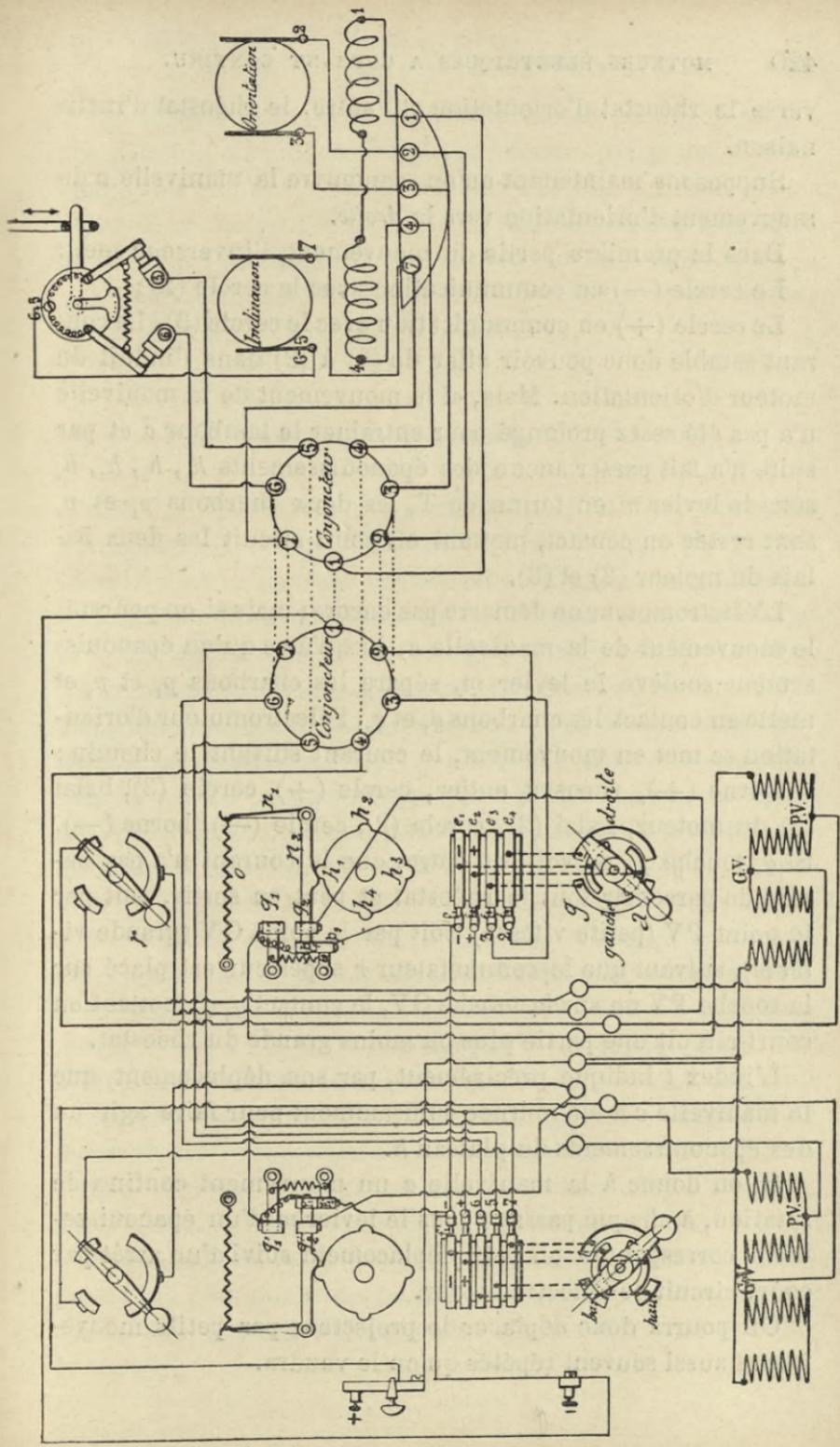


Fig. 104. — Commande électrique d'un projecteur, système Bréguet. Schéma des connexions.

verse le rhéostat d'orientation et l'autre, le rhéostat d'inclinaison.

Supposons maintenant qu'on manœuvre la manivelle a du mouvement d'orientation vers la *droite*.

Dans la première partie du mouvement, l'inverseur met :

Le cercle (—) en communication avec le cercle (2) ;

Le cercle (+) en communication avec le cercle (3). Le courant semble donc pouvoir aller de (3) à (2) dans l'induit du moteur d'orientation. Mais, si le mouvement de la manivelle n'a pas été assez prolongé pour entraîner le tambour c et par suite n'a fait passer aucun des épanouissements h_1, h_2, h_3, h_4 sous le levier m en forme de T, les deux charbons p_1 et p_2 sont restés en contact, mettant en court-circuit les deux balais du moteur (2) et (3).

L'électromoteur ne démarre pas encore ; mais si on poursuit le mouvement de la manivelle a , jusqu'à ce qu'un épanouissement soulève le levier m , sépare les charbons p_1 et p_2 et mette en contact les charbons q_1 et q_2 , l'électromoteur d'orientation se met en mouvement, le courant suivant le chemin :

Borne (+), rhéostat entier, cercle (+), cercle (3), balai (3) du moteur, balai (2), cercle (2), cercle (—), borne (—). Si q_1 touche q_2 , on voit, en outre, que le courant n'a pas besoin de parcourir tout le rhéostat et peut en sortir, soit par le point PV (petite vitesse), soit par le point GV (grande vitesse), suivant que le commutateur r supérieur est placé sur la touche PV ou sur la touche GV, le contact $q_1 q_2$ mettant en court-circuit une partie plus ou moins grande du rhéostat.

L'index t indique précisément, par son déplacement, que la manivelle a a été tournée suffisamment pour faire agir un des épanouissements du plateau h .

Si on donne à la manivelle a un mouvement continu de rotation, à chaque passage sous le levier m d'un épanouissement correspondra un petit déplacement suivi d'un arrêt par court-circuit de l'électromoteur.

On pourra donc déplacer le projecteur par petits mouvements aussi souvent répétés qu'on le voudra.

Le déplacement de la manivelle sur la gauche produira l'orientation du projecteur vers la gauche, par petits mouvements successifs, si on donne à la manivelle un mouvement de rotation continu, si on laisse la manivelle immobile après que l'index *t* indiquera le mouvement sur la gauche.

Les mouvements d'inclinaison du projecteur se produisent et s'expliquent comme ceux d'orientation.

§ 7. — Commande électrique du gouvernail.

454 ter. Conditions générales que doit remplir un appareil à gouverner. — Presque tous les navires nouvellement construits ont été munis d'une commande électrique du gouvernail, pouvant fonctionner concurremment avec une commande mécanique. Sur quelques navires même, toute commande mécanique a été supprimée et la commande électrique est le seul moyen d'action qu'on ait sur le gouvernail. Il ne s'agit encore là cependant que d'une simple commande, par le courant électrique, du servomoteur à vapeur qui reste l'organe mécanique réellement actif de la manœuvre du gouvernail. Mais on ne tardera guère à essayer la manœuvre complète du gouvernail au moyen d'électromoteurs.

La question est donc toute d'actualité et nous pensons qu'il est intéressant d'exposer ici les conditions générales que doit remplir un appareil à gouverner. Rien ne préparera mieux le lecteur à juger des mérites comparatifs des divers systèmes de commande électrique, qui sont en service ou qui pourront y être mis, comme aussi des appareils complets de manœuvre électrique qui seront bientôt sans doute essayés.

Tout d'abord, il importe essentiellement de distinguer, dans la manœuvre du gouvernail, deux cas :

1° Il s'agit de faire exécuter au navire des mouvements précis lui permettant de franchir un obstacle, de venir occuper une position déterminée, d'accomplir une certaine évolution ;

2° Il s'agit de la navigation courante, d'une route, sans obstacles, à suivre pendant un temps assez long.

1^{er} CAS. — Dans le premier cas, trois opérations sont à exécuter :

Apprécier l'angle dont on doit faire venir le bâtiment à droite ou à gauche ;

Apprécier la position qu'il faut donner au gouvernail pour obtenir le résultat précédent ;

Donner cette position au gouvernail.

Dans toutes les manœuvres un peu difficiles, l'officier de quart se charge des deux premières opérations, et donne l'ordre précis de placer la barre dans telle ou telle position. L'homme de barre manœuvre alors la barre à la main ou l'appareil de commande de cette barre, jusqu'à ce que l'aiguille d'un *indicateur ou répétiteur des angles de barre*, ou d'un *axiomètre*, lui montre que la position prescrite est atteinte.

Le premier ordre de l'officier de quart est, le plus souvent, suivi d'un second, d'un troisième, etc., pour peu que la manœuvre soit délicate. En outre que la manœuvre exigera le plus souvent plusieurs directions différentes, successivement données au navire, chacune de ces directions n'est pas, la plupart du temps, obtenue du premier coup par l'exécution d'un ordre isolé. Comme nous l'avons dit, cet ordre a été donné par l'officier de quart comme résultat d'*appréciations*, pour lesquelles il doit tenir compte d'une foule de circonstances : vitesse du navire, état de la mer, vent, facilité d'évolution du navire, etc., dont l'effet n'est pas toujours connu avec certitude. Le premier ordre donné et exécuté, l'officier de quart devra souvent le corriger par un autre, en se guidant, dans sa nouvelle appréciation, sur l'effet constaté de cette première manœuvre du gouvernail. Quelquefois même, l'ordre correcteur n'attendra pas l'exécution complète du premier ordre. Après avoir commandé 15° à droite, par exemple, l'officier, appréciant mieux la manœuvre à exécuter

ou jugeant suffisante l'*impulsion* donnée à la rotation de l'axe du navire, par un commencement d'exécution de l'ordre, pourra très bien commander 10° à droite, avant que l'angle de barre ait atteint les 15° du premier ordre.

Pour manœuvrer un gouvernail dans ces conditions, la plupart des appareils mécaniques ou électriques donnent les mêmes résultats satisfaisants. On ne leur demande que de permettre de donner au gouvernail un angle *approximativement* connu, avec la faculté d'arrêter ce gouvernail et même de le faire rétrograder avant que cet angle soit atteint.

Les appareils électriques actuellement en usage donnent pour l'exécution des ordres ainsi donnés une précision plus grande que les appareils mécaniques à main ou à vapeur en service. Mais cette précision n'est aucunement nécessaire. La plupart des axiomètres en service avec les barres à vapeur marquent 20° , par exemple, lorsque la barre est à 15° , par suite du jeu dans les transmissions mécaniques du mouvement de la barre à l'axiomètre. Bien qu'il soit aisé de rétablir l'accord, on ne s'en préoccupe pas le plus souvent, parce que c'est inutile. Il faut seulement, mais cela a une très grande importance, que l'axiomètre ou l'indicateur d'angles de barre marque zéro, lorsque la barre est au zéro. Ensuite, il suffit que l'indicateur d'angles de barre donne des indications *de même sens* que les mouvements angulaires du gouvernail et grossièrement proportionnelles à ces mouvements.

Lorsque l'officier a commandé 10° à droite, par exemple, c'est pour préciser son ordre et non pas parce qu'il jugeait du premier coup cet angle *exactement nécessaire* pour l'exécution de la manœuvre. A ce premier ordre, il apportera des corrections, avons-nous dit, et peu importe dès lors que le gouvernail soit mis tout d'abord à 10° exactement, plutôt qu'à 8° ou 12° .

Une condition toutefois que l'indicateur d'angles de barre doit nécessairement remplir avec exactitude, c'est d'indiquer le moment où la barre va arriver à bout de course dans un

sens ou dans l'autre. Il est encore préférable, et cela est toujours très aisément réalisé avec les dispositifs électriques, que le mouvement du gouvernail s'arrête automatiquement à bout de course.

2^e CAS. — Dans le second cas, celui de la navigation courante, qui est le plus général, l'officier indique le cap ou l'alignement à suivre. L'homme de barre doit alors garder les yeux fixés sur le compas ou sur un point à terre et manœuvrer sa barre à droite ou à gauche, de manière à empêcher le navire de s'écarter de la route, ou à l'y ramener, sans avoir à se préoccuper le moins du monde de la *valeur exacte* des angles qu'il donne au gouvernail, *d'une manière presque continue*.

Avec une barre à bras, ou un servomoteur à vapeur, comme celui universellement en usage, l'homme de barre sait toujours, *sans avoir besoin de regarder* ni le manipulateur sur lequel il agit, ni l'axiomètre indicateur de l'angle de barre, dans quel sens le gouvernail s'est écarté du zéro, et s'il s'en est écarté peu ou beaucoup, parce que la position du gouvernail est reliée à celle du manipulateur ; cela lui suffit.

Avec les appareils de commande électrique les plus employés, l'homme de barre doit suivre des yeux l'indicateur de barre, en même temps que le compas. Il y a là une grande difficulté opératoire qu'on ne peut vaincre que par un apprentissage assez long, et qui malgré tout empêche de suivre une direction fixe avec la précision nécessaire à la navigation courante.

Alors que le premier cas que nous avons considéré n'exige qu'une commande quelconque avec un indicateur d'angles de barre, le second cas entraîne presque fatalement la liaison du manipulateur et du gouvernail, c'est-à-dire l'emploi d'une *commande asservie*.

Mais le servomoteur à employer n'aura pas besoin d'une grande précision et il est parfaitement inutile de chercher à

réaliser une coïncidence absolue entre les mouvements du gouvernail et ceux du manipulateur. Nous avons dit plus haut qu'on pouvait se contenter d'une concordance de sens et d'une grossière proportionnalité. Dans ces conditions, il est possible d'éviter la trop grande complication et de construire des appareils électriques aussi robustes et d'un fonctionnement au moins aussi sûr que celui des servomoteurs à vapeur actuellement en usage.

454 quater. Commande électrique de la barre, système Marit. — Cet appareil, construit par *MM. Sautter et Harlé*, est actuellement en usage sur un grand nombre de navires. C'est une commande *non asservie*. L'ensemble comprend :

1° Un *électromoteur* agissant, par l'intermédiaire d'une transmission mécanique quelconque, sur le volant de manœuvre du servomoteur à vapeur et simultanément sur un *commutateur*, ayant pour but d'indiquer la position de la barre, en envoyant le courant à des lampes numérotées d'une façon déterminée et remplissant au poste de manœuvre le rôle d'*indicateur d'angles de barre* ;

2° Un ou plusieurs *appareils de manœuvre* permettant la commande à distance de l'électromoteur et contenant d'une façon visible les lampes indicatrices des angles de barre ;

3° Un *commutateur asservi* à l'électromoteur et au servomoteur à vapeur, devant produire, à l'aide d'un rhéostat, le ralentissement et, s'il y a lieu, l'arrêt de l'électromoteur, si celui-ci devance trop le servomoteur à vapeur ;

4° Un *régulateur limiteur de vitesse* ;

5° Un *timbre* placé au poste de manœuvre et indiquant le passage de la barre sur chaque degré, par un coup unique ;

6° Un *câble* à plusieurs conducteurs reliant l'appareil de manœuvre à l'électromoteur et au commutateur des lampes.

L'électromoteur, le commutateur des lampes, le commutateur asservi et le rhéostat qu'il commande, le régulateur li-

miteur de vitesse et son rhéostat forment un ensemble, le *récepteur*.

Le commutateur de manœuvre et son rhéostat, les lampes indicatrices des angles de barre et la sonnerie d'avertissement forment un second ensemble, le *manipulateur*.

1° MANIPULATEUR. — La figure 105 représente la vue extérieure du manipulateur. On y voit au-dessus les couvercles des 17 cases renfermant les lampes à incandescence constituant l'indicateur des angles de barre. Ces couvercles en verre dépoli portent des chiffres qui représentent les angles de barre à droite ou à gauche quand les lampes correspondantes sont allumées. Lorsque la lampe marquée 10 à droite est allumée, c'est que le gouvernail est à 10° à droite. Si les lampes 10 et 15 sont allumées en même temps, c'est que le gouvernail est dans une position intermédiaire entre 10° et 15°, soit 12° par exemple.

La figure montre aussi le levier L de manœuvre du commutateur de manœuvre mobile autour de O et permettant de mettre en marche l'électromoteur et de lui donner différentes vitesses, grâce à l'introduction dans le circuit d'une fraction variable d'un rhéostat logé dans la caisse du manipulateur, mais non représenté ici. Le levier L porte un index I qui se meut sur la circulaire C sur laquelle sont inscrites les indications utiles pour la manœuvre. On tient le levier par la poignée M. Des pistons mobiles dans des cylindres à glycérine P sont destinés à empêcher une manœuvre trop brusque. A cet effet, les bras B du levier viennent, après un certain déplacement, appuyer sur les pistons à glycérine. On peut ainsi mettre rapidement le moteur en marche à *petite vitesse*; mais pour aller jusqu'à la *grande vitesse*, on est obligé de développer un effort assez considérable.

Le commutateur de manœuvre a lui-même une forme particulière et que nous étudierons plus loin. Des ressorts intérieurs ramènent automatiquement le levier de manœuvré dans la position zéro, lorsqu'on cesse d'appuyer sur la poignée.

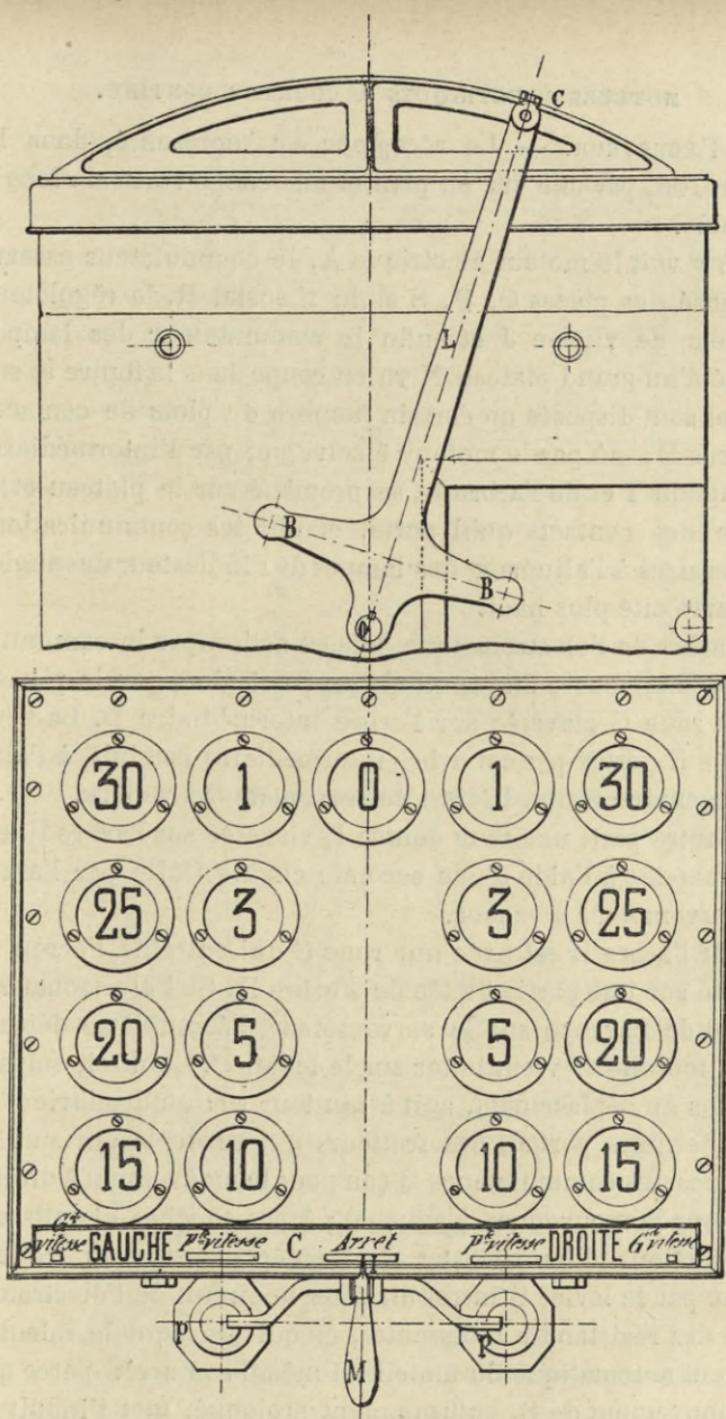


Fig. 105. — Commande électrique de la barre, système Marit. Manipulateur. Vue extérieure

en élévation et plan. Échelle $\frac{1}{6}$.

2° RÉCEPTEUR. — Le récepteur est représenté, dans la figure 106, par une vue en plan et une coupe verticale longitudinale.

On y voit le moteur électrique A, le commutateur asservi composé des pièces Q, P, S et du rhéostat R, le régulateur limiteur de vitesse J et enfin le commutateur des lampes formé d'un grand plateau N vu en coupe dans la figure et sur lequel sont disposés un certain nombre de plots de contact ; un bras M, mû par le moteur électrique, par l'intermédiaire du pignon T et de l'arbre L, se promène sur le plateau et, à l'aide des contacts qu'il porte, établit les communications nécessaires à l'allumage des lampes de l'indicateur des angles de barre cité plus haut.

L'arbre de l'électromoteur, mis en action par le commutateur de manœuvre du manipulateur, entraîne, par le pignon B, la roue C clavetée sur l'arbre intermédiaire D. La roue dentée E portée par cet arbre intermédiaire conduit, à l'aide d'une chaîne Galle, l'écrou du servomoteur à vapeur.

D'autre part, une roue dentée I, clavetée sur l'arbre H, est commandée à l'aide d'une seconde chaîne Galle par l'arbre du servomoteur à vapeur.

Sur l'arbre H est fixée une roue G qui entraîne l'écrou F, monté sur une partie filetée de l'arbre D. Si l'électromoteur prend de l'avance sur le servomoteur, l'écrou F se déplace et la fourche O vient buter sur le levier P. Celui-ci, suivant le sens du déplacement, agit à son tour sur un des leviers S. Ces derniers portent des frotteurs qui se déplacent sur les touches des commutateurs Q (un pour le mouvement à droite, un pour le mouvement à gauche) ; à ces touches aboutissent les sections d'un rhéostat R. Le déplacement du frotteur porté par le levier S introduit dans le circuit de l'électromoteur des résistances croissantes, ce qui provoque le ralentissement automatique du moteur et même son arrêt, parce que le mouvement de S, suffisamment prolongé, met l'induit en court-circuit.

De la même manière, le bras M du commutateur des

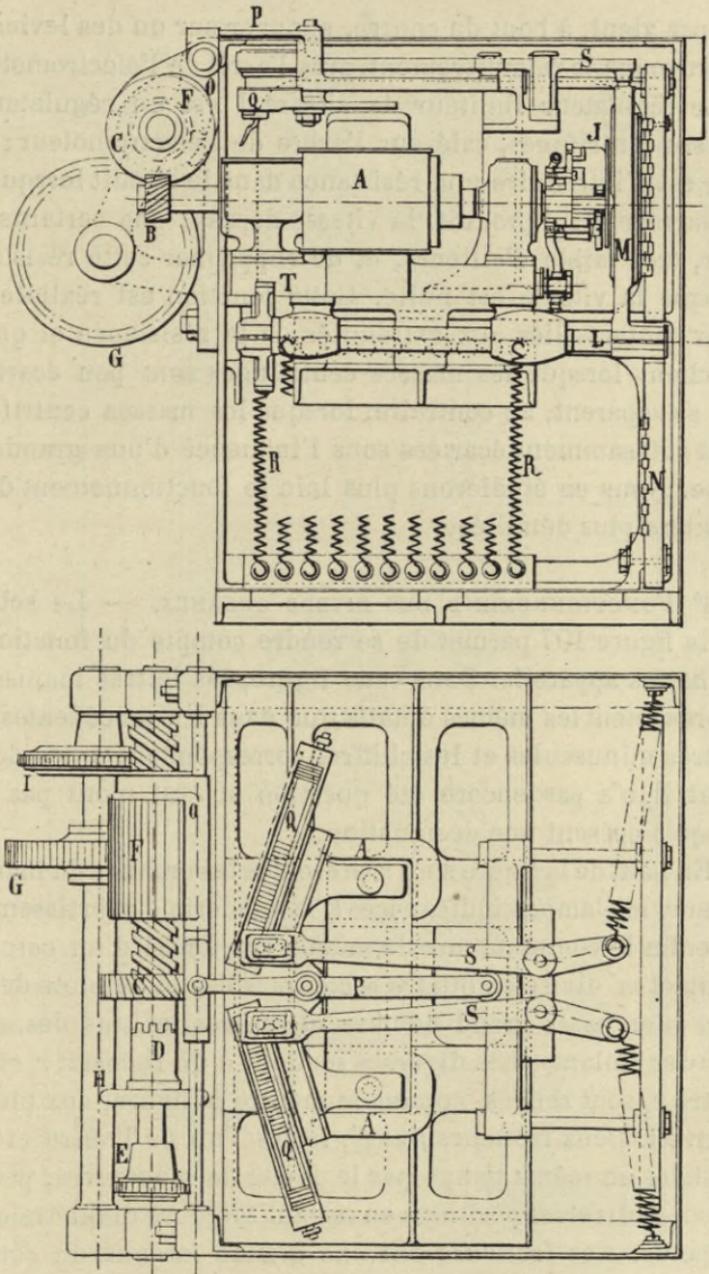


Fig. 106. — Commande électrique de la barre, système Marit. Récepteur.

Coupe verticale et plan. Échelle $\frac{1}{10}$.

lampes vient, à bout de course, appuyer sur un des leviers S et provoque le ralentissement, puis l'arrêt de l'électromoteur.

Le régulateur limiteur de vitesse J est un régulateur à masses centrifuges, calé sur l'arbre de l'électromoteur ; son rôle est d'introduire une résistance dans le circuit lorsque, le démarrage étant produit, la vitesse dépasse une certaine valeur, très faible d'ailleurs, et de supprimer cette résistance lorsque la vitesse est nulle. Cette fonction est réalisée par deux contacts liés aux extrémités de la résistance et qui se touchent lorsque les masses centrifuges sont peu écartées, qui se séparent, au contraire, lorsque les masses centrifuges sont suffisamment écartées sous l'influence d'une grande vitesse. Nous en étudierons plus loin le fonctionnement d'une manière plus détaillée.

3° FONCTIONNEMENT DES DIVERS ORGANES. — Le schéma de la figure 107 permet de se rendre compte du fonctionnement des appareils. Dans cette figure, les lettres majuscules représentent les mêmes détails que dans les précédentes ; les lettres minuscules et les chiffres correspondent à des détails dont il n'a pas encore été question ou qui n'ont pas reçu jusqu'à présent une désignation.

En haut de la figure sont représentés les organes du manipulateur, les lampes indicatrices *l*, la sonnerie d'avertissement *s* et enfin le commutateur de manœuvre formé d'un cercle de contact *m'* divisé en quatre secteurs isolés et de plots de contact *m* en assez grand nombre et séparés les uns des autres par des isolants. Les diverses sections d'un rhéostat r_3 et d'un autre r_2 sont reliées, comme le montre la figure, aux plots de contact. Deux frotteurs *f* et *f'*, isolés l'un de l'autre et commandés en même temps par le levier de manœuvre, peuvent occuper diverses positions en restant toujours diamétralement opposés. Ces frotteurs ont une grande largeur du côté des plots *m* ; ils établissent des communications électriques diverses entre les secteurs *m'* et les plots *m*, suivant leur position.

Tout d'abord, on voit que lorsque l'interrupteur *t* intercalé

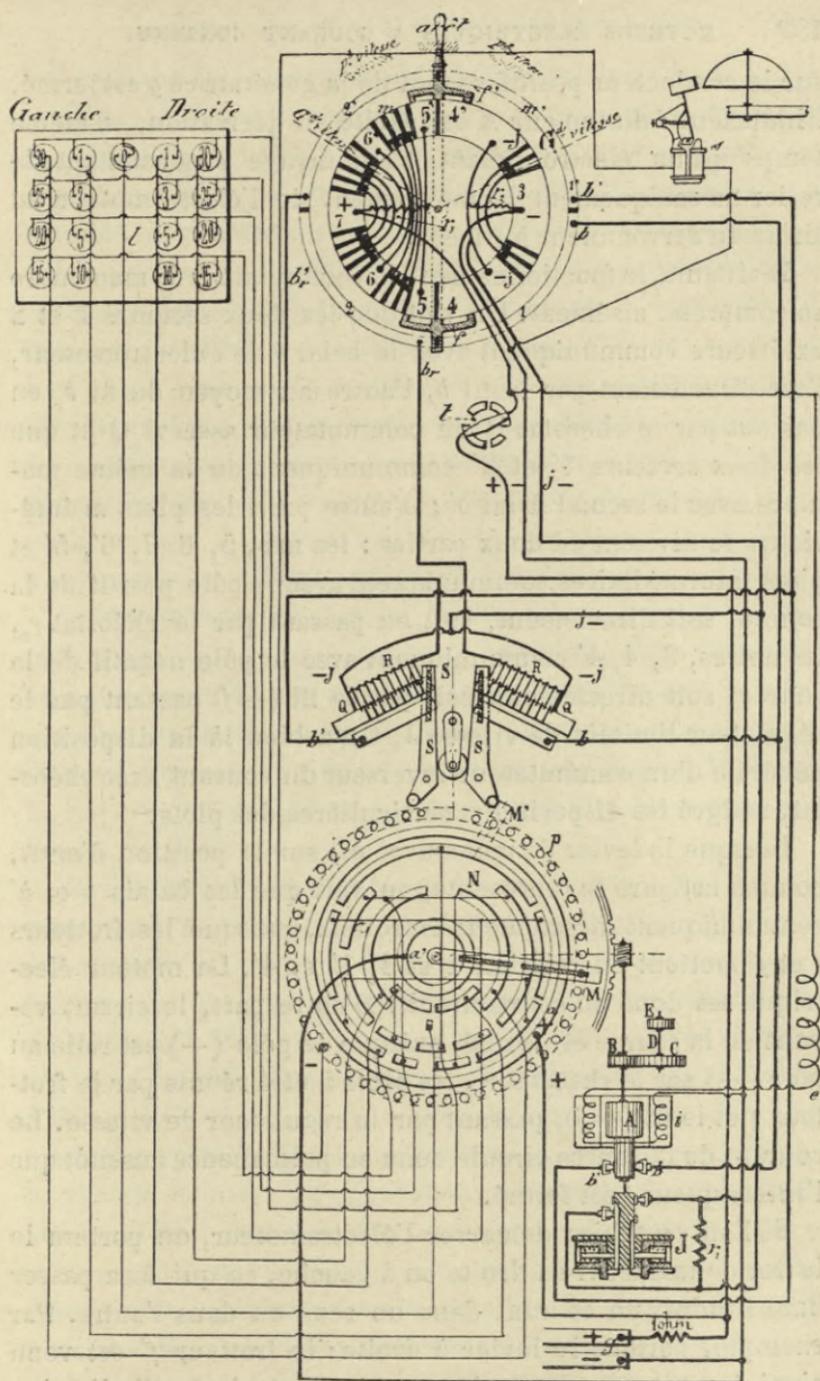


Fig. 107. — Commande électrique de la barre, système Marit. Schéma des connexions.

sur le conducteur positif venant de la génératrice g est fermé, l'inducteur i du moteur A est excité en dérivation, en même temps qu'un électro-aimant d'embrayage e permettant de relier mécaniquement le mouvement de l'électromoteur au tiroir du servomoteur à vapeur.

D'ailleurs, le fonctionnement du commutateur de manœuvre se comprend aisément. On voit que les deux secteurs 1 et 2 extérieurs communiquent avec le balai b de l'électromoteur, l'un directement par le fil b , l'autre au moyen du fil b_r en passant par le rhéostat R du commutateur asservi Q et que les deux secteurs 1' et 2' communiquent de la même manière avec le second balai b' ; d'autre part, les plots m intérieurs se divisent en deux parties : les uns, 5, 6, 7, 6', 5' et plots intermédiaires communiquent avec le pôle positif de la source, soit directement, soit en passant par le rhéostat r_s , les autres, 3, 4, 4' communiquent avec le pôle négatif de la source, soit directement, soit par le fil ($-j$) passant par le régulateur limiteur de vitesse J. On a bien là la disposition générale d'un commutateur-inverseur du courant avec rhéostat, malgré les dispositions particulières des plots.

Lorsque le levier de manœuvre est sur la position d'arrêt, comme la figure le représente, on voit que les balais b et b' communiquent directement entre eux, puisque les frotteurs f et f' mettent en relation 1 et 4, 1' et 4'. Le moteur électrique est donc en court-circuit. D'autre part, le circuit venant de la source est fermé, puisque le pôle (+) est relié au pôle (—) par le rhéostat r_s , les plots 5 et 4 réunis par le frotteur f et le fil ($-j$), passant par le régulateur de vitesse. Le courant de la source circule donc en permanence aussitôt que l'interrupteur t est fermé.

Si l'on veut faire démarrer l'électromoteur, on portera le levier de manœuvre à droite ou à gauche, ce qui fera passer dans l'induit un courant dans un sens ou dans l'autre. Par exemple, portons le levier à droite : le frotteur f' est venu ainsi à droite, en haut, à peu près vis-à-vis de l'indication *petite vitesse*, et le frotteur f à gauche, en bas.

Le balai b' est ainsi mis en relation par le frotteur f' avec le pôle (—) de la génératrice, par le fil ($-j$) et le régulateur de vitesse J ; le balai b est, en passant, par le commutateur asservi et frotteur f , mis en relation avec le pôle (+) par l'un des plots entre 5 et 6 et une portion de la résistance r_3 .

D'ailleurs, à ce moment, le moteur étant immobile, les contacts portés par les masses centrifuges du régulateur de vitesse J et reliés aux extrémités de son rhéostat r_1 sont en communication; cette résistance r_1 est donc mise en court-circuit; comme, d'autre part, en temps normal, le rhéostat R du commutateur asservi Q est tout entier retiré du circuit, le démarrage de l'électromoteur s'opère franchement avec la seule fraction du rhéostat r_3 . Le sens de la rotation de l'électromoteur est d'ailleurs tel que la barre soit mise à droite.

Le démarrage effectué, si le régulateur J fonctionne, la résistance r_1 est automatiquement introduite dans le circuit, de sorte que la vitesse reste faible, sans qu'on soit obligé de ramener en arrière le levier de manœuvre.

Nous devons mentionner en outre qu'une résistance de 1 ohm est en permanence intercalée sur l'un des conducteurs venant de la source.

Si l'on prononce davantage le mouvement du levier de manœuvre vers la droite, le frotteur f supprime du circuit des portions successives du rhéostat r_3 ; en même temps, le frotteur f' vient toucher les petits plots compris entre 4' et 3 et qui sont reliés aux sections d'un rhéostat r_2 dont la résistance est égale à la résistance r_1 du régulateur de vitesse J . Alors le balai b' du moteur électrique est en communication avec le pôle négatif de la génératrice, non plus seulement par l'intermédiaire du régulateur de vitesse et de sa résistance, mais bien plus directement par une fraction plus ou moins grande de la résistance r_2 et le plot 3. La portion de la résistance r_2 introduite dans le circuit est de plus en plus faible à mesure que le levier est poussé vers la droite et enfin toute résistance est supprimée du circuit, autre que la résistance de 1 ohm intercalée à l'origine, lorsque le frotteur f touche le

plot 7 et le frotteur f' , le plot 3. La vitesse de rotation est maximum alors.

On voit que l'addition du rhéostat r_2 , de même valeur que r_1 , et l'emploi d'un troisième fil pour relier les balais à la génératrice, a eu pour objet de permettre de retirer peu à peu du circuit la résistance du régulateur de vitesse, afin d'éviter les étincelles. Cette résistance est fort grande relativement ; voici, par exemple, les valeurs relatives des résistances du circuit :

Résistance de l'induit	1,3 ohm
Résistance à l'entrée.	1,0 —
Résistance de rhéostat de manœuvre r_3	4,3 —
Résistance du régulateur de vitesse r_1 ou r_2	5,3 —

On voit que la résistance r_1 est plus grande que toutes les autres et doit être retirée par fractions. Cette résistance r_1 du régulateur de vitesse est calculée pour permettre d'obtenir une vitesse égale à $\frac{1}{8}$ de la vitesse maximum, lorsque cette résistance est introduite dans le circuit en même temps que les autres.

Lorsqu'on abandonne le levier de manœuvre, il est ramené par ses ressorts dans la position d'arrêt ; le moteur électrique, après avoir diminué de vitesse, s'arrête en *court-circuit*.

Si on porte le levier vers la gauche, le courant est inversé dans le moteur qui tourne alors de manière à mettre le gouvernail à gauche. On voit en effet que cette fois le balai b est en communication avec le pôle (—) de la génératrice, par le frotteur f et le plot 4, tandis que le balai b' est relié au pôle (+) par l'intermédiaire du commutateur asservi et du rhéostat r_3 .

Le fonctionnement du commutateur asservi se comprend aisément. En temps normal, le contact porté par le levier S établit directement la communication entre les fils b et b'

venant des balais, et les fils b_r et b'_r , allant aux secteurs 2 ou 2' du commutateur de la manœuvre. Supposons, par exemple, que nous ayons porté le levier de manœuvre à droite, le balai b est alors relié au pôle (+) de la génératrice par le fil b , le frotteur du levier S, le fil b_r , le secteur 2, un des plots 5 à 6 et une portion du rhéostat r_s , tandis que le balai b' est relié au pôle (—) par le fil (— j); en même temps la résistance R tout entière est en dérivation entre le fil b allant au balai de même nom et le fil (— j) relié au balai b' . Mais si le servomoteur à vapeur ne suit pas le mouvement de l'électromoteur, le levier P déplace le frotteur S sur la droite et en même temps qu'une fraction du rhéostat R est intercalée entre b et b_r , les fils b et (— j), c'est-à-dire les deux balais, sont reliés par la fraction restante de R. Le mouvement de S prolongé intercale toute la résistance R dans le circuit de la source, en même temps que les balais sont directement reliés, *en court-circuit*.

Il nous reste à étudier le fonctionnement de l'indicateur des angles de barre.

Le commutateur des lampes N comprend deux cercles a et a' reliés aux pôles (+) et (—) de la génératrice g et des plots divers qui peuvent être mis en communication, par les frotteurs du bras M, soit avec le cercle a , soit avec le cercle a' . Comme nous l'avons dit, ce bras M est mis en mouvement par l'électromoteur et sa position sur le plateau N, à droite ou à gauche de la position verticale (en bas), correspond aux angles donnés au gouvernail. La position limite à droite est représentée en M'.

Tout d'abord, remarquons que le bras M met successivement en communication avec le cercle positif a les contacts p d'un cercle métallique relié à l'une des extrémités de la sonnerie d'avertissement s . Comme cette sonnerie est reliée par son autre extrémité au pôle négatif de la génératrice, elle fonctionne à chaque passage de M sur un contact p . L'intervalle entre deux de ces contacts p correspond à un déplacement de 1° du gouvernail.

Les 17 lampes sont reliées par 9 fils aux plots du commutateur ; 5 fils peuvent être mis en communication par M avec le cercle négatif a' et 4 fils avec le cercle positif a . Ce nombre restreint de fils est un avantage assurément, mais il résulte de cette disposition que, en outre des lampes régulièrement allumées pour indiquer la position du gouvernail, d'autres lampes peuvent encore se trouver allumées, en veilleuses, il est vrai ; il peut en résulter des erreurs, ou tout au moins une gêne pour la manœuvre.

Il faut en tout 18 conducteurs pour relier le manipulateur au récepteur.

4° MANIÈRE DE MANŒUVRER. — Par exemple, la barre étant à zéro, l'officier de quart commande : 20° à gauche, en douceur. L'homme de barre portera le levier de manœuvre du manipulateur vers la gauche, à la position marquée : *petite vitesse* et l'y maintiendra. Il entendra la sonnerie indiquant que la barre se déplace et verra successivement s'éclairer les numéros 1, puis 1 et 3 simultanément, puis 3 seul, 3 et 5, 5 seul, 5 et 10, 10, 10 et 15, 15, 15 et 20, enfin 20 seul. A ce moment, il devra lâcher le levier de manœuvre qui reviendra automatiquement à la position d'arrêt, tandis que le gouvernail restera à 20° à gauche. Il y a là une différence essentielle entre l'emploi de la commande électrique et celui de la barre à main ou à vapeur, puisqu'avec ces dernières, l'homme de barre, après avoir manœuvré la roue pour exécuter l'ordre donné, conserve la main sur cette roue qui reste dans la position où il l'a amenée, comme le gouvernail lui-même. La position de la roue de manœuvre représente toujours la position du gouvernail, tandis qu'avec la commande électrique Marit, le gouvernail étant à 20° à gauche, le levier de manœuvre abandonné par l'homme de barre se trouve sur la position d'arrêt initiale.

Si l'ordre est donné de mettre le gouvernail à 25° à gauche, l'homme de barre devra pousser le levier de manœuvre de nouveau sur la gauche jusqu'à la position de *petite vitesse* ou

de *grande vitesse*, suivant que la manœuvre devra être exécutée *en douceur*, ou rapidement. L'homme de barre devra encore abandonner le levier de manœuvre lorsque le numéro 25 apparaîtra seul éclairé vivement.

Le gouvernail étant maintenant à 25° à *gauche*, si l'ordre est donné de mettre la barre au zéro, il faudra porter le levier de manœuvre à *droite*, jusqu'à ce que la lampe O soit éclairée seule. On voit, par ce dernier exemple, combien la manœuvre par la commande électrique diffère de la manœuvre habituelle. Les hommes de barre doivent être exercés assez longtemps avant d'arriver à ne pas commettre d'erreur.

Nous devons ajouter que l'indicateur par lampes nécessite une grande attention, l'œil étant souvent troublé par l'allumage normal, tantôt d'une lampe et tantôt de deux simultanément, comme aussi par l'allumage anormal d'autres lampes, bien qu'elles restent en veilleuses.

Malgré cela, la manœuvre, telle que nous venons de l'indiquer et qui correspond au premier cas de l'étude générale des conditions à remplir par la barre, est même satisfaisante, quand l'homme de barre est dressé. Il est bien plus difficile d'arriver à gouverner pour maintenir le navire sur une route déterminée. L'homme de barre, ayant sans cesse, dans ce second cas, à modifier la position du gouvernail, doit presque incessamment porter le levier de manœuvre, tantôt à droite, tantôt à gauche, sans oublier, à chaque fois, de lâcher ce levier pour qu'il puisse revenir à la position d'*arrêt*, lorsqu'il croit que le gouvernail a été amené dans la position convenable. Comme la position du levier n'est aucunement liée à celle du gouvernail, il faut bien qu'il ait recours, pour connaître celle-ci, à l'indicateur d'angles de barre, d'où l'obligation d'observer à la fois la route du navire et l'indicateur. La manœuvre, dans ces conditions, est difficile *même pour un homme très exercé*.

454 quinquies. Commande électrique de la barre, système des relais. — Ce système de commande élec-

trique, dû à MM. Savatier et de La Gabbe, ingénieurs des Forges et Chantiers de la Méditerranée, n'est encore, comme le précédent, qu'une commande du servomoteur à vapeur ordinaire. Il est employé, comme le système Marit, sur un assez grand nombre de navires de guerre.

Cet appareil de commande comprend, comme le système Marit, un *électromoteur* agissant par une transmission mécanique sur le tiroir du servomoteur à vapeur manœuvrant la barre. Mais cet électromoteur est manœuvré ici par une *commande à relais*, analogue à celle que nous avons déjà étudiée pour les monte-charges (424 bis); un *commutateur*, manœuvré directement par la barre elle-même, allume des lampes convenablement numérotées et placées au poste de commande; ces lampes servent ainsi, comme dans le système Marit, d'*indicateur d'angles de barre*.

Un régulateur de vitesse centrifuge est encore installé sur le moteur électrique; il est destiné à produire automatiquement la suppression d'une partie de la résistance du rhéostat de manœuvre, lorsque l'électromoteur est au repos, à permettre par suite le démarrage facile si on lance le courant dans l'électromoteur; la résistance supprimée se rétablit automatiquement dans le circuit lorsque, le démarrage étant effectué, la vitesse a pris une certaine valeur.

Enfin, le moteur s'arrête automatiquement lorsque la barre arrive à bout de course, à droite ou à gauche; de même, la vitesse est ralentie et le stoppage se produit même encore si l'électromoteur prend de l'avance sur le servomoteur à vapeur.

Les divers organes sont groupés en 3 postes différents :

1° *Postes de manœuvre*, comprenant chacun un *manipulateur*, ou petit commutateur de commande des relais, et un *récepteur*, ou réunion des lampes indicatrices des angles de barre;

2° *Poste de l'électromoteur*, comprenant l'*électromoteur* avec son *régulateur de vitesse* et, au voisinage, le *tableau des relais* et le *rhéostat*.

C'est là aussi, naturellement, que se trouvent les sécurités

diverses : arrêt à bout de course, ralentissement et arrêts déterminés par l'avance trop grande de l'électromoteur par rapport au servomoteur à vapeur ;

3° *Poste du transmetteur d'angles de barre*, comprenant le commutateur des lampes, actionné par la barre.

La figure schématique 108 permet de se rendre compte de la disposition des divers organes et de leur fonctionnement.

On voit en M le manipulateur, en L l'indicateur des angles de barre composé des lampes numérotées *l*, au nombre de 11.

L'induit de l'électromoteur est représenté en A, son inducteur excité en dérivation en I. Le régulateur de vitesse est en H. Les électro-aimants relais sont au nombre de 5, dont 2 servant d'inverseurs de courant, pour la marche vers la droite ou vers la gauche : ce sont les électro-aimants désignés par les lettres D et G ; les autres, I, II, III, servent à supprimer du circuit tout ou partie de la résistance du rhéostat R, c'est-à-dire à faire varier la vitesse de l'électromoteur.

Le commutateur allumeur des lampes est constitué par la barre franche B qui porte un frotteur établissant la communication avec le pôle positif de la source S, de plots *m* diversément distribués sur une circulaire F et reliés aux lampes de l'indicateur. D'autres plots *t*, placés de 5° en 5°, sont reliés à une sonnerie électrique d'avertissement *s*, placée au poste de manœuvre.

Lorsqu'on déplace le levier de manœuvre du manipulateur vers la droite ou vers la gauche, on ferme le circuit de l'électro-aimant relais D ou G. Cet électro-aimant attire son armature et abaisse ainsi des ponts *p*, *p'* qui établissent les communications de l'induit du moteur avec les pôles de la source S, de manière à faire tourner l'induit dans un sens ou dans l'autre, comme on peut s'en assurer en suivant les communications de la figure schématique. Si le levier du manipulateur est peu poussé sur la droite ou la gauche, le circuit des électro-aimants I, II, III reste ouvert et toute la

résistance du rhéostat R est dans le circuit ; on marche ainsi à petite vitesse ; en poussant le levier davantage sur la droite ou sur la gauche, on ferme successivement le circuit des électro-aimants I, II, III et on supprime progressivement les diverses fractions du rhéostat R, la vitesse de déplacement de la barre augmente. Lorsqu'on abandonne le levier du manipulateur, il revient de lui-même à la position d'arrêt ; le circuit de tous les électro-aimants est rompu, et l'induit de l'électromoteur est mis en court-circuit, parce que, les ponts q et q' s'abaissant, les deux balais du moteur sont directement reliés ; on a figuré en g et d les électro-aimants auxiliaires, dits de court-circuit, qui assurent énergiquement celui-ci. L'électromoteur s'arrête donc instantanément, aussitôt qu'on abandonne le levier du manipulateur. La barre reste donc encore à droite ou à gauche, dans la position où on l'a amenée, *tandis que le levier du manipulateur est à la position d'arrêt*. Pendant que l'électromoteur est en marche vers la droite ou vers la gauche, la barre B se déplace sur la circulaire F et les lampes de l'indicateur s'allument successivement. L'homme de barre doit encore ici lâcher le levier du manipulateur, lorsqu'il voit allumée la lampe portant le numéro de l'angle de barre qu'on veut obtenir.

Le fonctionnement du régulateur de démarrage H est aisément expliqué. Lorsque l'électromoteur ne tourne pas, les masses centrifuges établissent un contact h qui relie directement au pôle négatif de la source l'électro-aimant II. Lorsque donc, on porte le levier du manipulateur sur la droite ou la gauche, même d'une petite quantité, les $\frac{2}{3}$ de la résistance R sont supprimés, puisque l'électro-aimant II est actionné ; le démarrage se fait donc facilement. Mais aussitôt que l'électromoteur a pris une certaine vitesse, le contact h cesse et toute la résistance est de nouveau dans le circuit, à moins qu'on ne porte le levier du manipulateur davantage sur la droite ou la gauche.

A bout de course, le bras K d'un axiommètre agit sur des

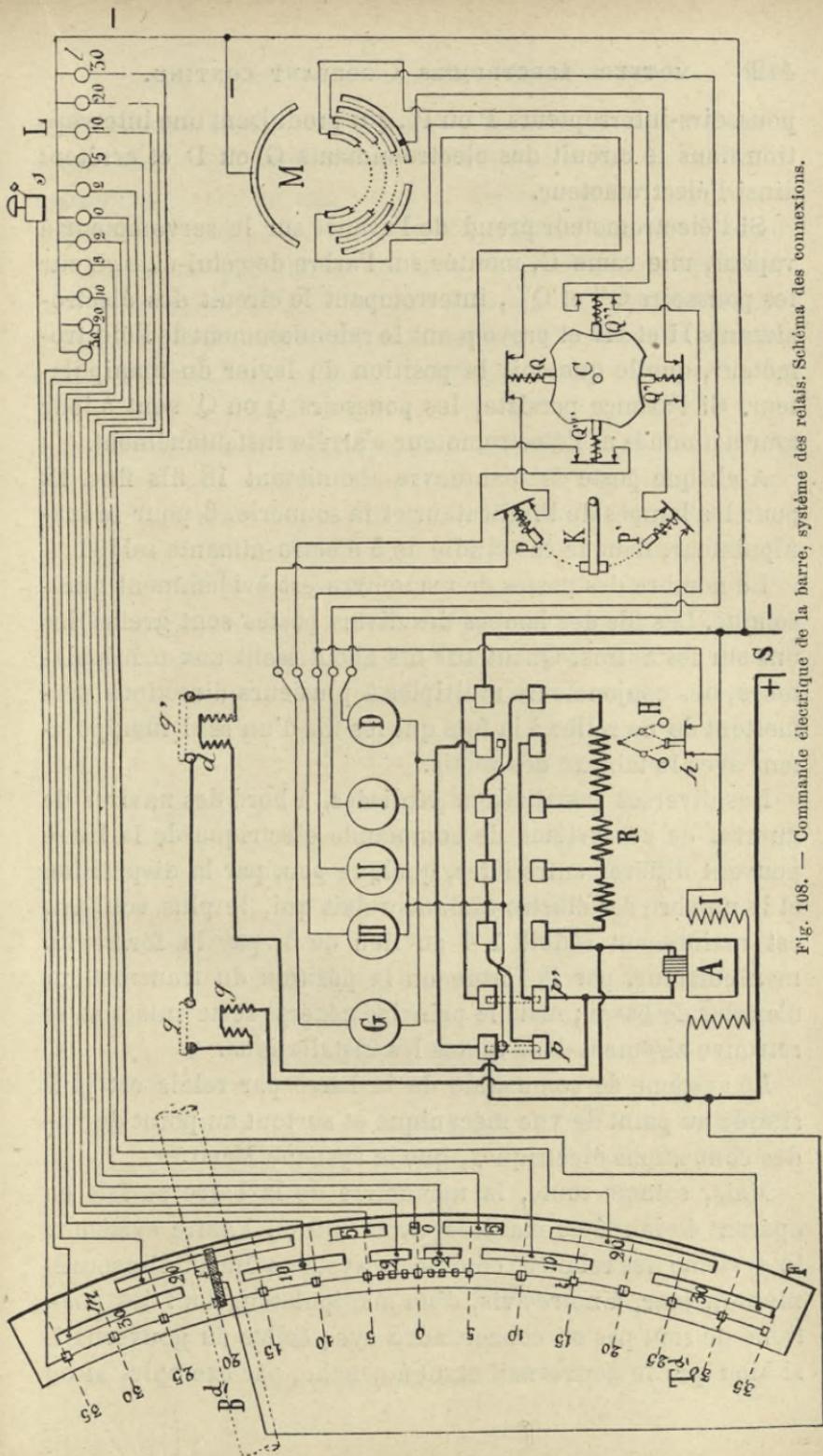


Fig. 108. — Commande électrique de la barre, système des relais. Schéma des connexions.

poussoirs-interrupteurs P ou P', qui produisent une interruption dans le circuit des électro-aimants G ou D et arrêtent ainsi l'électromoteur.

Si l'électromoteur prend de l'avance sur le servomoteur à vapeur, une came C, montée sur l'arbre de celui-ci, agit sur les poussoirs Q'' et Q''', interrompant le circuit des électro-aimants II et III et provoquant le ralentissement de l'électromoteur, quelle que soit la position du levier du manipulateur. Si l'avance persiste, les poussoirs Q ou Q' sont à leur tour actionnés et l'électromoteur s'arrête instantanément.

A chaque poste de manœuvre aboutissent 18 fils fins, 12 pour les lampes de l'indicateur et la sonnerie, 6 pour le manipulateur, dans le cas étudié de 5 électro-aimants relais.

Le nombre des postes de manœuvre est évidemment quelconque. Les fils des lampes des divers postes sont greffés les uns sur les autres. Quant aux fils aboutissant aux manipulateurs, des joncteurs multiples à plusieurs directions permettent de ne relier à la fois que les fils d'un seul manipulateur avec le tableau des relais.

Les diverses installations réalisées, à bord des navires de guerre, de ce système de commande électrique de la barre peuvent différer entre elles, quelque peu, par la disposition et le nombre des électro-aimants relais qui, le plus souvent, est maintenant réduit à 4 au lieu de 5, par la forme du manipulateur, par la forme ou la position du transmetteur d'angles de barre ; mais le principe général reste intact et se retrouve aisément dans toutes les installations.

Le système de commande de la barre par relais est plus simple au point de vue mécanique et surtout au point de vue des connexions électriques, que le système Marit.

Mais, somme toute, la manœuvre de la barre se fait en opérant de la même manière, avec l'un ou l'autre système ; le système des relais a, comme le système Marit, l'inconvénient majeur, à notre avis, d'un manipulateur dont les positions ne sont pas en concordance avec celles du gouvernail, si bien que le gouvernail étant à gauche, par exemple, si on

veut le mettre au zéro, il faut porter le manipulateur à *droite*. Nous avons, plus haut, insisté sur l'imperfection de ce mode opératoire et sur le trouble qu'il apporte dans l'esprit des hommes de barre. Nous concluons en disant que le système de commande par relais, tel qu'il est installé à bord des navires actuels, ne satisfait, pas plus que le système Marit, aux conditions générales que nous avons indiquées pour la manœuvre de la barre dans les différents cas.

un instant souper à leur insouciance, au moment où les machines génératrices, les commutateurs électriques, les électromoteurs servent à la propulsion électrique du navire. Si l'on dispose d'un réservoir d'eau à température constante, on arrive, il est clair que l'énergie électrique développée par les machines à vapeur, par exemple, doit être directement appliquée à l'alimentation des machines électriques par radiocourant par l'intermédiaire de dynamos conductrices et réceptrices.

458. — C'est semble que vient à l'esprit que dans les machines même qui fonctionnent à des courants faibles, les pertes analoges ne paraissent pas en conséquence être négligeables. Il s'en suit à diverses reprises que les courants des électrodes sont toujours à une température élevée, que les chemins de fer à vapeur et les conducteurs électriques ne sont pas seulement les locomotives électriques, mais aussi les conducteurs eux-mêmes dans les stations électriques, les câbles, les lignes par des conducteurs à la température élevée, mais en outre les locomotives électriques produisant des courants faibles, car il faut les refroidir et cela au moyen de courants à vapeur en outre avec elles comme à l'ordinaire et comme dans les dynamos électriques.

Il est facile de comprendre que si l'on dispose d'un réservoir d'eau pour réaliser l'équilibre dans les machines, nous venons à l'ordre, une fois encore, nous venons à l'ordre, que si l'ordre des courants est commandé directement par les machines à vapeur.

CHAPITRE VIII

NAVIGATION ÉLECTRIQUE

455. Conditions générales de la navigation électrique. — Tout d'abord, il est bien évident qu'on ne peut un instant songer à créer mécaniquement, au moyen de dynamos génératrices, le courant électrique qui doit actionner les électromoteurs servant à la propulsion électrique d'un navire. Si l'on dispose d'un réservoir d'énergie mécanique, charbon, ou autre, il est clair que l'énergie mécanique développée par les machines à vapeur, par exemple, doit être directement appliquée à l'arbre de l'hélice de propulsion et non pas indirectement par l'intermédiaire de dynamos génératrices et réceptrices.

456. — Cela semble une vérité si évidente que nous ne l'aurions même pas énoncée, si des assertions dans un ordre d'idées analogue ne paraissaient être en contradiction avec elle. Il a été affirmé à diverses reprises que les chemins de fer électriques étaient susceptibles d'une plus grande vitesse que les chemins de fer à vapeur et l'on entendait par là non seulement les locomotives électriques actionnées par un courant produit dans une station génératrice extérieure et amené par des conducteurs à la réceptrice mobile, mais encore des locomotives électriques produisant elles-mêmes le courant qui doit les actionner et cela au moyen de machines à vapeur emportées avec elles comme d'ordinaire et commandant des dynamos génératrices.

Il est facile de comprendre qu'il n'y a rien de paradoxal à affirmer que l'on peut réaliser électriquement, dans les conditions que nous venons d'indiquer, une plus grande vitesse que si l'arbre des roues motrices est commandé directement par une machine à vapeur.

Ce qui limite, en effet, la vitesse des locomotives à vapeur, ce n'est pas l'impossibilité de leur donner des machines plus puissantes de manière à les rendre capables de produire des vitesses plus grandes, c'est l'impossibilité où l'on est de laisser ces plus grandes vitesses se réaliser sans danger imminent de déraillement; cela tient à ce que le mouvement alternatif des pistons de la machine à vapeur provoque des mouvements de lacet qui diminuent l'assiette de la locomotive sur les rails. On pourrait appliquer à l'arbre des roues motrices une puissance plus grande et, par suite, réaliser une plus grande vitesse, si la machine motrice agissait sur l'arbre d'une manière continue en développant un couple parfait. Or, c'est le cas pour des électromoteurs dont l'induit serait monté sur cet arbre. Il va sans dire qu'alors la puissance que devra développer la machine à vapeur actionnant les génératrices sera au moins de 20 p. 100 plus grande que si on avait pu directement l'atteler sur l'arbre moteur.

De sorte que le raisonnement qui précède peut se résumer ainsi :

Admettons que pour donner une vitesse de 90 kilomètres à l'heure au train remorqué par une locomotive, il faille développer sur l'arbre des roues motrices une puissance P . Pour porter la vitesse à 150 kilomètres, il faudra une puissance P' supérieure à P . Cette puissance P' ne peut être fournie directement par des machines à vapeur, parce que la vitesse obtenue ferait alors dérailler le train, en raison de la discontinuité de l'action des machines à vapeur. Si l'on se sert d'électromoteurs, ils devront développer une puissance mécanique P' ; les génératrices qui les actionnent devront leur fournir une puissance électrique au moins égale à $\frac{P'}{0,9}$ et la puissance mécanique fournie par les machines à vapeur qui feront tourner les génératrices sera au moins $\frac{P'}{0,9 \times 0,9}$ ou $\frac{P'}{0,8}$.

Il est bien clair que si on pouvait directement faire travailler la machine à vapeur à ces grandes vitesses, cette puissance $\frac{P'}{0,8}$ produirait une vitesse plus grande que 150 kilomètres.

On le voit, l'emploi des électromoteurs comme intermédiaires ne donne pas une vitesse plus grande, mais permet seulement de réaliser les grandes vitesses, avec une moins bonne utilisation de la puissance disponible.

457. — Aucune difficulté du genre de celle que nous venons de signaler pour les locomotives ne se présente pour les navires et la seule condition qu'il faille remplir pour obtenir une plus grande vitesse, c'est d'augmenter la puissance appliquée à l'arbre de l'hélice ou du propulseur, quel qu'il soit. L'intermédiaire des génératrices et des réceptrices, en réduisant la puissance disponible, ne pourrait que réduire la vitesse du navire, toutes choses égales d'ailleurs.

458. — Ceci étant posé, les navires à propulsion électrique devront produire le courant électrique nécessaire aux électromoteurs non pas mécaniquement, mais au moyen de piles chimiques. Nous ne faisons qu'indiquer comme possible dans l'avenir la production directe des courants par les combustions, par exemple, ou tout autre procédé dans lequel la chaleur jouerait le rôle principal, parce que, dans l'état actuel de la science, rien d'industriellement pratique n'a été trouvé dans cette voie.

459. — Nous distinguerons deux cas. En premier lieu, on peut supposer que le navire emporte une provision des matières chimiques consommées par les piles, ce qui lui permet de les recharger et par conséquent de naviguer avec une indépendance comparable à celle d'un navire à vapeur, n'ayant besoin comme ce dernier que de renouveler sa pro-

vision à des intervalles de temps plus ou moins éloignés, suivant l'importance de cette provision et la consommation journalière. On peut, en second lieu, admettre que le navire parte avec ses piles chargées sans emporter de quoi renouveler leur charge. Son parcours est alors limité par l'importance de la quantité de matières actives contenue dans les piles.

460. — Un mot suffit pour prouver que la grande navigation, qui correspondrait au premier cas que nous avons considéré, est inadmissible électriquement. Sauf les piles à acide chlorochromique de M. le commandant Renard, qui ne sont pas des piles industrielles, toutes les piles connues pèsent plus de 150 kg par cheval utile et nous avons vu que la consommation horaire du zinc seul atteint un minimum de 2 kg par cheval-heure utile (349). Il suffit de comparer ces chiffres à ceux correspondant aux chaudières à vapeur et au charbon brûlé pour comprendre que la grande navigation électrique est actuellement une illusion.

461. — Tenons-nous-en donc à la navigation électrique limitée qui correspond au second cas, où les piles embarquées ne sont pas rechargées à bord. Dès lors, les accumulateurs se recommandent comme piles, en raison de leur légèreté spécifique et surtout à cause de la facilité de leur rechargement. Les accumulateurs étant déchargés, au lieu d'y renouveler, comme dans une pile ordinaire, la provision d'acide et d'autres matières chimiques, par des manipulations incommodes, on refait dans la pile même, au moyen d'un courant électrique emprunté à une dynamo, les produits chimiques consommés, sans manipulation d'aucune sorte. Nous ne nous occuperons donc, en dernier ressort, que de la navigation électrique avec des accumulateurs comme source. Nous allons successivement étudier les conditions de fonctionnement des petites embarcations électriques, des bateaux de tonnage plus grand et enfin des bateaux électriques sous-marins.

CANOTAGE ÉLECTRIQUE

462. Canots de plaisance. — Lorsqu'il s'agit de canots de plaisance, on comprend aisément la grande supériorité de la propulsion électrique d'abord sur l'emploi des rames qui exige un personnel nombreux, occupant la majeure partie de la place disponible et qui ne fournit jamais qu'une vitesse modérée, sauf dans le cas où ce personnel, relativement très nombreux, est en même temps très exercé.

La propulsion à vapeur ne peut davantage soutenir la concurrence avec la propulsion électrique, au point de vue de la commodité, et c'est ici la chose capitale. L'emploi de la vapeur exige une chaudière, une machine à vapeur et, par suite, en général, un chauffeur et un mécanicien connaissant leur métier. Avec la propulsion électrique, un amateur peut lui-même, sans aide, commander l'organe de propulsion, par la simple manœuvre de commutateurs convenablement disposés : un très court apprentissage l'en rend capable, si l'installation est bien comprise, et puisqu'il s'agit ici de canotage de plaisance, nous admettons que rien n'a été négligé pour cela. Sur le canot électrique, plus de ces odeurs, cette fumée, ce bruit inséparables des meilleures machines à vapeur ; les trépidations dues au mouvement de l'arbre propulseur s'adoucissent, le moteur électrique donnant une impulsion continue au lieu de la série de secousses du piston du cylindre à vapeur ; il n'y a plus à craindre les dangers qui peuvent toujours résulter avec la vapeur de la négligence du chauffeur, ou du mauvais état des appareils. En cas d'avarie ou de fausse manœuvre, le pis qui puisse résulter pour le canot électrique, c'est d'être mis pendant un temps plus ou moins long hors d'état de manœuvrer, avec le désagrément pour le promeneur de voir son excursion interrompue.

Sur le canot électrique pas de chaudière à assurer, ni à

faire inspecter périodiquement ; le bateau renferme l'énergie qui lui est nécessaire toute prête pour l'usage dans ses accumulateurs, au lieu d'avoir à la produire en brûlant du charbon, et cette énergie il peut en être disposé à volonté et dans telle mesure que l'on désire, instantanément, en tournant simplement un commutateur. On n'a plus à attendre l'allumage des feux, ni à entretenir ceux-ci, en pure perte, dans les moments de repos.

463. — Mais (ici nous retournons la médaille) la chaudière à vapeur éloignée du bateau doit se retrouver à terre, avec sa machine à vapeur actionnant la dynamo génératrice nécessaire pour la charge des accumulateurs ; le personnel doit se retrouver au complet avec une construction supplémentaire abritant le tout. Il est inutile, avons-nous dit, de prévoir, même une demi-heure à l'avance, l'excursion en bateau projetée, mais à la condition expresse que les accumulateurs soient maintenus toujours chargés, ce qui entraîne des pertes d'énergie bien autrement considérables que celle de l'entretien des feux pendant les périodes de repos du canot à vapeur en excursion. Sinon, il faudra prévoir l'excursion non plus une demi-heure ou une heure à l'avance, comme pour un canot à vapeur, mais bien un nombre d'heures souvent considérable pour permettre la charge des accumulateurs.

Il ressort de ce qui précède que le canotage de plaisance électrique, s'il est commode pour ceux qui en usent, l'est beaucoup moins pour le propriétaire du canot, et qu'il est en tous cas très onéreux, puisqu'en outre des chaudières et machines à vapeur qui eussent été nécessaires dans un canot à vapeur, il faut posséder nécessairement une dynamo génératrice à terre, une batterie d'accumulateurs et une dynamo réceptrice dans l'embarcation, toutes choses dont l'amortissement doit être compté très largement ; ajoutons que la machine à vapeur servant à charger les accumulateurs consomme au moins deux fois plus de charbon que ne l'eût fait

la machine d'un canot à vapeur pour une excursion de même durée dans les deux cas.

464. — Ainsi envisagé, le canotage électrique est un luxe très coûteux. La question s'améliore, au point de vue économique, si le propriétaire du canot électrique est en même temps un industriel possédant une usine éclairée électriquement. On comprend alors que le chargement des accumulateurs ne fait qu'utiliser le jour les dynamos génératrices installées pour l'éclairage de nuit.

465. — On peut encore envisager l'hypothèse d'un propriétaire de canot électrique achetant à une compagnie d'électricité l'énergie électrique nécessaire pour la charge des accumulateurs de son embarcation ; c'est certainement pour lui la solution la plus simple, sinon la plus économique ; mais encore faut-il que la compagnie distribuant l'énergie électrique existe et que le centre de distribution ne soit pas trop éloigné des endroits où peut atterrir l'embarcation.

466. — Enfin, on peut supposer qu'il ne s'agisse plus d'un propriétaire de canot électrique l'utilisant pour lui-même ou ses invités, mais d'une exploitation industrielle d'embarcations électriques de plaisance, fonctionnant régulièrement et comprenant une usine électrique avec chaudières, machines à vapeur et dynamos génératrices pour la charge alternative ou simultanée des accumulateurs de canots électriques plus ou moins nombreux loués aux amateurs. Cette exploitation peut être rémunératrice, si ces derniers paient suffisamment le plaisir de naviguer avec toutes les commodités que nous avons signalées, et si surtout l'usine électrique a d'autres débouchés, tels que l'éclairage électrique par exemple.

467. Embarcations des ports. — Nous envisagerons maintenant une autre espèce de canotage très importante, le

service des embarcations dans les ports en général et dans les ports militaires en particulier. A tout moment de la journée un grand nombre d'embarcations sillonnent ceux-ci, baleinières et canots à rames, canots à vapeur, conduisant le personnel à bord des navires et dans les ateliers où il a affaire, ou faisant un service de batelage régulier. La question de commodité a bien aussi ici son importance ; il est souvent utile et même nécessaire qu'on puisse se transporter rapidement et à un moment quelconque d'un point à un autre et, toutes choses égales d'ailleurs, mieux vaut le faire commodément. Mais le point de vue économique doit, avant tout, être pris en considération.

Les embarcations à rames exigent en permanence un personnel nombreux, employé très irrégulièrement, travaillant quelquefois beaucoup en quelques heures, mais aussi restant inutilisé souvent pendant longtemps. Les canotiers peinent en travaillant mais, somme toute, ne fournissent pas une grande somme de travail journalier, ces à-coups ne convenant pas à l'organisation humaine. Le canotage à rames est donc dispendieux.

468. — Le canotage à vapeur est beaucoup plus rapide, il exige un personnel plus restreint, mais les embarcations à vapeur sont d'un prix beaucoup plus élevé que les embarcations à rames ; on ne pourrait donc les multiplier autant que ces dernières. De plus, elles exigent un personnel mécanicien plus difficile à recruter que des rameurs et par suite mieux rémunéré ; elles consomment du charbon quand elles marchent et même au repos, si l'on veut qu'elles soient toujours prêtes à partir.

469. — Les embarcations électriques exigent un personnel encore plus réduit que les canots à vapeur, puisqu'un seul homme peut manœuvrer la machinerie électrique. En poussant les choses jusqu'aux limites du possible, on peut concevoir une embarcation électrique légère, ne nécessitant qu'un

seul homme pour tout armement, la barre et la machine électrique étant manœuvrées par la personne ou une des personnes ayant pris passage. De telles embarcations, de dimensions réduites, pourraient peut-être alors remplacer les embarcations à rames, l'économie considérable sur le personnel compensant l'augmentation du prix d'achat dû à la machinerie électrique et aux accumulateurs et les dépenses pour la charge des accumulateurs ou le graissage du moteur électrique. Il n'est pas impossible même qu'un canot électrique de plus grandes dimensions puisse économiquement soutenir la concurrence avec les canots à vapeur, toujours à cause de l'économie sur le personnel ; car par ailleurs la machinerie électrique et les accumulateurs doivent coûter plus cher que la machinerie à vapeur avec la chaudière, et la consommation de charbon nécessaire pour la charge des accumulateurs ne doit pas être inférieure à celle du canot à vapeur, malgré l'emploi, pour la charge, de machines à vapeur plus économiques que celle du canot, si l'on tient compte de la quadruple transformation que l'énergie mécanique subit depuis la machine à vapeur actionnant la dynamo de charge des accumulateurs, jusqu'à l'arbre de l'hélice du canot électrique, en passant par les accumulateurs et l'électromoteur.

470. — Par ce qui précède, nous n'exprimons pas une opinion, nous voulons seulement indiquer que la question d'économie peut être posée ici et qu'il est possible qu'elle soit résolue dans un sens favorable aux embarcations électriques, alors que, dans le cas général des embarcations de plaisance, nous avons indiqué comme onéreux l'emploi de l'électricité. Cela tient à ce que les conditions sont ici des plus favorables. Tout grand port militaire possède ou va posséder une usine électrique pour l'éclairage des ateliers la nuit. Dans le jour, les dynamos puissantes qui la constituent sont employées, pour une fraction de leur puissance, à actionner, par le courant qu'elles produisent, des perceuses ou autres machines-outils à bord des navires en construction, ou en réparation. On peut

donc, pendant la journée, utiliser tout ou partie de l'excédent de la puissance de l'usine électrique installée pour l'éclairage à charger les accumulateurs d'embarcations électriques. Comme dépenses dues à l'emploi de ces dernières, il n'y a donc plus à compter l'amortissement du capital engagé dans l'installation de l'usine génératrice, puisqu'elle existe déjà pour un autre usage, mais seulement la consommation supplémentaire de charbon et de matières grasses, et peut-être aussi une partie de la rémunération du personnel de l'usine électrique, puisqu'il travaille alors le jour comme la nuit. Il faut toutefois songer qu'une partie de ce personnel au moins travaille déjà pendant le jour pour fournir aux machines-outils électriques le courant qui leur est nécessaire, que le nombre des chauffeurs ne sera probablement pas augmenté, s'il faut pour la charge des accumulateurs une dynamo supplémentaire et qu'il suffira d'adjoindre le mécanicien surveillant cette dynamo.

En tout état de choses, il est clair, d'autre part, que plusieurs batteries d'accumulateurs seront rechargées simultanément, les dynamos étant généralement assez puissantes et que la consommation de charbon sera dès lors réduite, puisque les machines à vapeur perfectionnées de l'usine électrique fonctionneront au voisinage de leur puissance normale.

471. — Il est très difficile de comparer exactement ce que coûte une embarcation électrique avec ce que coûte une embarcation à rames ou à vapeur pouvant faire le même service dans le port et pour le même laps de temps. Il est une chose, en tous cas, qu'il ne faut pas oublier, lorsqu'on fait cette comparaison, c'est l'amortissement du capital engagé.

Cet amortissement doit être, en effet, très rapide lorsqu'il s'agit de machinerie électrique et surtout d'accumulateurs ; on ne peut guère compter actuellement qu'une batterie d'accumulateurs puisse durer plus de deux ans, sans qu'on soit au moins obligé de renouveler toutes les plaques positives,

sans compter les autres réparations aux vases et aux plaques négatives.

Il est, de plus, souvent malaisé de déterminer avec quelque certitude l'économie qu'on peut réaliser sur le personnel en employant des embarcations électriques ; car il n'y a véritable économie que si l'homme ou les hommes supprimés dans l'embarcation sont ou congédiés, ou occupés ailleurs à un travail productif. Chacun peut donc sans peine, suivant ses tendances, prouver que les embarcations électriques sont plus économiques que les autres, ou le contraire ; les deux démonstrations contradictoires pourront d'ailleurs paraître exactes, si on les examine séparément ; cela tient, comme nous l'avons dit, à la difficulté de certaines évaluations et partant à la possibilité de les diminuer ou augmenter suivant la démonstration en vue. En réalité, l'expérience, faite consciencieusement, apprendra, bien mieux que les raisonnements écrits, de quel côté est l'économie.

En cas d'égalité approximative de dépenses, il ne faudrait pas hésiter à donner la préférence à l'électricité, en raison des commodités si grandes qu'elle procure et que nous avons énumérées à propos des canots de plaisance (462).

Nous donnerons plus loin une idée de la manière dont on peut évaluer une partie des dépenses dues à l'emploi de l'électricité.

472. Canots des navires. — Nous devons enfin examiner quels pourraient être les avantages ou les inconvénients de la substitution de la propulsion électrique à la propulsion par les rames ou la vapeur dans les embarcations des navires. Tout d'abord, il est certain qu'il est bien utile et commode pour un navire d'avoir constamment à sa disposition, sur les portemanteaux ou amenées, des embarcations rapides, toujours prêtes à partir, comme le seraient des embarcations électriques, dont les accumulateurs seraient maintenus constamment chargés, et que pourrait manœuvrer à peu près tout le monde. Mais ici, un élément intervient

que nous avons constamment laissé de côté : le mauvais temps. Nous avons jusqu'à présent supposé que les embarcations électriques ne naviguaient que par beau temps, pour les promenades, ou à l'abri dans un port. Bien différentes seraient les conditions de fonctionnement en mer ou en rade, par n'importe quel temps. Le roulis, le tangage, les secousses très fortes qui en résultent pour les embarcations, même par une mer modérée, seraient certainement très préjudiciables aux accumulateurs et abrégeraient beaucoup leur existence ; les embruns, les paquets de mer produiraient si rapidement des défauts graves d'isolement dans la batterie d'accumulateurs, dans les conducteurs et dans le moteur électrique, qu'on serait dans la nécessité absolue de protéger ceux-ci d'une manière complète contre l'eau de mer. Au contraire, les baleinières à rames, les canots à voiles et les canots à vapeur sont des embarcations qui n'ont rien à craindre des embruns, que le tangage et le roulis laissent indifférentes. Un simple toit en toile suffit à protéger le personnel de la machine et la chaudière d'un canot à vapeur non ponté, par gros temps.

L'embarcation électrique à bord des navires ne peut donc être raisonnablement qu'une embarcation de beau temps et son rôle est dès lors très limité ; on pourra bien avoir à bord une embarcation électrique pour l'agrément, mais les autres embarcations seront de véritables embarcations de mer.

473. — Il semble dès lors superflu de considérer le point de vue économique, puisqu'il s'agit d'une véritable embarcation de plaisance ; nous dirons cependant que le prix d'achat de la batterie d'accumulateurs nécessaire pour l'embarcation électrique et de la machinerie électrique est toujours assez grand, que le taux d'amortissement doit être pris élevé ; mais que, d'autre part, pour un navire possédant une installation d'éclairage électrique fonctionnant partiellement pendant la journée, la charge des accumulateurs peut se faire aisément et avec une dépense très faible. Ajoutons aussi que pour les

embarcations d'un navire, sauf des cas spéciaux, l'économie de personnel, qui semble devoir être réalisée avec la propulsion électrique, peut fort bien n'être qu'illusoire et l'usage de cette dernière ne pas diminuer d'un seul homme l'équipage du navire, le nombre des hommes composant cet équipage étant subordonné, en général, à bien d'autres considérations que l'armement des embarcations. Évidemment, il serait commode d'avoir toujours à sa disposition, à bord, les hommes formant l'armement des embarcations, laissés disponibles par l'usage de l'électricité, mais ce n'est là qu'une facilité plus grande accordée au service et l'économie matérielle n'apparaît guère.

474. — En résumé, il paraît presque évident que l'usage de la propulsion électrique pour les embarcations de bord ne peut être qu'onéreux ; les embarcations électriques ne sauraient assurer le service par les mauvais temps au même titre que les canots à voiles et à vapeur, et ne procureraient guère que l'agrément de leur emploi ; elles pourraient constituer des embarcations de luxe pour le commandant ou les officiers.

475. Formules utiles pour l'établissement d'un projet de canot électrique. — Nous allons maintenant calculer l'importance, le poids et le prix de la batterie d'accumulateurs et de l'électromoteur nécessaires à la propulsion électrique d'une embarcation, afin de donner au moins un aperçu touchant les dépenses d'installation que comporte l'usage de l'électricité. Établissons d'abord les formules dont nous ferons usage.

Les grandeurs qu'il est nécessaire de connaître tout d'abord sont la vitesse qu'on veut communiquer à l'embarcation et l'effort de traction qu'il est nécessaire de produire pour obtenir cette vitesse. Ce dernier est lié intimement à la vitesse, aux dimensions et à la forme du canot. On admet générale-

ment que l'effort utile F'_u à exercer sur un bateau pour le faire marcher en eau calme est donné par la formule

$$F'_u = KB^2 V^2 \text{ kilogrammes,}$$

B^2 représentant la surface immergée du maître-couple, c'est-à-dire de la plus grande section transversale, en mètres carrés; V étant la vitesse en mètres par seconde; K est un coefficient variable avec la forme du bateau.

En réalité, la longueur du bateau doit intervenir, ou tout au moins la surface de toute la portion du navire en contact avec l'eau, puisqu'il faut tenir compte du frottement de l'eau sur la carène. Mais on peut s'en tenir à la formule que nous avons écrite, à la condition de modifier en conséquence le coefficient K . Mais il en résulte que ce dernier est très variable et qu'il faut connaître à l'avance sa valeur pour des bateaux de formes à peu près semblables et de dimensions comparables à celui que l'on a en vue.

Pour des bateaux convenablement taillés, le coefficient K varie de 4 à 8: Lorsque le bateau navigue dans un canal étroit, le coefficient augmente notablement et peut atteindre des valeurs voisines de 10 et même 13.

La puissance utile de propulsion est le produit de l'effort de traction par la vitesse.

Nous aurons alors, en désignant cette puissance par p'_u et employant toujours les mêmes unités pour évaluer la surface immergée du maître-couple, la vitesse et l'effort utile

$$p'_u = F'_u \times V \text{ kilogrammètres par seconde,}$$

ou

$$p'_u = KB^2 V^3 \text{ kilogrammètres par seconde.}$$

Le travail utile de propulsion W'_u est le produit de l'effort utile par le chemin parcouru L . On a donc, en évaluant ce dernier en mètres,

$$W'_u = F'_u \times L \text{ kilogrammètres,}$$

ou

$$W'_u = KB^2 V^2 L \text{ kilogrammètres.}$$

476. — L'organe propulseur n'utilise pas entièrement pour la propulsion toute la puissance mécanique qu'on lui transmet, de sorte que pour obtenir la puissance utile de propulsion p'_u , il faut transmettre au propulseur une puissance mécanique majorée dans une certaine proportion. En appelant *rendement de l'organe propulseur* le rapport de la puissance utilisée pour la propulsion à la puissance mécanique qui lui est transmise et en désignant ce rendement par α , on voit donc que la puissance transmise au propulseur doit être $\frac{p'_u}{\alpha}$.

Quand ce propulseur est une hélice bien conditionnée, le rendement α peut atteindre une valeur de 0,85.

En second lieu, l'électromoteur qui doit faire marcher le bateau ne transmet pas intégralement à l'organe propulseur la puissance mécanique utile p_u qu'il développe sur l'arbre de son induit ; le plus souvent la transmission se fait par engrenages ; des paliers absorbent aussi par leurs frottements une partie de la puissance. Nous désignerons par β un coefficient que nous pourrions appeler *rendement de la transmission* et nous aurons

$$\frac{p'_u}{\alpha} = p_u \times \beta,$$

ou

$$p_u = \frac{p'_u}{\alpha\beta}.$$

Le coefficient β est fort variable, suivant la complication de la transmission ; nous admettrons qu'il est égal à 0,9.

La puissance électrique P à fournir à l'électromoteur, multipliée par son rendement industriel η_i , est égale à la puissance mécanique utile qu'il développe ; on a donc

$$P = \frac{p_u}{\eta_i} = \frac{p'_u}{\alpha\beta\eta_i}.$$

Nous avons donné des chiffres relatifs au rendement des électromoteurs dans le chapitre consacré à leur étude expéri-

mentale et nous avons vu qu'il peut atteindre des valeurs voisines de 0,90 (193). Il ne faut pas cependant compter, en général, pour des moteurs de moyenne puissance, sur plus de 0,80.

Il résulte de là que, si on admet les chiffres que nous avons donnés pour α , β et η_i , la puissance électrique P à fournir à l'électromoteur est

$$P = \frac{p'_u}{0,61} = p'_u \times 1,64.$$

Il est clair qu'on aura de même, en désignant par W l'énergie électrique qu'il faudra fournir à l'électromoteur pour obtenir un travail utile de propulsion égal à W'_u ,

$$W = W'_u \times 1,64.$$

477. — Cette énergie électrique est fournie par une batterie d'accumulateurs. Or, les accumulateurs ne restituent guère, à la décharge, en service courant, que 70 p. 100 de l'énergie qu'ils ont absorbée pendant la charge. Le travail électrique que devra donc développer la dynamo génératrice pour la charge des accumulateurs sera donc, en la désignant par W_1 ,

$$W_1 = \frac{W}{0,70} = W'_u \times 2,34.$$

478. — Enfin, cette énergie électrique utilisable développée par la dynamo génératrice est une fraction de l'énergie mécanique W_m , dépensée pour la faire tourner, égale au rendement industriel η_i de cette dynamo, rendement que nous pourrions supposer encore égal à 0,80. L'énergie mécanique W_m qu'il faudra dépenser pour actionner la dynamo de chargement sera donc, en dernier ressort,

$$W_m = \frac{W_1}{0,80} = W'_u \times 2,92.$$

479. — Le *rendement pratique* de la transmission d'énergie, c'est-à-dire le rapport de l'énergie mécanique W'_u utilisée pour la propulsion à l'énergie mécanique W_m absorbée par la dynamo de chargement des accumulateurs est donc, en définitive,

$$0,85 \times 0,90 \times 0,80 \times 0,70 \times 0,80 = 0,343.$$

En résumé, on voit donc que, sur 2920 kilogrammètres fournis par la machine à vapeur à la dynamo génératrice, 1000 seulement sont utilisés pour la propulsion du bateau.

480. — Cependant, il faut bien remarquer que cette majoration de l'énergie utilisée n'est pas entièrement due à l'emploi des accumulateurs comme intermédiaires entre la machine à vapeur et le propulseur, puisque dans tous les cas il y aura à tenir compte du rendement propre du propulseur que nous avons pris égal à 0,85 et du rendement de la transmission ou 0,90 ; de sorte que, en faisant abstraction de ces deux coefficients, l'énergie mécanique appliquée à la transmission du propulseur est majorée par l'emploi des accumulateurs dans le rapport de 2,23 à 1. On voit que la consommation de charbon nécessaire pour obtenir du bateau un certain parcours à une vitesse déterminée sera plus forte pour le canot électrique que si une machine à vapeur avait été installée dans le canot pour actionner directement l'hélice, bien que cette dernière machine ait une dépense spécifique en général plus grande que les machines plus puissantes qui fonctionneront à terre pour la charge des accumulateurs. Il n'y a donc pas de ce chef à espérer d'économie par l'emploi de l'électricité.

481. — Nous rappellerons que la puissance électrique utilisable développée par la dynamo génératrice servant au chargement des accumulateurs est $D' i'$, D' étant la différence du potentiel aux bornes de la dynamo, ou plus exactement entre les deux points où sont branchés les conducteurs allant

à la batterie en chargement, et i' l'intensité du courant de charge.

La puissance électrique utile développée par la batterie d'accumulateurs pendant la décharge est :

$$P = D i,$$

D étant la différence de potentiel entre les deux bornes de la batterie, pendant la décharge dans l'électromoteur, et i l'intensité du courant de décharge ; on peut supposer, en raison de la faible résistance des conducteurs qui relient la batterie d'accumulateurs à l'électromoteur dans le canot électrique, que la différence de potentiel aux bornes des accumulateurs est aussi la différence de potentiel aux bornes de l'électromoteur. Comme approximation suffisante, pour les accumulateurs au plomb, on confondra la force électromotrice des accumulateurs et la différence de potentiel aux bornes. A la charge, on supposera cette différence de potentiel variable suivant la période de charge de 2 à 2,5 volts par élément et, pendant la décharge, on la supposera variable de 2 à 1,8 volts par élément.

Le nombre des éléments en tension, soit pour la charge, soit pour la décharge, dépendra des dynamos génératrices dont on dispose et de la différence de potentiel pour laquelle le moteur électrique du canot est calculé. Pour une puissance donnée, on peut d'ailleurs construire une infinité de moteurs fonctionnant sous une différence de potentiel aux bornes également fixée ; pour préciser l'électromoteur, il faut encore se donner sa vitesse de rotation. Celle-ci est subordonnée d'autre part au nombre de tours que l'on veut donner à l'hélice et à la complexité plus ou moins grande admise pour les organes de transmission, qui, comme nous l'avons dit, comprennent, en général, des engrenages.

482. Application au calcul de la batterie d'accumulateurs et de la machinerie d'un canot électrique. Puissance nécessaire. — Supposons que l'on

veuille actionner électriquement une embarcation légère de 6 à 7 mètres de longueur et lui communiquer une vitesse de 6 nœuds. Nous pourrions nous donner également le plan du maître-couple et l'immersion normale de l'embarcation et calculer par la formule que nous avons donnée (475) l'effort de traction F'_u qu'il faut appliquer à l'embarcation pour vaincre la résistance de l'eau. Mais nous pouvons aussi, et ce sera pour de petites embarcations le procédé le plus exact, déterminer expérimentalement sur l'embarcation construite, par remorquage, l'effort à exercer. Nous admettrons qu'on ait trouvé, pour cet effort F'_u , une valeur égale à 60 kilogr. La vitesse de 6 nœuds correspond à un déplacement de 3,08 mètres par seconde, la puissance utile de propulsion p'_u sera

$$p'_u = 60 \times 3,08 = 184,8 \text{ kilogrammètres par seconde.}$$

En raison du coefficient d'utilisation de l'hélice servant à la propulsion et du coefficient de la transmission, coefficients que nous prendrons, comme précédemment, respectivement égaux à 0,85 et 0,90, la puissance mécanique développée sur son arbre par l'électromoteur devra être

$$p_u = \frac{184,80}{0,86 \times 0,90} = 241,5 \text{ kilogrammètres par seconde.}$$

En exprimant cette puissance en watts, nous aurons

$$p_u = 241,5 \times 9,81 = 2369 \text{ watts.}$$

La puissance électrique P à fournir à l'électromoteur sera dès lors

$$P = \frac{2369}{0,80} = 2961 \text{ watts.}$$

Nous pouvons refaire les mêmes calculs pour des vitesses de 4 nœuds ou 10 nœuds; comme les puissances utiles de

propulsion sont proportionnelles au cube de la vitesse, et que, en supposant les rendements identiques, il en est de même pour les autres puissances, on trouvera pour la puissance électrique fournie à l'électromoteur

$$\text{à 4 nœuds, } P = 877 \text{ watts ;}$$

$$\text{à 6 nœuds, } P = 2961 \text{ watts ;}$$

$$\text{à 10 nœuds, } P = 13708 \text{ watts.}$$

On voit que la puissance nécessaire croît extrêmement vite avec la vitesse.

483. Batterie d'accumulateurs. — Si l'on veut réduire au minimum les manipulations et éviter les erreurs, il est bon que les éléments de la batterie d'accumulateurs restent couplés de la même manière, soit pendant la décharge, soit pendant la charge. D'ailleurs, le couplage des accumulateurs en quantité est toujours fort peu recommandable. En raison de leur faible résistance intérieure et des différences quelquefois très sensibles dans les forces électromotrices des divers éléments, surtout après qu'un certain temps de service a amené des avaries dans certains d'entre eux, la charge de batteries couplées en quantité ne se fait pas uniformément pour tous les éléments, certains se chargeant beaucoup moins vite ; à la décharge, outre que ces derniers sont plus tôt déchargés et que si on ne les retire pas du circuit à ce moment, ils peuvent se trouver gravement endommagés, lorsque les éléments restent couplés en quantité, des circuits locaux peuvent se former entre les éléments de plus grande et de plus faible force électromotrice, ce qui provoque au moins des pertes d'énergie. Il faut ajouter encore qu'en cas d'avarie dans un ou plusieurs éléments, il est toujours aisé de les retirer du circuit, lorsque tous les éléments sont couplés en tension et qu'il n'en est pas de même, si la batterie totale est divisée en batteries partielles dont les éléments sont en tension, mais qui sont elles-mêmes couplées en quantité ; on ne peut retirer des éléments d'une batterie partielle qu'en dimi-

nuant sa force électromotrice et en provoquant, par suite, la décharge des autres à travers elle ; la suppression d'un ou de plusieurs éléments doit entraîner la suppression de toute la batterie partielle dont ils font partie, ou d'un nombre d'éléments identiques dans les autres batteries partielles.

Nous supposons donc que les éléments de la batterie d'accumulateurs sont couplés en tension pendant la décharge et pendant la charge.

S'il en est ainsi, le nombre des éléments de la batterie est entièrement subordonné au voltage des dynamos dont on peut disposer pour la charge.

Supposons que ces dynamos fonctionnent normalement en donnant 110 volts aux bornes. C'est le cas le plus général actuellement, pour les dynamos employées pour l'éclairage à terre. Mais la distribution de l'énergie électrique ne se fait alors qu'à 100 volts, le plus souvent. Dans les ports de guerre, l'éclairage électrique est ou sera la plupart du temps aussi assuré par des dynamos à 110 volts et la distribution faite à 100 volts. En admettant même que la dérivation alimentant les accumulateurs soit prise aux bornes de la dynamo, il faut compter que des conducteurs assez longs seront nécessaires, puisque les accumulateurs ne quitteront pas les embarcations ; comme on donnera à ces conducteurs, par raison d'économie, la plus faible section compatible avec l'intensité du courant qui doit les parcourir, la chute de potentiel dans ces conducteurs pourra toujours atteindre quelques volts. D'ailleurs, il faut admettre que le voltage pourra varier aux bornes de la dynamo, soit par inadvertance du mécanicien qui la gouverne, soit par suite des variations de vitesse occasionnées par les variations de charge. Pour toutes ces raisons, il n'est pas prudent de compter, d'une manière générale, sur plus de 100 volts aux bornes de la batterie d'accumulateurs en charge.

Comme les accumulateurs au plomb ont, pendant la charge, une force électromotrice maximum de 2,5 volts, on voit que le nombre des accumulateurs en tension doit être

au plus égal à 40 ; on a d'ailleurs intérêt à prendre ce nombre aussi grand que possible, afin de diminuer l'intensité du courant correspondant à une puissance déterminée. Nous adopterons donc ce nombre de 40 accumulateurs en tension.

Pendant la décharge, chaque accumulateur a une différence de potentiel aux bornes variable de 2 à 1,8 volts, depuis le commencement jusqu'à la fin. Nous prendrons la valeur moyenne 1,9 volt. La batterie de 40 éléments donnera aux bornes une différence de potentiel de $40 \times 1,9$ ou 76 volts. Comme la puissance électrique qu'elle doit fournir est de 2961 watts, le débit de la batterie doit être

$$i = \frac{2961}{76} = 38,96 \text{ ampères.}$$

Si nous voulons ne pas faire fonctionner la batterie au débit maximum, ce qu'on doit d'autant plus éviter qu'au démarrage de l'électromoteur l'intensité de décharge s'exagère encore, nous prendrons des accumulateurs dont le courant maximum de décharge soit, par exemple, 50 ampères.

484. — Ainsi notre batterie comprendra 40 accumulateurs au plomb pouvant débiter au maximum 50 ampères. Or, les types courants d'accumulateurs, ceux au moins pour lesquels les chiffres ont été contrôlés, peuvent débiter 2 ampères par kilogramme de plaques au maximum. Nous adopterons donc ce nombre comme débit maximum. Il en résulte que chacun des éléments de notre batterie devra avoir 25 kilogr. de plaques. Si nous admettons que le liquide et le vase pèsent environ la moitié du poids des plaques, ce qui se rapproche assez de la vérité, le poids total d'un élément de la batterie sera voisin de 38 kilogr.

Le poids total de la batterie de 40 accumulateurs sera donc de 1520 kilogr.

Le prix des accumulateurs est fort variable ; il dépend en

particulier non seulement du débit, mais de la capacité des accumulateurs. Pour des accumulateurs débitant 2 ampères par kilogramme de plaques et ayant une capacité de 10 ampères-heure par kilogramme, le prix est à peu près de 3,5 fr. par kilogramme de plaques, ce qui porte à 90 fr. le prix d'un élément de la batterie et à 3600 fr. celui de la batterie entière.

La capacité des éléments étant de 250 ampères-heure seulement, la durée de la décharge des accumulateurs, c'est-à-dire le temps pendant lequel le bateau pourra marcher avec une vitesse de 6 nœuds, sera donnée en heures par le quotient de cette capacité par l'intensité du courant de décharge, ou 39 ampères. On trouve ainsi un peu plus de 6 heures.

485. — Si l'on voulait augmenter la durée du fonctionnement du bateau, il faudrait prendre des accumulateurs ayant une plus grande capacité; il est bon d'ailleurs de remarquer que la capacité des accumulateurs au plomb augmente quand on diminue leur débit. On sera, en tous cas, amené, pour accroître la capacité, à augmenter le poids des accumulateurs. Si on fait choix, par exemple, d'accumulateurs ne débitant que 1 ampère par kilogramme, mais d'une capacité de 15 ampères-heure par kilogramme, il faudra prendre des éléments ayant chacun 40 kilogr. de plaques et pesant en tout environ 60 kilogr. La batterie de 40 éléments pèsera 2400 kilogr. et coûtera environ 5600 fr. Mais la capacité de chaque élément étant de 600 ampères-heure, la décharge pourra durer 15 heures.

On pourra, on le voit, faire varier la durée du fonctionnement dans des limites très étendues, mais en augmentant parallèlement le poids et le prix de la batterie; on pourra évidemment choisir un type d'accumulateurs intermédiaire entre les deux que nous avons considérés.

486. — En refaisant les calculs pour une vitesse de 4 nœuds ou de 10 nœuds, on trouverait les résultats sui-

vants, en adoptant pour les accumulateurs un débit de 2 ampères et une capacité de 10 ampères-heure par kilogramme de plaques.

	VITESSE.		
	4 NŒUDS.	6 NŒUDS.	10 NŒUDS.
Poids des plaques d'un élément, en kilogr.	7,4	25	115
Poids total d'un élément.	11	38	170
Poids total de la batterie.	440	1520	6800
Prix approximatif de la batterie, en francs	1200	3600	16000
Durée du parcours, en heures	6,4	6,4	6,4

On voit que le poids de la batterie et son prix croissent très vite avec la vitesse (proportionnellement au cube de la vitesse), et que la propulsion électrique n'est actuellement pratique que pour les faibles vitesses, ne dépassant pas 7 à 8 nœuds. Le poids de 6800 kilogr. pour la batterie correspondant à 10 nœuds est déjà de beaucoup supérieur au déplacement d'une embarcation de petites dimensions telle que celle qui nous occupe.

487. — A ce point de vue, le problème de la navigation électrique est très différent de celui de la traction électrique sur terre. Cela tient à ce que, sur terre, l'effort de traction est à peu près indépendant de la vitesse, au moins pour les vitesses moyennes; pour les grandes vitesses, la résistance de l'air intervient, de sorte que l'effort de traction augmente avec la vitesse, mais peu rapidement. Dans le cas de la navigation, l'effort de traction doit augmenter proportionnellement au carré de la vitesse. La puissance utile à développer croît donc, pour la traction sur terre, ou plus exactement sur voie ferrée, un peu plus vite que la vitesse et cette puissance croît proportionnellement *au cube* de la vitesse dans le cas des bateaux. On peut donc faire réaliser aux locomotives,

pourvu qu'on leur donne une stabilité suffisante, une vitesse très grande ; il suffit pour cela de leur appliquer une très grande puissance motrice. Pour communiquer une grande vitesse aux bateaux, il faut appliquer au propulseur une puissance extrêmement grande.

Aussi, alors que les locomotives à vapeur font couramment 80 à 90 kilomètres à l'heure et que, ainsi que nous l'avons dit, le manque de stabilité seul empêche d'aller plus vite (456), les bateaux à vapeur ne dépassent guère 35 à 40 kilomètres. On pourra augmenter la vitesse des locomotives et la porter à 150 ou 200 kilomètres en leur appliquant la traction électrique ; il y aura toujours un maximum de vitesse pour les bateaux, avec l'électricité, comme avec la vapeur. Ce maximum de vitesse aura, il est vrai, une valeur de plus en plus grande, à mesure que les machines motrices auront une *puissance spécifique* plus grande, mais, pour une espèce de machine donnée, ce maximum existera toujours. Nous avons vu d'ailleurs qu'en ce qui concerne les embarcations, ce maximum de vitesse est actuellement assez faible, quand on emploie la propulsion électrique.

488. Electromoteur. — L'électromoteur sera défini comme il suit : il devra développer sur l'arbre une puissance mécanique utile de 2369 watts ou 3 chevaux, avec un courant de 39 ampères et une différence de potentiel aux bornes de 76 volts ; la vitesse de l'induit du moteur sera, par exemple, de 1200 tours par minute. Nous verrons dans un chapitre spécial comment le constructeur procède pour établir le moteur dont les conditions sont ainsi posées (536). Il est clair qu'on désirera aussi que le moteur n'éprouve que de faibles variations de vitesse sous l'influence des variations de charge, inévitables en particulier lorsque l'embarcation navigue en mer et tangue tant soit peu ; on aura le plus souvent recours à l'excitation en dérivation, qui donne d'ailleurs tant de facilités pour gouverner le moteur.

La vitesse de rotation sera ramenée, par exemple, à 200

tours pour l'arbre de l'hélice, au moyen d'engrenages. Il ne faut pas oublier d'ailleurs que cette vitesse du moteur, celle de l'hélice, et par suite les dimensions à donner à celle-ci, sont arbitraires. Il faut remarquer toutefois que plus la vitesse adoptée pour le moteur électrique est grande, plus sont faibles son volume et son poids. A la vitesse de 1200 tours par minute, un moteur robuste, donnant 2400 watts utiles sur l'arbre, pèse de 200 à 250 kilogr. et coûte de 800 à 900 fr.

489. — On voit que le prix et le poids de la batterie d'accumulateurs sont considérablement plus élevés que ceux du moteur électrique.

Pour des vitesses de 4 nœuds, 6 nœuds et 10 nœuds, nous trouverions approximativement :

	VITESSE.		
	4 NŒUDS.	6 NŒUDS.	10 NŒUDS.
Poids du moteur électrique, en kilogr. . .	60	200	750
Prix, en francs	300	800	2000

490. Manœuvre des embarcations électriques.

— Nous avons déjà indiqué d'une manière générale (222) comment on peut gouverner les électromoteurs.

Nous préciserons ici en faisant un choix parmi les moyens divers que nous avons alors indiqués comme possibles. Nous avons déjà montré les inconvénients du couplage des accumulateurs autrement qu'en tension. Nous ne pensons donc pas qu'il soit recommandable de faire, par exemple, varier la vitesse de l'électromoteur et du bateau en modifiant le couplage de la batterie, et nous conseillons d'agir exclusivement sur l'électromoteur.

Le moteur sera excité en dérivation et un rhéostat de ré-

glage servant en même temps de rhéostat de démarrage sera intercalé dans le circuit de l'induit, les extrémités du circuit inducteur restant directement reliées aux deux bornes de la batterie d'accumulateurs; un interrupteur sera placé sur le circuit d'excitation et le commutateur du rhéostat de réglage servira également à rompre le circuit de l'induit.

Ce commutateur permettra aussi d'inverser le sens du courant dans l'induit pour produire les renversements de marche. A cet effet, le moteur électrique aura été construit de manière à ne pas présenter de décalage des balais (231). Ces derniers seront en charbon, de façon à ne pas se rebrousser, quel que soit le sens de la rotation.

Enfin, le commutateur-inverseur mettra l'induit en court-circuit en même temps qu'il interrompra le courant venant des accumulateurs.

491. — Nous avons, à diverses reprises, indiqué l'emploi de semblables commutateurs et représenté quelques dispositifs employés (*fig. 77 et 80*) pour faire commodément varier la vitesse du moteur électrique, par l'introduction de résistances variables dans le circuit de l'induit et pour mettre l'induit en court-circuit au moment de l'arrêt, soit directement, soit avec interposition d'une résistance convenable.

492. — On peut objecter à cette manière de gouverner le moteur électrique d'une embarcation que, dans le cas des faibles vitesses, une résistance assez importante étant introduite dans le circuit de l'induit, on perd par échauffement de cette résistance une notable fraction de la puissance développée par la batterie d'accumulateurs; cette perte est réelle, mais, tout d'abord, il ne faut pas oublier que nous nous occupons ici d'embarcations électriques destinées à marcher régulièrement à leur vitesse de route; les changements de vitesse ne sont réclamés que pour la mise en route, ou pour l'accostage, et la perte qui résulte de ces courtes périodes à faible vitesse est insignifiante.

Ensuite, lorsque, pour éviter cette perte, on préconise le couplage des accumulateurs en quantité, ce qui diminue la différence de potentiel aux bornes de l'électromoteur et la vitesse, on oublie trop souvent que ce couplage des accumulateurs en quantité, peu recommandable au point de vue de la conservation de la batterie et de la facilité d'élimination des éléments défectueux (483), entraîne aussi des pertes par suite des décharges partielles des accumulateurs les uns dans les autres, en circuits locaux. D'après M. Darieus, un même nombre d'accumulateurs *neufs*, toujours chargés de la même manière, mais successivement couplés en tension ou en quantité, pour la décharge, ont rendu une quantité d'énergie inférieure de 22 p. 100 avec le couplage en quantité. Cette perte s'accroîtra encore lorsque, les accumulateurs n'étant plus neufs, les différences dans leurs forces électromotrices s'accroîtront.

Il faut ajouter encore que le couplage des accumulateurs en quantité diminue bien la différence de potentiel entre les extrémités de l'induit du moteur, ce qui, assurément, est une bonne manœuvre pour diminuer la vitesse ; mais que, si le moteur est excité en dérivation, l'excitation des inducteurs est en même temps diminuée, ce qui, comme nous l'avons vu (240), tend à augmenter la vitesse et rend certainement moins grand l'effet qu'on a voulu produire. Nous avons indiqué qu'il est logique, lorsqu'on fait varier la différence de potentiel à l'induit, de conserver la même différence de potentiel aux inducteurs et signalé un exemple de cette manière de faire (250, 443, 446).

493. Premiers essais de canotage électrique. —

Les premières embarcations électriques datent de loin. Jacobi, dès 1838, construisit un moteur électrique destiné à la propulsion d'un bateau ; le moteur était alimenté par des piles chimiques.

En 1881, on pouvait voir, à l'Exposition d'électricité de Paris, naviguer le petit bateau électrique de M. Trouvé.

Au mois de septembre 1882, le canot *Electricity* faisait sur la Tamise un voyage intéressant.

Mais il faut arriver à l'année 1886 pour trouver, avec le *Volta*, un essai de navigation électrique en mer effectué dans de bonnes conditions.

494. Le « Volta ». — Le *Volta* était une chaloupe en tôle d'acier, de 11,2 m de longueur et 2 m de largeur, ayant pour propulseur une hélice de 60 cm de diamètre et 27,5 cm de pas.

Cette hélice fut accouplée directement à un moteur double système Reckenzaun disposé pour tourner à trois vitesses : petite, moyenne et grande vitesse. Pour la petite vitesse, les deux moteurs étaient couplés en série ; pour la vitesse moyenne, un seul moteur est employé, et pour la grande vitesse, les moteurs sont couplés en quantité ; ces divers couplages, ainsi que la mise en marche et le stoppage, étaient produits par la manœuvre d'un seul commutateur, au moyen d'une poignée unique. Les inversions de marche étaient effectuées par la manœuvre d'un commutateur spécial, lequel inversait le courant dans les induits.

Les moteurs avaient 1,15 m de longueur, 0,52 m de largeur, 0,33 m de hauteur et pesaient 330 kg chacun ; ils étaient placés à l'arrière et fixés sur la quille. Ils donnaient, à la plus grande vitesse, 1000 tours par minute et 600 tours seulement à petite vitesse.

Les accumulateurs, au nombre de 61, du type E. P. S., pesaient environ 2 tonnes ; ils étaient disposés le long de la quille, sous un faux-pont.

A petite vitesse, le courant produit par les accumulateurs étant d'environ 28 ampères, la petite chaloupe a effectué en 3 heures 41 minutes la traversée de Douvres à Calais.

Au retour, de Calais à Douvres, l'intensité du courant étant tombée à 25 ampères, par suite de la diminution de la force électromotrice des accumulateurs, le voyage a duré 4 heures 15 minutes.

495. Canot électrique de la marine française.

— En septembre 1887 fut expérimenté au Havre le premier canot électrique de la marine française. Ce canot, qui n'est plus en service actuellement, est, en réalité, un type de canot à vapeur ordinaire, dont on aurait remplacé la chaudière et la machine à vapeur par des accumulateurs et un électromoteur. Il mesure 8,85 m de longueur entre perpendiculaires, 2,8 m au maître-bau et jauge environ 5 tonneaux ; il a, comme les canots à vapeur de son espèce, des formes lourdes faites pour la mer. L'hélice a 0,55 m de diamètre.

L'électromoteur a été combiné par M. Krebs ; il est à 12 pôles et tourne à 850 tours par minute, cette vitesse étant ramenée à 280 tours pour l'hélice ; le moteur est excité en série.

La batterie d'accumulateurs comprenait 132 éléments, du type Desmazures, et pesait environ 2000 kg. Chaque élément ayant 11 kg de plaques, pesait brut, avec les liquides, 15 kg ; il donnait aux bornes une différence de potentiel de 0,78 volt et pouvait débiter 87 à 89 ampères, avec une capacité de 440 ampères-heure.

Les 132 accumulateurs étaient disposés en 3 caisses de 44 chacune ; un commutateur permettait d'effectuer différents couplages de ces trois batteries et d'obtenir quatre vitesses différentes.

Aux essais, on a obtenu une vitesse de 6 nœuds pendant 6 heures.

496. Bateaux électriques de la Tamise. — La

maison Immisch a installé en 1888 sur la Tamise une station de bateaux électriques de plaisance. La barque-station, de faible tirant d'eau, a 21 m de long et jauge 50 tonneaux. L'installation électrique comprend une machine à vapeur de 50 chevaux environ, actionnant deux dynamos Immisch excitées en dérivation, pouvant fournir un courant de 180 ampères, sous 50 à 100 volts. Cette station génératrice fournit l'énergie électrique nécessaire pour la charge des accumula-

teurs de chaloupes électriques louées au public. Les embarcations reçoivent à chaque charge une quantité d'énergie suffisante pour le service d'une journée.

Une des chaloupes en service, la *Malden*, a 9 m de longueur et 1,4 m au maître-couple ; son tirant d'eau est de 0,75 m et son déplacement, avec 6 à 8 personnes à bord, d'environ 2,5 tonnes. Le moteur électrique, de 3 chevaux environ, tourne à 650 tours par minute et commande directement l'hélice. Les accumulateurs sont au nombre de 48.

Cinq chaloupes électriques de 11 m de longueur se louent 260 fr. par jour et le coût du rechargement des accumulateurs est de 21 fr.

497. Chaloupes électriques du canal de l'Union.

— Sur le canal de l'Union, la *General Electric Power and Traction Company* a établi, à l'occasion de l'Exposition d'Édimbourg en 1890, un service de bateaux électriques. Ces bateaux, au nombre de 4, sont en acier, mesurent 12,20 m de longueur totale, 1,82 m au maître-bau, 0,935 m du bord à la quille, avec un tirant d'eau de 0,634 m à vide. Leur poids est de 3,5 tonnes, hors de l'eau, en y comprenant moteur et accumulateurs ; ils peuvent transporter 40 passagers au maximum.

La batterie d'accumulateurs comprend 50 éléments du type E. P. S., d'une capacité de 120 ampères-heure, se chargeant à 30 ou 40 ampères et pouvant débiter 40 ampères. Chaque élément pèse brut 26,3 kg. La batterie, divisée en deux groupes de 25 en série, est placée dans des boîtes servant de bancs pour les voyageurs.

L'électromoteur du type Immisch pèse 160 kg ; il comprend un induit en forme de tambour Siemens, ayant 48 sections, une résistance égale à 0,3 ohm et 4 électro-aimants inducteurs associés en tension entre eux, mais placés en dérivation sur l'induit ; la résistance du circuit-inducteur est de 18 ohms.

Les chaloupes sont prévues pour une vitesse de 6 milles à

l'heure; les 50 accumulateurs sont alors tous associés en série, donnant une différence de potentiel de 95 volts environ et une intensité de courant de 34 ampères.

On peut réduire la vitesse à 4,5 milles, en couplant en quantité les deux séries de 25 accumulateurs en tension; le voltage aux bornes étant alors 48 volts et l'intensité du courant 24 ampères. La vitesse de l'induit du moteur et de l'hélice est, dans ces conditions, de 510 tours par minute.

Un commutateur permet de produire à volonté les deux couplages.

Un second commutateur introduit dans le circuit une résistance plus ou moins grande pour le démarrage ou pour le stoppage.

Un troisième sert à renverser le courant dans l'induit, pour le changement de marche.

La manœuvre ne laisse pas, on le voit, que d'être assez compliquée et pourrait entraîner des erreurs, qu'on a cherché à éviter en établissant un verrouillage entre les leviers de manœuvre de ces trois commutateurs.

L'hélice a 0,48 m de diamètre; elle est montée directement sur l'arbre de l'électromoteur; on évite ainsi toute transmission.

La charge des accumulateurs des bateaux se fait, pendant la nuit, au moyen de dynamos Immisch, excitées en dérivation et pouvant donner, à la vitesse de 750 tours par minute, 130 volts et 120 ampères. Pour la charge, les 50 accumulateurs d'un bateau sont mis en tension et les batteries des 4 bateaux sont mises en dérivation entre les bornes de la dynamo génératrice.

Le courant moyen de charge est établi à 22 ampères pour chaque batterie; les accumulateurs ayant une capacité d'environ 120 ampères-heure, il faut de 6 à 7 heures pour les charger.

A la vitesse de 4,5 milles, le courant de décharge total de la batterie d'un bateau étant 24 ampères, soit 12 ampères pour chacune des deux demi-batteries placées en quantité, la

durée de fonctionnement d'un bateau peut être d'une dizaine d'heures.

498. L' « Éclair ». — En août 1892, la chaloupe électrique *Éclair*, construite par MM. Woodhouse et Rawson, a fait sa première excursion sur la Seine.

Elle a 11 m de longueur, 1,80 m de largeur et 40 cm de tirant d'eau. Elle peut contenir 20 personnes et marcher à la vitesse de 12 km par heure pendant 6 heures.

Le moteur qui l'actionne a une puissance de 3 chevaux ; il est alimenté par une batterie de 40 accumulateurs, système Epstein, ayant chacun 17,5 kg de plaques et pesant brut 24 kg, soit 960 kg pour la batterie entière. La capacité des accumulateurs est de 160 ampères-heure et le débit de 25 à 30 ampères pendant la marche à grande vitesse ; le régime de charge varie de 40 à 50 ampères.

Les 40 accumulateurs sont partagés en deux séries de 20 chacune, que l'on couple en tension pour la grande vitesse et en quantité pour obtenir une vitesse réduite. La mise en marche à grande ou petite vitesse, l'arrêt et la marche en arrière sont obtenus par la manœuvre d'un seul levier.

A grande vitesse, le moteur, avec balais en charbon, donne 800 tours par minute.

La charge des accumulateurs coûte de 12 à 15 fr. La location du bateau pour une journée coûte 100 fr.

499. Le « P'tit Bob ». — Nous donnons encore ici le moteur électrique à anneau Gramme (*fig. 109*) actionnant l'embarcation électrique du commandant Chapelle et dont voici les principales données de construction et de fonctionnement :

Diamètre de l'induit	15 cm
Poids de l'électromoteur.	110 kg
Intensité du courant	10 ampères
Différence de potentiel aux bornes.	100 volts

Vitesse de l'induit, par minute	1700 tours
Puissance développée	1 cheval
Rendement de l'électromoteur	0,74

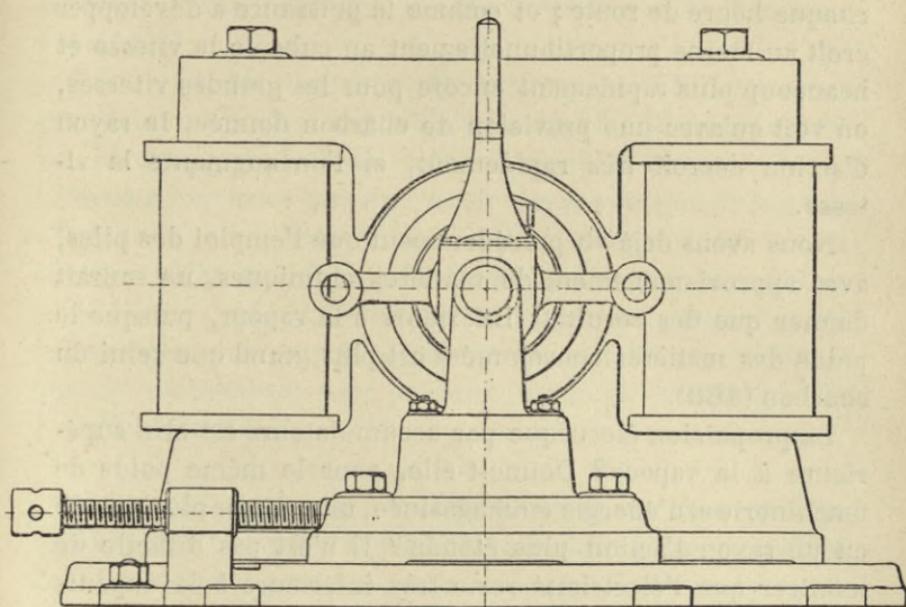


Fig. 109. — Électromoteur du canot électrique le *Petit Bob*. Échelle $\frac{1}{5}$.

BATEAUX ÉLECTRIQUES DE GRANDES ET MOYENNES DIMENSIONS

500. Considérations générales. — Lorsqu'il s'agit, non plus d'embarcations, mais de bateaux d'un certain tonnage, il faut, pour juger de la valeur de la source d'énergie employée à la propulsion, l'examiner, d'une manière générale, à trois points de vue différents : économie, vitesse et rayon d'action.

Les grands bateaux sont faits pour aller vite, pour aller loin, tout en coûtant le meilleur marché possible.

Pour les navires de guerre, en particulier, la question du rayon d'action, autrement dit du nombre de milles que le ba-

teau peut faire sans être obligé de renouveler sa provision d'énergie, est des plus importantes et nous n'avons pas besoin de le démontrer. Malheureusement, avec les bateaux à vapeur, si l'on va vite, on consomme beaucoup de charbon par chaque heure de route ; et comme la puissance à développer croît au moins proportionnellement au cube de la vitesse et beaucoup plus rapidement encore pour les grandes vitesses, on voit qu'avec une provision de charbon donnée, le rayon d'action décroît très rapidement, si l'on augmente la vitesse.

Nous avons déjà vu précédemment que l'emploi des piles, avec approvisionnement de matières chimiques, ne saurait donner que des résultats inférieurs à la vapeur, puisque le poids des matières consommées est plus grand que celui du charbon (460).

La propulsion électrique par accumulateurs est-elle supérieure à la vapeur ? Donne-t-elle, pour le même poids de machinerie et d'énergie emmagasinée, une vitesse plus grande ou un rayon d'action plus étendu ? Il n'est pas difficile de montrer que l'électricité reste très inférieure à la vapeur, même avec l'emploi des accumulateurs, si le rayon d'action qu'on veut obtenir est un peu grand.

En effet, nous avons dit que les accumulateurs électriques ont actuellement une capacité tout au plus égale à 20 ampères-heure par kilogramme de plaques, avec un courant de décharge de 1 ampère par kilogramme et que cette capacité diminue, si le courant de décharge est augmenté, et qu'en tout cas, le débit ne doit guère dépasser 2 ampères par kilogramme, d'une manière courante. Admettons que nous puissions trouver des accumulateurs pouvant donner 15 ampères-heure, avec un débit de 2 ampères *par kilogramme de poids brut*. Ce sont là des chiffres juxtaposés très favorables, bien au-dessus de ceux qu'on peut atteindre à la fois actuellement, si l'on veut que les accumulateurs puissent durer quelque temps.

Supposons de plus que la différence de potentiel aux bor-

nes d'un accumulateur soit égale à 2 volts, chiffre encore évidemment trop élevé.

Il en résultera que 1 kg *de poids brut* d'une batterie d'accumulateurs pourra fournir un travail électrique de 15×2 ou 30 watts-heure, avec une puissance électrique de 2×2 ou 4 watts.

Une puissance électrique de 1 cheval, ou 736 watts, exigera donc un poids d'accumulateurs égal à 184 kg et un travail électrique de 1 cheval-heure demandera 24 kg.

Nous admettrons que l'on ne tienne pas compte de la perte d'énergie due à la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique dans l'électromoteur et que les chiffres de 184 kg et de 24 kg représentent les poids d'accumulateurs nécessaires pour pouvoir développer une puissance mécanique de 1 cheval ou pour produire un travail mécanique de 1 cheval-heure.

501. — Il résulte de la comparaison de ces deux chiffres que le poids d'accumulateurs correspondant à une puissance de 1 cheval peut produire un travail de 7,7 chevaux-heure, ou celui d'une puissance de 1 cheval pendant 7,7 heures.

D'une manière générale, si l'on a installé une batterie d'accumulateurs pour développer une puissance de P chevaux, son poids sera $P \times 184$ kg. Or, ce poids d'accumulateurs correspond à un travail de $P \times 7,7$ chevaux-heure, c'est-à-dire au travail de la puissance de P chevaux pendant 7,7 heures.

Autrement dit, dans les conditions très favorables où nous nous sommes placés, lorsqu'une batterie d'accumulateurs aura été calculée pour développer exactement la puissance nécessaire à la propulsion d'un navire à la vitesse prévue, cette vitesse ne pourra être maintenue que pendant 7,7 heures. La durée du parcours ne pourra être augmentée que si la puissance de la batterie est supérieure à celle correspondant à la vitesse de marche, soit qu'on ait à cet effet embarqué une batterie bien plus puissante que celle qui était néces-

saire pour produire la vitesse prévue, soit que la vitesse de marche soit inférieure à la vitesse pour laquelle l'installation a été calculée. Ainsi, pour marcher pendant un jour, il faut un poids d'accumulateurs approximativement triple de celui correspondant à la vitesse de marche, ce qui porte le poids d'accumulateurs par cheval à 552 kg au lieu de 184 kg. Pour marcher pendant deux jours, il faudrait une batterie pesant 6×184 ou 1104 kg par cheval de puissance nécessaire.

502. Navires de commerce. — On voit tout de suite combien la propulsion électrique est inférieure à la propulsion par la vapeur quand il s'agit de bateaux marchant régulièrement et continuellement à une vitesse voisine de celle pour laquelle ils ont été construits, comme font les bâtiments de commerce en général et les paquebots en particulier.

Les chaudières d'un bateau à vapeur à haute pression pèsent 50 kg au maximum par cheval ; les machines à vapeur pèsent également 50 kg par cheval au maximum.

Par conséquent, pour réaliser une certaine vitesse, c'est-à-dire pour développer une puissance de P chevaux, l'ensemble des chaudières et des machines pèsera au maximum $P \times 100$ kg.

Les moteurs électriques pèsent, au minimum, 40 kg par cheval ; comme nous avons vu que la batterie d'accumulateurs pèse au minimum 180 kg par cheval, l'ensemble de la machinerie électrique pèsera au minimum 220 kg par cheval.

Donc, pour une même puissance développée P, le poids des appareils électriques sera $P \times 220$ kg, c'est-à-dire plus de deux fois plus grand que celui des appareils à vapeur.

Avec ce poids deux fois plus grand, la propulsion électrique ne pourra durer à la vitesse prévue que moins de 8 heures ; or, 1 kg de charbon peut toujours produire un travail de 1 cheval pendant 1 heure et par conséquent la différence entre les poids $P \times 220$ et $P \times 100$, c'est-à-dire $P \times 120$ kg, étant compensée par le charbon embarqué sur le bateau à va-

peur, celui-ci pourrait produire un travail de $P \times 120$ chevaux-heure, c'est-à-dire développer la puissance P et la vitesse correspondante pendant 120 heures.

Ainsi, quand le poids du charbon embarqué sur le bateau à vapeur, ajouté au poids des machines et des chaudières, donne un total égal au poids des accumulateurs et des électromoteurs du navire électrique, alors que ce dernier ne peut maintenir sa vitesse que pendant moins de 8 heures, le bateau à vapeur peut naviguer 120 heures, c'est-à-dire 15 fois plus longtemps.

503. — La différence s'accuse encore davantage si l'on veut augmenter la durée du parcours pour le bateau électrique. Comme nous l'avons dit, pour permettre à celui-ci de naviguer pendant 24 heures, il faut approximativement tripler le poids d'accumulateurs embarqués, le poids des électromoteurs restant le même, de sorte que pour une vitesse correspondant à une puissance de P chevaux, le poids total de la machinerie électrique sera

$$3P \times 180 + P \times 40 = P \times 580 \text{ kg.}$$

Le poids de la machinerie à vapeur restant $P \times 100$, on peut embarquer sur ce dernier, pour équilibrer les poids, un poids de charbon de $P \times 480$ kg, c'est-à-dire de quoi entretenir la puissance P pendant 480 heures, ou 20 jours.

504. — En réfléchissant un peu, on voit vite que ces résultats comparatifs n'ont rien d'extraordinaire.

Pour produire 1 cheval-heure en supplément du travail qu'est capable de produire déjà la batterie d'accumulateurs correspondant exactement à la puissance P , on est obligé d'augmenter le poids de la batterie de 24 kg. D'autre part, pour produire 1 cheval-heure sur le bateau à vapeur, il suffit d'embarquer 1 kg de charbon, c'est-à-dire un poids *vingt-quatre fois moindre*. De sorte que, si l'on voulait accroître en-

core le rayon d'action du navire électrique, on verrait que le rayon d'action du bateau à vapeur tendrait, pour le même poids, à devenir 24 fois plus grand.

Il faut ajouter, pour être complet, que le poids de la batterie d'accumulateurs et des électromoteurs reste constant pendant toute la durée du parcours et qu'au contraire le poids embarqué sur le bateau à vapeur diminue de toute la quantité de charbon brûlé.

505. Navires de guerre. — L'infériorité de la propulsion électrique n'est pas moins évidente, si l'on considère le rayon d'action d'un navire construit pour une vitesse V , mais prenant comme vitesse de route une vitesse V' bien inférieure. C'est le cas des croiseurs, avisos et torpilleurs qui n'utilisent la grande vitesse qu'ils peuvent développer que dans des occasions particulières, pour attaquer ou se défendre, et marchent le reste du temps à une vitesse réduite.

Il semble qu'alors la batterie d'accumulateurs, ayant été prévue pour la vitesse maximum, devra pouvoir alimenter l'électromoteur pendant un temps assez long à vitesse réduite, sans qu'on ait besoin de majorer le poids de la batterie. Cela est vrai ; mais, pour le bateau à vapeur aussi, le charbon embarqué permettra un parcours considérablement plus long à petite vitesse qu'à la vitesse maximum. Pour mieux préciser, prenons un exemple. Supposons un croiseur-torpilleur comme le croiseur anglais *Archer*, dont le déplacement est 1630 tonneaux et qui, avec une puissance de machines de 3500 chevaux, a donné une vitesse de 18,2 nœuds¹.

Ce croiseur renferme normalement dans ses soutes 325 tonnes de charbon et cet approvisionnement peut même être porté à 500 tonnes.

1. H. Buchard, *Torpilles et torpilleurs des nations étrangères*. Berger-Levrault et C^{ie}. 1889.

A la vitesse de 15 nœuds, il peut parcourir, avec sa provision normale de charbon, 2500 milles et 7000 milles à la vitesse de 10 nœuds.

Nous ne possédons pas les chiffres relatifs aux poids des chaudières et des machines à vapeur de ce bateau, mais nous serons certainement au-dessus de la vérité en supposant 100 kg par cheval, chaudières et machines réunies.

En partant de la puissance de 3500 chevaux pour une vitesse de 18,2 nœuds, nous pouvons approximativement admettre une puissance de 1800 chevaux pour 15 nœuds et de 600 chevaux pour 10 nœuds. Ces chiffres peuvent s'écarter de la vérité de 20 p. 100 peut-être, mais la comparaison entre la propulsion par la vapeur et la propulsion électrique nous conduira à des chiffres si différents que les conclusions ne peuvent être altérées par l'erreur possible de nos évaluations. Rappelons d'ailleurs que nous avons pris le poids minimum pour la machinerie électrique et le poids maximum pour les appareils à vapeur.

En partant de ces données et en prenant toujours 220 kg comme poids nécessaire pour obtenir la puissance de 1 cheval dans le cas de la propulsion électrique, le poids des accumulateurs étant 180 kg et celui du moteur 40 kg, nous voyons d'abord que pour réaliser la puissance maximum de 3500 chevaux correspondant à la vitesse de 18,2 nœuds, il faudra mettre à bord une batterie d'accumulateurs de 630 tonnes et un électromoteur de 140 tonnes, soit au total au moins 770 tonnes; le poids des machines à vapeur et des chaudières n'atteint certainement pas 350 tonnes; avec l'approvisionnement de charbon, on a donc un poids inférieur à 675 tonnes.

Il en résulte donc tout d'abord une grande infériorité de l'électricité sur la vapeur au point de vue des poids embarqués. Comparons maintenant les rayons d'action.

Une batterie d'accumulateurs de 630 tonnes peut produire, à raison de 24 kg le cheval-heure, un travail de 26 262 chevaux-heure; comme la vitesse de 15 nœuds réclame une

puissance de 1800 chevaux, la durée du parcours à 15 nœuds pourra être de 14,6 heures, ce qui correspond à une distance parcourue de 219 milles seulement, au lieu des 2500 milles obtenus avec la vapeur.

A la vitesse de 10 nœuds, la puissance étant seulement de 600 chevaux, la durée du parcours que pourra produire la batterie d'accumulateurs sera portée à 43,8 heures et la distance parcourue à 438 milles, nombre hors de proportion avec les 7000 milles obtenus avec la vapeur.

506. — La différence s'accroîtra encore, si on embarque, d'une part, sur le bateau à vapeur les 175 tonnes de charbon en supplément d'approvisionnement que l'on peut y mettre, et, d'autre part, si on suppose le poids de la batterie d'accumulateurs accru de 175 tonnes, toujours pour la raison que nous avons donnée, que 1 kg de charbon développe au moins 1 cheval-heure et que 1 kg d'accumulateurs donne au plus $\frac{1}{24}$ de cheval-heure.

Si l'on voulait réaliser un parcours de 7000 milles à 10 nœuds avec l'électricité, puisque la puissance nécessaire est de 600 chevaux et que chaque mille parcouru correspond dès lors à un travail de $\frac{1}{10} \times 600$ ou 60 chevaux-heure, il faudrait que la batterie d'accumulateurs pût produire un travail total de 60×7000 ou 420000 chevaux-heure. En comptant toujours 24 kg par cheval-heure, le poids de la batterie devrait être porté à 420000×24 kg ou 10000 tonnes. Ce chiffre véritablement fantastique montre combien la propulsion électrique par accumulateurs est encore loin de pouvoir prétendre à la haute navigation.

507. — Si l'on s'en tient même aux petits navires tels que les torpilleurs, il n'est pas difficile de voir que la vapeur reste de beaucoup supérieure à l'électricité.

Considérons, par exemple, un torpilleur de 80 tonneaux dont les caractéristiques seraient les suivantes :

Longueur	36	m
Largeur	4	m
Surface immergée du maître-couple.	3,37	m ²
Déplacement	80	tonnes
Charbon.	20	tonnes
Eau.	7	tonnes
Vitesse maximum	21	nœuds
Puissance maximum de la machine	900	chevaux-vapeur
Poids de la machine	12,3	tonnes
Poids de la chaudière vide.	11,3	tonnes
Poids de l'eau de la chaudière	4,7	tonnes.

Pour obtenir électriquement la vitesse de 21 nœuds, c'est-à-dire pour développer une puissance de 900 chevaux, il faudrait, à raison de 180 kg par cheval, une batterie d'accumulateurs de 162 tonnes et un moteur électrique de 36 tonnes, en comptant toujours 40 kg par cheval.

Avec ce poids énorme de 198 tonnes pour l'appareil moteur, bien supérieur au déplacement, le bateau électrique ne pourrait cependant maintenir la vitesse maximum que pendant 7 heures environ, alors que les 20 tonneaux de charbon embarqués sur le bateau à vapeur permettraient de maintenir la vitesse maximum pendant 22 heures environ, puisque la consommation de charbon, même pour ces vitesses considérables, ne dépasse guère 1 kg par cheval et par heure.

A la vitesse de 12 nœuds, la consommation de charbon par cheval-heure n'est plus que 0,650 kg; avec la puissance correspondante d'environ 120 chevaux, la vitesse de 12 nœuds pourrait être maintenue pendant environ 250 heures. La batterie d'accumulateurs de 162 tonnes ne pourrait entretenir

cette puissance de 120 chevaux et la vitesse correspondante de 12 nœuds que pendant 56 heures au plus, en comptant toujours 24 kg par cheval-heure.

508. — Il ne faut pas oublier, et ceci est applicable à tous les navires, que, si le bateau à vapeur consomme visiblement du charbon qu'il faut payer, la charge des accumulateurs en consomme bien davantage, comme nous l'avons montré (480), et que, d'autre part, la charge de la batterie nécessaire à un navire d'un tonnage même pas très élevé, tel que celui d'un torpilleur, exigerait un matériel à terre, en dynamos et machines à vapeur, d'une importance exagérée, dont le prix viendrait encore singulièrement accroître l'infériorité économique de l'emploi de l'électricité comme agent de propulsion.

509. Bateaux de plaisance. — L'importance du rayon d'action semble disparaître presque entièrement s'il s'agit de bateaux de plaisance, puisque la nécessité ne s'impose pas ici d'une manière absolue de pouvoir faire de longs voyages sans se réapprovisionner en énergie. Mais les bateaux électriques de plaisance ne peuvent cependant guère s'éloigner de leur port d'attache et entreprendre de longs voyages. En admettant même qu'il leur fût toujours possible de relâcher toutes les 10 ou 12 heures, pour recharger leurs accumulateurs, comme l'exigent les batteries dont on n'a pas voulu augmenter outre mesure le poids, il faudrait encore qu'ils fussent assurés de trouver aux points de relâche une station électrique génératrice de puissance suffisante, ce qui sera d'autant moins probable que le bateau sera plus grand. On est, au contraire, assuré de trouver du charbon dans presque tous les ports. De sorte que si, en effet, pour les bateaux à vapeur de plaisance naviguant sur les côtes, il n'est pas indispensable que le nombre de milles parcourus sans relâche soit bien considérable, cela est nécessaire pour les bateaux électriques et c'est précisément pour ceux-ci qu'il est

difficile, sinon impossible, d'avoir actuellement un grand rayon d'action, en raison du poids énorme d'accumulateurs qu'il faudrait alors embarquer.

510. — Par conséquent, la navigation électrique, qu'elle se fasse au moyen de piles ou au moyen d'accumulateurs, n'est possible (nous ne disons pas qu'elle est économique) même pour les navires d'un tonnage plus élevé que celui des embarcations, qu'ils soient navires de commerce, de guerre ou de plaisance, que dans une zone peu étendue autour du port d'attache ; la durée du parcours est limitée à une douzaine d'heures.

L'emploi de l'électricité est très onéreux pour les bateaux un peu grands. Aussi la propulsion électrique reste-t-elle limitée aux petits bateaux faisant un service de plaisance ou de voyageurs sur des rivières ou lacs et dans des rades.

Nous allons indiquer une application de ce genre constituant une curiosité dont l'exploitation est plus ou moins rémunératrice.

511. Le « Zurich ». — Le *Zurich* est un petit bateau en acier pouvant porter 100 personnes. Sa longueur à la flottaison est de 15 m et de 16 m sur le pont. Sa plus grande largeur est 3,10 m, sa hauteur 1,40 m et son tirant d'eau moyen 1,10 m. Il est ponté.

L'hélice a 70 cm de diamètre ; elle est actionnée directement par une dynamo Brown de 10 chevaux, tournant à la vitesse de 350 tours par minute.

La batterie d'accumulateurs comprend 56 éléments du type Oerlikon en tension, d'une capacité de 450 ampères-heure et pouvant débiter 80 ampères. La batterie entière pèse environ 5 tonnes.

Les accumulateurs et le moteur sont logés dans la cale.

Le pilote a sous les yeux un voltmètre et un ampèremètre, sous la main un commutateur manœuvrant le rhéostat de

réglage du moteur et le commutateur de changement de marche. Il manœuvre également le gouvernail.

L'électromoteur absorbant 75 ampères, avec une différence de potentiel aux bornes de 102 volts, fait 365 tours par minute et imprime au bateau une vitesse de 12 km à l'heure. Avec 58 ampères, la vitesse est de 11 km.

NAVIGATION ÉLECTRIQUE SOUS-MARINE

512. Généralités. — La rame, l'air comprimé, la vapeur réchauffée et le courant électrique ont été successivement essayés pour la propulsion des bateaux sous-marins. Nous n'avons pas l'intention de comparer ici les divers modes de propulsion. Chaque système, en dehors, bien entendu, de la rame, a ses partisans et la question est des plus controversées. Pour dire vrai, la navigation sous-marine, quoique les premiers essais datent de 1801 avec Fulton, n'est guère avancée.

C'est qu'en dehors de la propulsion proprement dite, d'autres problèmes doivent être résolus, tels que la submersion, la navigation à une profondeur déterminée et constante et surtout la direction de la route dans le plan horizontal. On se heurte ici, en effet, à la grande difficulté, pour ne pas dire à l'impossibilité de voir dans l'eau, surtout si la surface est quelque peu agitée. Le bateau sous-marin, quand il navigue complètement immergé, est *un aveugle*. La seule méthode qui ait jusqu'à présent donné des résultats satisfaisants, au point de vue du contrôle de la route, c'est de naviguer à fleur d'eau, avec un observatoire émergeant de la surface, au moyen duquel le pilote, soit directement, soit par un système quelconque de miroirs, peut gouverner le bateau à la manière ordinaire ; puis, avant de plonger, de choisir une route rectiligne, que l'on maintiendra après l'immersion complète, grâce à l'observation d'un compas d'un nouveau genre, le *gyroscope* ; des retours successifs à la surface per-

mettent de rectifier la route, ou d'en changer en connaissance de cause.

Cette manière d'opérer limite singulièrement la navigation sous-marine proprement dite. En réalité, les bateaux sous-marins actuels ne sont guère que des bateaux naviguant régulièrement à fleur d'eau et n'exécutant que de courts parcours sous l'eau, plus ou moins souvent répétés. Aussi n'est-ce pas sans quelque logique que plusieurs inventeurs ont franchement adopté l'idée d'un bateau simplement *plongeur* aux moments propices pour l'attaque ou la défense.

On conçoit dès lors comment la vapeur a pu être préconisée pour un tel navire, qu'elle soit produite par la combustion du charbon ou mieux par celle du pétrole et autres hydrocarbures. La navigation normale se faisant sans que le bateau cesse d'être en communication avec l'air, cette combustion peut aisément être obtenue. Pendant cette marche à la surface, la propulsion sera demandée à des machines à vapeur. En même temps, une partie de l'énergie développée peut être emmagasinée sous une forme telle qu'on pourra la restituer aisément à l'arbre de l'hélice quand l'immersion sera complète. C'est ainsi que le *Nordenfelt* tient renfermée dans des réservoirs à la pression de 10 km/cm² de la vapeur surchauffée que la combustion du charbon entretient à une température convenable quand le bateau n'est pas immergé ; cette vapeur actionne la machine motrice quand le bateau plonge et que la combustion n'est plus possible.

La machine à vapeur peut aussi, pendant les périodes d'émersion, charger une batterie d'accumulateurs qui actionne ensuite l'arbre de l'hélice par l'intermédiaire d'un électromoteur, lorsque le bateau est sous l'eau.

513. — A côté des bateaux à propulsion mixte, dont l'agent propulseur diffère, soit par sa nature, soit par son état, suivant que ces bateaux naviguent à la surface ou sous l'eau, se placent les bateaux dont l'hélice est toujours actionnée de la même manière, quelles que soient les conditions

de la navigation. C'est alors la navigation sous l'eau seule qui doit guider pour le choix du mode de propulsion, à cause des conditions particulières qu'elle impose. *A fortiori* en est-il ainsi lorsque le bateau est un véritable sous-marin, c'est-à-dire navigue exclusivement ou presque exclusivement sous l'eau. Comme précédemment, l'énergie nécessaire sera toujours emmagasinée à bord au départ ; elle l'est d'ailleurs fatalement sur tous les navires proprement dits, quels qu'ils soient, puisqu'ils ne conservent aucun lien avec le rivage ; nous ne considérons pas, en effet, comme navires sous-marins les torpilles automobiles électriques, auxquelles des conducteurs, qui les rattachent au rivage, peuvent amener de terre l'énergie réclamée par leur propulsion.

Ici il ne peut plus être question de charbon ou d'un autre combustible dont la combustion se fasse au moyen de l'oxygène de l'air ; mais on pourra embarquer comme combustible du zinc ou du plomb, en employant pour les brûler l'oxygène contenu dans des liquides également embarqués, autrement dit, on pourra avoir recours soit à des piles ordinaires, soit à des accumulateurs électriques, qui sont des piles bien préférables aux piles proprement dites ; des réservoirs d'air ou d'autres gaz comprimés, ou de vapeur surchauffée semblent aussi pouvoir convenir comme moyens d'embarquer à bord du sous-marin de l'énergie sous une forme facilement utilisable pour la propulsion sous l'eau.

La vapeur surchauffée paraît présenter le désavantage d'entraîner, par refroidissement, une perte d'énergie qui peut être considérable, si le bateau navigue sous l'eau et si la durée de son excursion n'est pas faible. L'air comprimé n'est sujet à aucune déperdition de ce genre, si l'on admet qu'on l'emploie froid ; on ne dépense avec lui d'énergie que pour marcher et il en est de même avec des accumulateurs en bon état, au moins quand l'intervalle de temps qui s'écoule entre leur charge et leur décharge n'est pas trop considérable. Cependant il n'en faudrait pas conclure aussitôt à une impossibilité de faire usage de la vapeur surchauffée, ni même à une

infériorité absolue de ce mode de propulsion. Si cette vapeur n'est plus supposée réchauffée par la combustion à l'air libre de charbon ou d'autres combustibles analogues, elle peut parfaitement l'être sous l'eau par d'autres moyens : nous voulons parler des moyens chimiques ; rien n'empêche, à priori, d'employer dans ce but un mélange d'acide sulfurique, de sucre et de chaux, comme dans la torpille automobile Patrick, ou tout autre mélange analogue de corps produisant par leurs combinaisons une température élevée.

Nous nous contenterons, dans cet ouvrage, de signaler les bateaux sous-marins en tant que bateaux à propulsion électrique et d'indiquer sommairement les éléments électriques constitutifs de quelques-uns.

514. Éléments électriques de quelques bateaux sous-marins. — Le premier essai de bateau électrique sous-marin est dû à l'ingénieur américain Altsitt, en 1865. Actuellement, en dehors des bateaux expérimentés en Allemagne et en Italie, on compte deux bateaux électriques sous-marins en Angleterre, un en Amérique et deux en France.

Le bateau torpilleur sous-marin de M. Tuck fut expérimenté à New-York en 1884. Il a 9 m de long et déplace 20 tonneaux. Un électromoteur actionné par des accumulateurs peut, dit-on, lui communiquer une vitesse de 6 nœuds. Deux torpilles automobiles sont maintenues par des griffes de fer dépendant d'un électro-aimant ; elles s'ouvrent au moment propice ; deux conducteurs reliant les torpilles au sous-marin se déroulent et permettent de faire feu électriquement à volonté.

Le torpilleur construit à Londres en 1886 par M. Campbell a 18 m de long et déplace 60 tonneaux ; il est, comme le premier, actionné par un électromoteur alimenté par des accumulateurs.

Le torpilleur sous-marin *Waddington*, de Liverpool, a 11 m de long. Son moteur électrique est alimenté par une batterie d'accumulateurs de 45 éléments d'une capacité de 600 am-

pères-heure environ. Avec un courant de 60 ampères et une différence de potentiel de 90 volts, l'électromoteur donne à l'hélice une vitesse de 750 tours par minute et au bateau une vitesse de 6 nœuds.

La stabilité horizontale est obtenue à l'aide de gouvernails horizontaux mus par un moteur électrique dont le circuit est fermé par un pendule régulateur, dès que l'horizontalité n'existe plus.

Des torpilles automobiles accrochées aux flancs du bateau par des griffes qu'on ouvre de l'intérieur, peuvent être mises en feu électriquement à volonté.

515. — Le *Goubet* a 5 m de long et déplace environ 6 tonnes ; sa coque est en bronze fondu d'une seule pièce.

Le moteur électrique est une machine Siemens du type tramway pesant 190 kg, établie pour fonctionner avec un courant de 8,8 ampères sous une différence de potentiel de 48 volts. La vitesse communiquée au bateau est alors de 4 à 5 nœuds.

Une batterie d'accumulateurs de 42 éléments alimentait primitivement l'électromoteur. Elle a été remplacée dans la suite par une pile à oxyde de cuivre de 60 éléments.

516. — Le *Gymnote*¹ a une hélice de 1^m,5 de diamètre. L'électromoteur est à 16 pôles inducteurs disposés symétriquement autour de l'induit qui est un anneau Gramme ; celui-ci, de 1 m de diamètre, est muni d'un collecteur avec quatre balais : deux pour la marche en avant, deux pour la marche en arrière, le renversement de marche se faisant donc comme nous l'avons précédemment indiqué (230). Le palier de butée est porté par la machine, et le poids de l'ensemble est de 2000 kg environ.

¹ Extrait d'une note présentée à l'Académie des sciences par M. Mascart, au nom de M. Krebs, le 26 mars 1888.

L'excitation des inducteurs est faite en série et la résistance du moteur, inducteurs et induit, est de 0,16 ohm.

La machine, devant fournir une puissance de 52 chevaux, a été calculée pour marcher normalement avec un courant de 200 ampères et une différence de potentiel aux bornes de 192 volts. La vitesse de rotation de l'électromoteur est alors de 280 tours.

La source électrique était primitivement une batterie d'accumulateurs Commelin, Desmazures et Baillehache, comprenant 564 éléments, pesant chacun 17,5 kg, soit un poids total de 9 840 kg.

Le courant envoyé dans la machine est toujours fourni par la totalité des accumulateurs, qui sont groupés de quatre façons différentes, au moyen d'un commutateur spécial, permettant ainsi d'obtenir quatre vitesses, par la manœuvre d'une manivelle.

Le premier groupement, petite vitesse, comprend 12 accumulateurs en quantité, 47 en tension; le deuxième, moyenne vitesse, 6 accumulateurs en quantité, 94 en tension; le troisième, vitesse de route, 4 accumulateurs en quantité, 141 en tension; le quatrième, grande vitesse, 2 accumulateurs en quantité, 282 en tension.

La capacité utile de ces accumulateurs est de 450 ampères-heure.

La batterie d'accumulateurs Desmazures a depuis été remplacée par des accumulateurs Laurent-Cély, au nombre de 204, ayant chacun 30 kg de plaques. La capacité de ces accumulateurs est de 400 ampères-heure et leur débit maximum de 100 ampères.

CHAPITRE IX

DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE DANS LES ATELIERS

517. Généralités. — Il existe aujourd'hui de nombreuses applications du courant électrique pour la distribution de l'énergie mécanique dans les ateliers, et cet emploi du courant électrique est des mieux justifiés, bien que la faible distance à laquelle se fait, en général, la transmission, pour cette application particulière, semble, *à priori*, enlever au courant électrique sa cause principale de supériorité sur les autres modes de transmission.

Il est certain, en effet, que si toutes les machines-outils d'un atelier devaient constamment être actionnées simultanément, leur commande par câbles télodynamiques et par courroies pourrait donner un rendement élevé, plus grand peut-être que celui obtenu en faisant subir à l'énergie deux transformations successives, d'abord dans une dynamo génératrice, puis dans des électromoteurs actionnant les machines-outils.

Mais, d'une manière générale, le fonctionnement des outils d'un atelier est essentiellement variable et intermittent. Dans ces conditions, si la transmission se fait à partir d'une machine à vapeur centrale par arbres et courroies, on dépense en pure perte, pendant les périodes de repos des outils, la puissance assez considérable nécessaire pour faire tourner à vide les arbres de transmission qui portent les poulies de commande, et le rendement s'abaisse à un taux presque toujours inférieur à 50 p. 100.

D'un autre côté, les organes de transmissions mécaniques directes sont pesants; ils déterminent des vibrations et des

tractions ; d'où la nécessité de constructions très solides pour les supporter.

Les machines-outils commandées par arbres et courroies occupent fatalement une position déterminée et fixe, et il faut amener près d'elles les pièces à travailler, ce qui entraîne des pertes de temps et d'argent assez importantes, si elles sont lourdes.

Enfin, dans les ateliers un peu importants et qui comprennent un certain nombre de bâtiments distincts, la transmission mécanique directe d'un bâtiment à l'autre, à partir d'une machine à vapeur unique centrale, peut présenter des difficultés ou des inconvénients assez grands pour qu'on soit obligé d'installer plusieurs machines à vapeur distinctes, génératrices de l'énergie mécanique, réparties en divers endroits, ce qui augmente les frais d'installation et de personnel.

A ces divers points de vue, l'emploi de l'électricité est avantageux. On peut ici, dans tous les cas, quelle que soit l'étendue de l'usine, installer une station génératrice centrale comprenant une machine à vapeur et une ou plusieurs dynamos. Le courant produit par cette dynamo génératrice se répartit dans toute l'usine par le système de distribution en dérivation, généralement, et alimente les divers électromoteurs qui actionnent les machines-outils. Les câbles électriques sont d'un poids bien plus faible que les arbres de transmission ; ils sont flexibles, se prêtent aux dénivellations et n'exigent donc que des constructions légères.

Les électromoteurs ne sont mis en marche qu'au moment du besoin ; ils ne consomment rien pendant les périodes de repos, non plus que les câbles qui les alimentent ; ils consomment constamment une quantité d'énergie proportionnée au travail qu'ils effectuent. La légèreté relative des électromoteurs, la flexibilité des câbles électriques, la possibilité de prendre le courant en divers points du réseau de conducteurs des ateliers, permettent presque toujours d'amener l'outil près de la pièce à travailler, lorsque celle-ci est pesante ; à cet avantage se joint celui non moins précieux souvent de pou-

voir placer le moteur électrique dans toutes sortes de positions.

N'oublions pas d'ajouter que l'emploi du courant électrique pour la distribution de l'énergie mécanique permet en même temps, sans grande dépense supplémentaire, l'éclairage électrique.

518. — Nous avons supposé, dans ce qui précède, que la dynamo génératrice centrale distribuait directement l'énergie aux divers électromoteurs actionnant les machines-outils de l'atelier. Mais on peut concevoir une distribution d'énergie moins étendue, moins détaillée. La station génératrice G distribue, par exemple, le courant à un certain nombre de postes récepteurs A, B, C, D, répartis dans divers locaux. A chacun de ces postes, un électromoteur actionné par le courant distribué entraîne un ou plusieurs arbres de transmission qui commandent, par des poulies et des courroies, les diverses machines-outils groupées dans le voisinage.

On voit qu'alors les transmissions doivent toujours être en mouvement, ainsi que les électromoteurs qui les entraînent, même pendant les périodes de repos d'un certain nombre d'outils, comme cela avait lieu avec des transmissions purement mécaniques. On ne bénéficie pas de l'économie d'énergie que peut donner l'emploi exclusif de l'électricité.

Voici, par exemple, dans quelles circonstances on peut être amené à employer le mode de distribution que nous venons d'indiquer et que nous pouvons qualifier de *mixte*.

Dans une usine, occupant des bâtiments assez espacés, la puissance mécanique est produite par un certain nombre de machines à vapeur placées çà et là avec leurs chaudières respectives; chacune de ces machines commande un arbre de transmission qui communique le mouvement à un certain nombre d'outils ou d'appareils quelconques. On veut, pour réaliser une économie, réunir en même lieu et dans une même machine à vapeur toute la puissance motrice de l'usine

et faire alors usage de la transmission électrique ; mais pour ne pas avoir à modifier complètement tout l'outillage en adaptant à chaque outil un électromoteur, ce qui demanderait temps et argent, on remplace tout simplement chacune des machines à vapeur commandant les transmissions par un électromoteur attelé sur le même arbre de transmissions conservé, les électromoteurs étant tous reliés, comme nous l'avons dit, à une station centrale génératrice actionnée par une machine à vapeur unique dont la puissance sera, bien entendu, au moins égale à la somme des puissances que développaient les machines à vapeur séparées.

On voit tout de suite qu'une pareille transformation peut se préparer tout à loisir et pendant que les anciennes machines à vapeur continuent à produire la force motrice. On peut aller jusqu'à relier l'arbre de transmissions à commander avec l'électromoteur correspondant sans amener d'arrêt anormal dans le fonctionnement de l'usine et, quand tout est prêt, il suffit de débieller les machines à vapeur et de lancer le courant dans les électromoteurs pour opérer la substitution. Un accident, une avarie viennent-ils à se produire dans la nouvelle installation, et rien n'est moins étonnant dans une période de début qui sert en même temps de période d'essais, il est toujours facile de remettre en service les anciennes machines à vapeur, pendant le temps nécessaire aux réparations ou rectifications.

La dynamo génératrice de la station centrale pourra d'ailleurs toujours alimenter l'éclairage électrique en même temps que la transmission d'énergie mécanique et même fournir le courant nécessaire à un certain nombre de petites machines-outils actionnées électriquement, amovibles ou situées dans des locaux où n'existaient auparavant aucune transmission.

Nous allons successivement indiquer quelques exemples de commande de machines-outils par des électromoteurs et décrire une installation de transmissions électriques complète ou mixte.

519. Tours, machines à percer, étaiu-limeur, coupe-tubes. — La figure 110 représente schématiquement

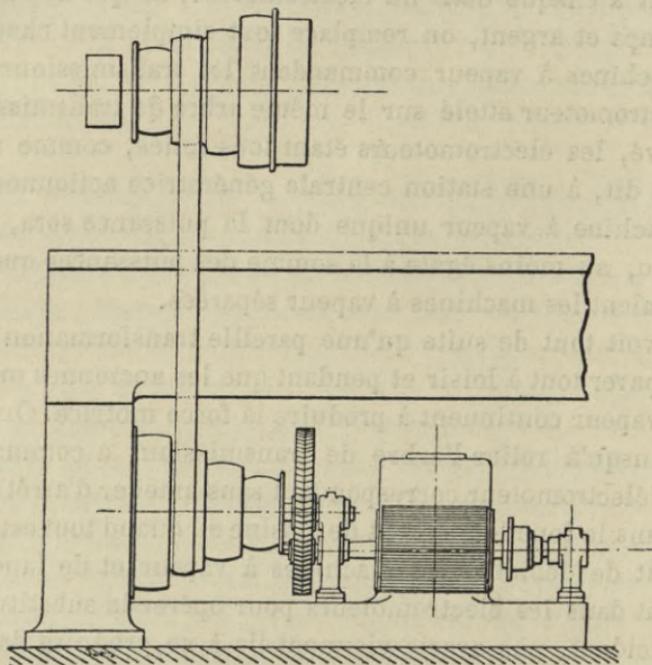


Fig. 110. — Électromoteur actionnant un tour par pignon et roue dentés.

ment un tour commandé par un électromoteur dont le type est semblable à celui du treuil-escarbilleur précédemment décrit (*fig. 63*). L'axe du moteur électrique entraîne, par un pignon et une roue chevrons, l'axe du cône d'entraînement ordinaire.

On peut aussi (*fig. 111*) actionner directement, par une poulie montée sur l'axe de l'électromoteur et une courroie, la poulie de commande du tour.

Enfin, dans la figure 112, on peut voir un électromoteur monté sur un axe et appuyant par une petite poulie de friction sur la roue-volant ordinaire d'un tour.

Dans la machine à percer radiale représentée par la figure 113, l'axe de l'électromoteur entraîne par pignon et roue dentée le cône de commande.

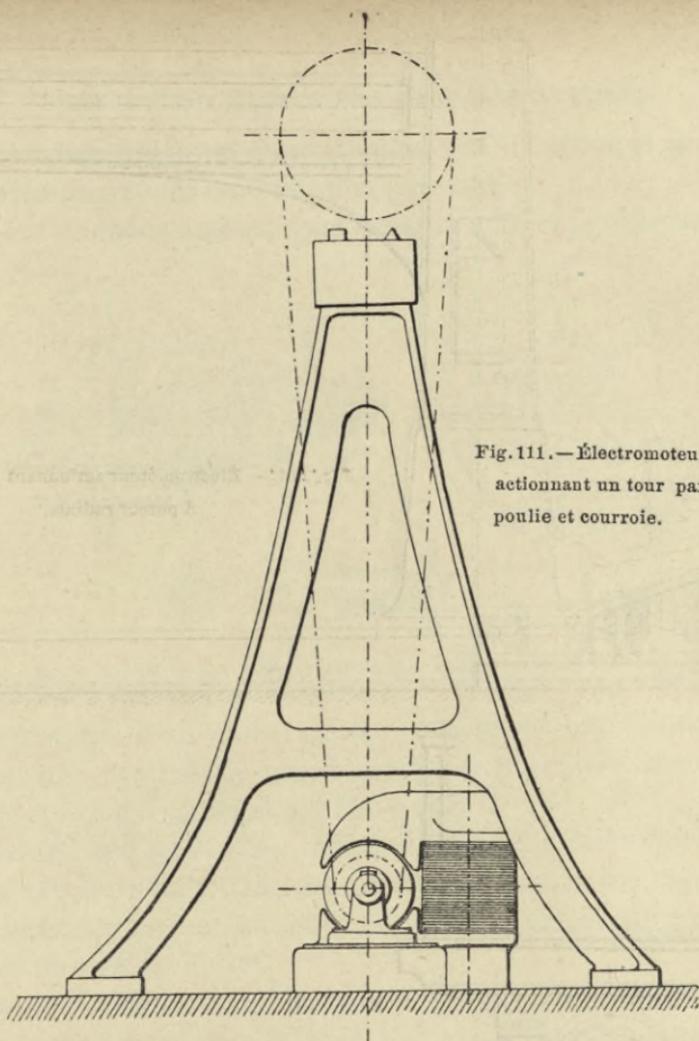


Fig. 111. — Électromoteur actionnant un tour par poulie et courroie.

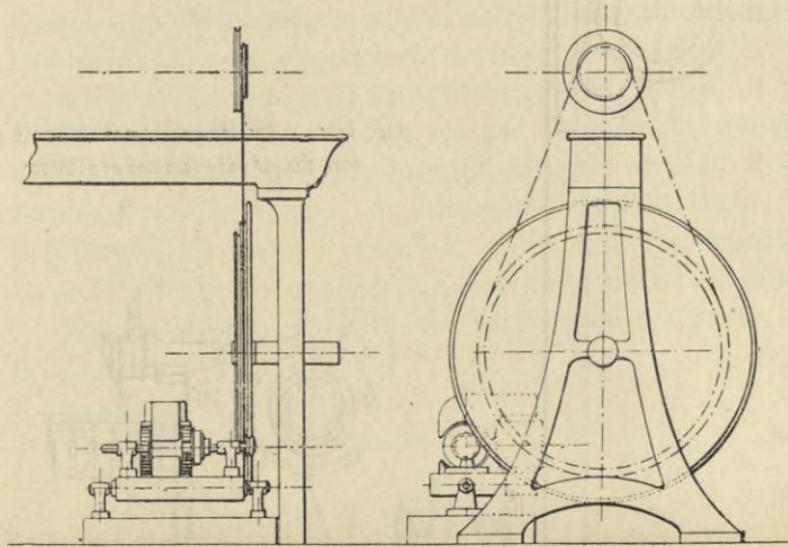


Fig. 112. — Électromoteur actionnant un tour par galet de friction.

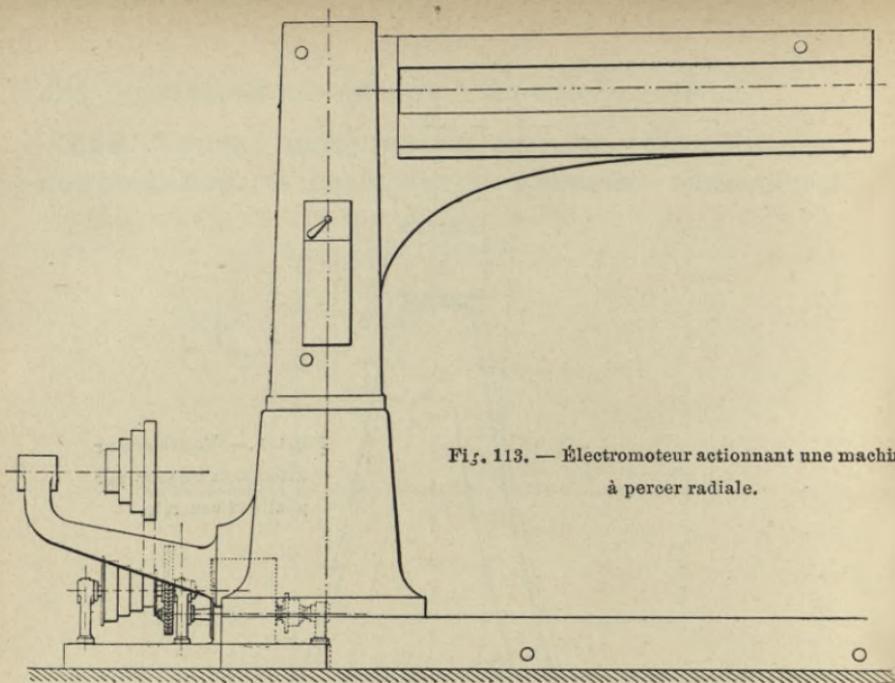


Fig. 113. — Électromoteur actionnant une machine à percer radiale.

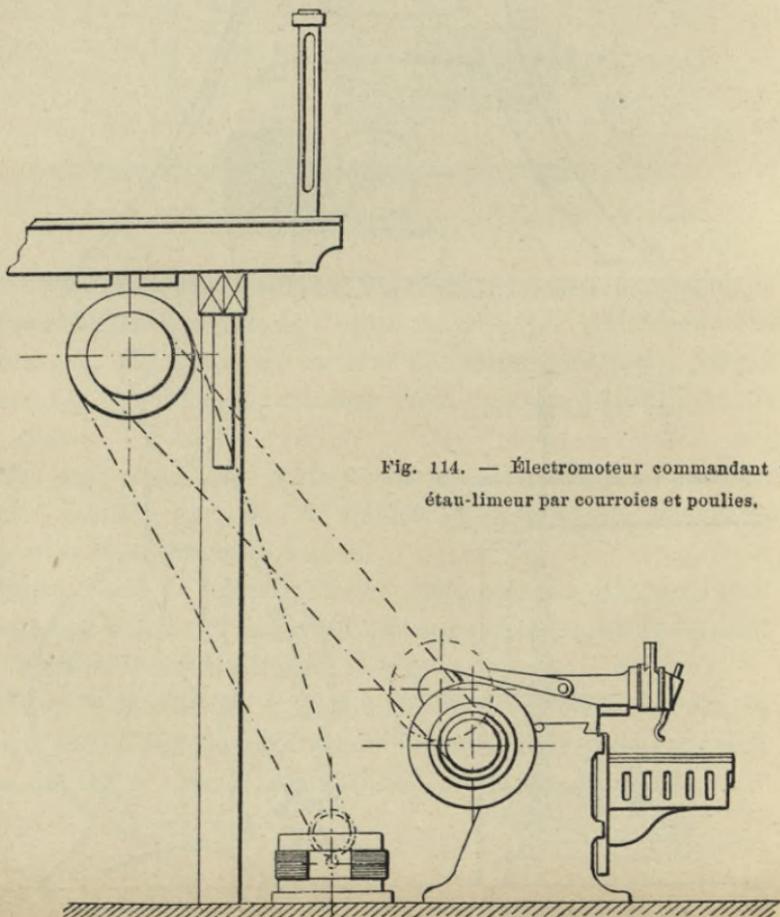


Fig. 114. — Électromoteur commandant un étau-limeur par courroies et poulies.

La figure 114 représente un étau-limeur actionné par un électromoteur avec transmission par poulies.

Nous donnons encore, dans la figure 115, la représentation

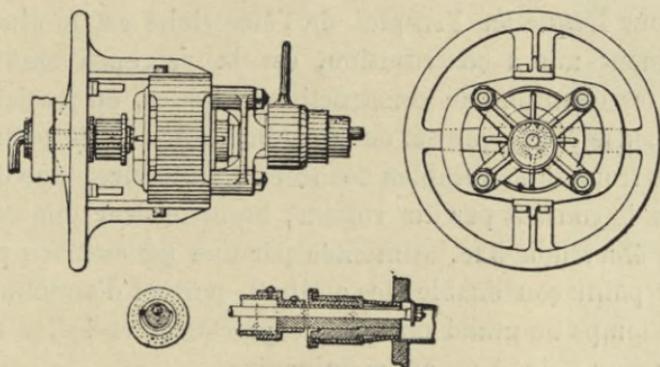


Fig. 115. — Scie actionnée électriquement pour couper les tubes des chaudières.

schématique d'un électromoteur actionnant une petite scie circulaire destinée à couper les tubes de cuivre des chaudières; il a été combiné par M. Jenkin¹.

La scie est, à cet effet, introduite dans l'intérieur du tube. Son axe est monté dans un manchon excentré par rapport à un second manchon, au moyen duquel on fixe l'outil à l'intérieur du tube à couper.

Après l'introduction de la scie dans le tube, on fait tourner le manchon porte-scie de 180° dans un sens, puis dans l'autre, afin d'excentrer la scie et de la faire appuyer successivement sur toute la périphérie du tube.

La scie est centrée pour l'introduction ou la sortie.

Les inducteurs sont constitués par deux électro-aimants excités en série et portant chacun 190 tours de fil de 2 mm de diamètre; la résistance de l'ensemble est 0,44 ohm.

L'induit, un anneau Gramme, a 127 mm de diamètre, 76 mm de long; il est percé d'un trou de 76 mm de diamètre; il porte 840 tours d'un fil de 1 mm; sa résistance est 0,96 ohm.

1. *La Lumière électrique*, t. 43, p. 66.

Ce moteur a donné à 150 volts, pour une vitesse de 2600 tours, 2,5 chevaux ; l'ensemble de l'outil pèse 30 kg environ.

520. Perceuses amovibles. — Une des machines-outils pour lesquelles l'emploi de l'électricité est le plus fréquemment mis à contribution, est la perceuse amovible. Dans les chantiers de constructions navales, en particulier, la perceuse électrique est commodément employée pour percer les trous innombrables des tôles d'un navire. Une distribution de courant par fils volants, branchée sur une canalisation électrique fixe, alimentée par une génératrice placée en un point convenable des ateliers, permet d'actionner en même temps un grand nombre de perceuses et de les transporter d'un point à un autre du navire.

En dehors du type particulier de l'électromoteur employé, les perceuses électriques peuvent différer par le mode de transmission du mouvement de l'induit au foret, et aussi par le mode de fixation de l'outil sur la pièce à percer. Nous allons décrire succinctement quelques types de perceuses.

521. Perceuse Jenkin. — Dans la perceuse Jenkin (*fig. 116*), l'induit est un anneau Gramme de 100 mm de

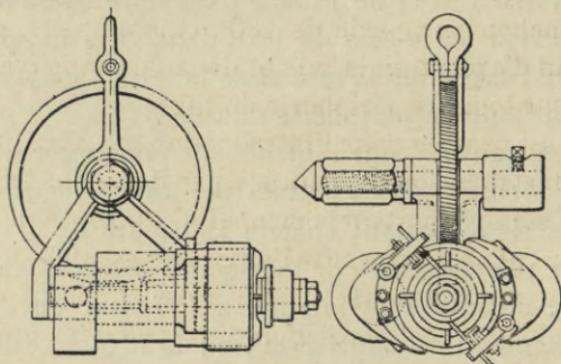


Fig. 116. — Perceuse électrique amovible de Jenkin.

diamètre et de 20 mm de longueur, percé d'un trou de 75 mm

de diamètre. Les inducteurs sont formés par deux électro-aimants parallèles à masses polaires embrassant l'anneau.

Le mouvement de l'induit est transmis par une vis sans fin à une grande roue dentée sur l'axe de laquelle est fixé le foret. La vitesse est ainsi réduite dans le rapport de 50 à 1 ; elle passe ainsi de 3000 tours environ pour l'induit à 60 tours pour le foret.

Cette perceuse peut être suspendue, comme l'indique la figure ; le poids total, avec la transmission, est de 26 kg.

Aux essais, on a pu percer en 45 secondes un trou de 20 mm de profondeur, avec un foret de 20 mm de diamètre ; la puissance électrique absorbée était de 0,732 cheval, pour une différence de potentiel aux bornes de 50 volts et une intensité de 10,92 ampères. Dans ces conditions, le rendement industriel total était égal à 0,34.

522. Perceuse Weyburn. — La perceuse Weyburn peut être amenée dans un atelier au-dessus du point à percer, grâce à un système de rails et d'articulations indiqué par la figure 117. Sur les rails *b* peut courir le châssis *d*, qui porte

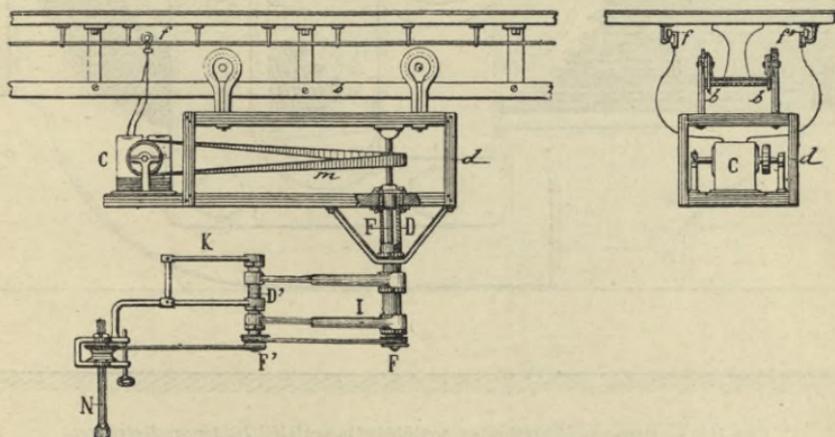


Fig. 117. — Perceuse électrique *Weyburn*, se déplaçant sur rails.

l'électromoteur *C*, alimenté par des galets-contacts ou *trolleys* *f* glissant sur des conducteurs parallèles aux rails.

La perceuse N est reliée au châssis par des bras K et I, articulés en D et D'. Le foret est mis en mouvement par la transmission funiculaire *m*, F, F'. La perceuse peut ainsi décrire des cercles complets autour des axes D et D'.

523. Perceuses de la Société « l'Éclairage électrique ». — La Société *l'Éclairage électrique* a établi un type

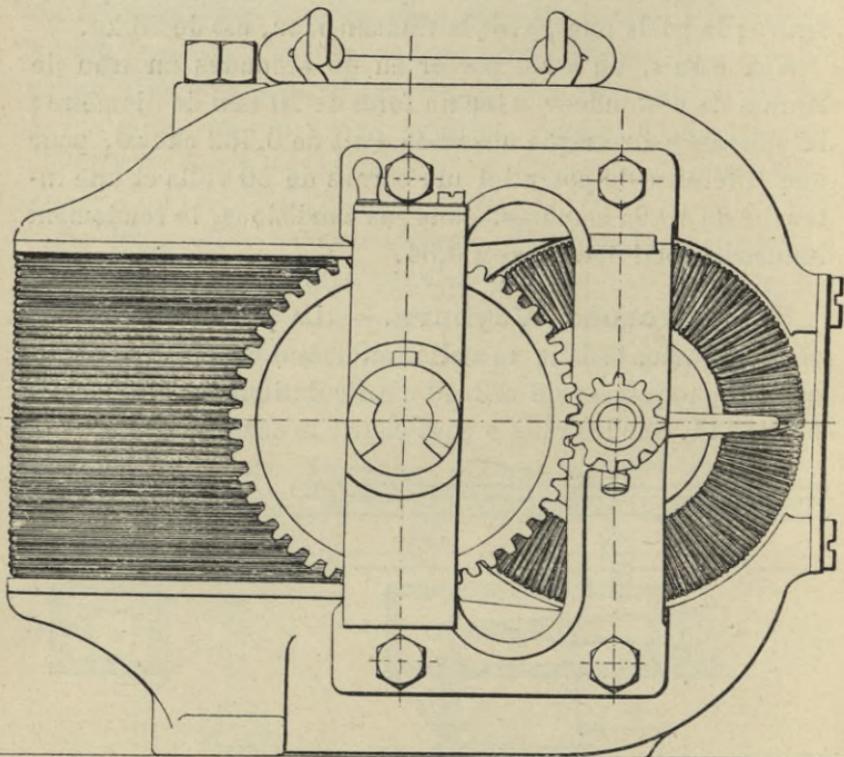


Fig. 118. — Perceuse électrique amovible de la société *l'Éclairage électrique*.

Grand modèle. Élévation. Échelle $\frac{1}{3}$.

de perceuse représenté par les figures 118 et 119. L'axe de l'induit commande par un pignon une roue dentée sur l'axe

de laquelle peut se monter, par un emmanchement indiqué sur les figures, un arbre flexible transmettant le mouvement au foret, qui lui-même est appuyé, par un dispositif convenable, sur la pièce à percer. Les moteurs sont excités en série.

Plusieurs modèles de ce type de perceuse sont en service dans les chantiers de la marine de guerre.

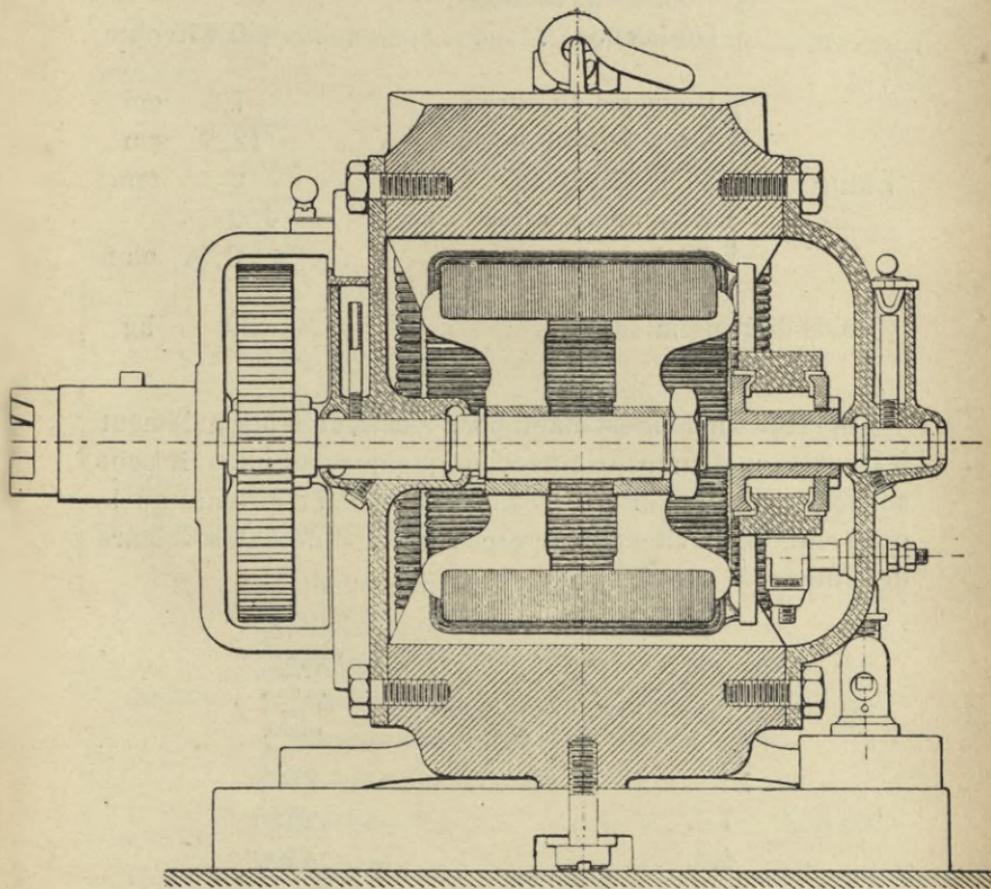


Fig. 119. — Perceuse électrique amovible de la société *V'Éclairage électrique*.

Grand modèle. Coupe suivant l'axe. Échelle $\frac{1}{3}$.

Voici leurs données principales de construction et de fonctionnement.

524. — 1° Petit modèle enroulé pour 70 volts.

Induit.	{	Diamètre intérieur du noyau	9	cm
		Diamètre extérieur du noyau	13	cm
		Longueur suivant l'axe	8	cm
		Diamètre du fil	1,2	mm
		Nombre de spires	520	
		Nombre de sections	52	
		Résistance	0,475	ohm
Inducteur.	{	Diamètre du noyau	7,5	cm
		Longueur du noyau	12,8	cm
		Diamètre du fil	2	mm
		Nombre de spires	450	
		Résistance	0,74	ohm
Poids de l'ensemble			39	kg

Cet électromoteur est établi pour fonctionner normalement à 70 volts et 10 ampères ; pendant quelques minutes, il peut supporter un courant de 15 ampères. Voici d'ailleurs quelques chiffres de vitesses correspondant à différentes valeurs de l'intensité, sous 70 volts :

INTENSITÉ en ampères.	VITESSE de l'induit en tours par minute.
12	2108
7	2520
4,3.	4400

Comme essai pratique, on perce une plaque d'acier de 43 mm d'épaisseur, avec un foret de 28 mm de diamètre, en 15 à 17 minutes ; on dépense pour cela 8 ampères sous 48 volts, l'induit faisant 1600 tours.

525. — 2° Petit modèle enroulé pour 110 volts.

Induit.	{	Diamètre du fil	1 mm
		Nombre de spires	858
		Nombre de sections	52
Inducteur.	{	Diamètre du fil	1,6 mm
		Nombre de spires	698

L'essai comme moteur sous 110 volts a donné comme résultats :

INTENSITÉ du courant en ampères.	VITESSE de l'induit en tours par minute.
6,8	2100
6,55.	2282
6,22.	2314
5,48.	2538
4,14.	3060

526. — 3° Grand modèle enroulé pour 70 volts. C'est ce modèle qui est représenté par les figures 109 et 110.

Induit.	{	Diamètre intérieur du noyau	9 cm
		Diamètre extérieur du noyau	13 cm
		Longueur suivant l'axe	10 cm
		Diamètre du fil	1,5 mm
		Nombre des spires	416
Inducteur.	{	Nombre des sections	52
		Résistance	0,33 ohm
		Diamètre du noyau	8,8 cm
		Longueur du noyau	12,8 cm
		Diamètre du fil	2,5 mm
	{	Nombre des spires	370
		Résistance	0,49 ohm
Poids de l'ensemble			53 kg

Le moteur doit marcher normalement avec 15 ampères ; il peut supporter pendant 5 à 6 minutes un courant de 22 ampères.

Aux essais, ce modèle a donné comme résultats, sous 70 volts :

INTENSITÉ du courant. en ampères.	VITESSE de l'induit en tours par minute.
16	1420
14,7	1500
13,2	1600
11,6	1840
10,1	2024
8,7	2280
6,98	2520
5,90	2888

Comme essai pratique, on a percé, en 14 à 16 minutes, une plaque d'acier de 43 mm d'épaisseur, avec un foret de 28 mm de diamètre ; on a dépensé 12 ampères sous 56 volts, l'induit faisant 1350 tours par minute.

527. — 4° Grand modèle enroulé pour 110 volts.

Induit.	{	Diamètre du fil	1,2 mm
		Nombre de spires	780
Inducteur.	{	Nombre de sections	52
		Diamètre du fil	2,2 mm
		Nombre de spires	430

Sous 110 volts, on a trouvé :

INTENSITÉ du courant en ampères.	VITESSE de l'induit en tours par minute.
9,72.	1672
8,79.	1730
7,47.	2000
5,88.	2240
4,8	2400

528. Perceuses Sautter et Harlé. — La maison Sautter et Harlé construit pour les chantiers de constructions navales deux types de perceuses amovibles, représentés schématiquement par la figure 120.

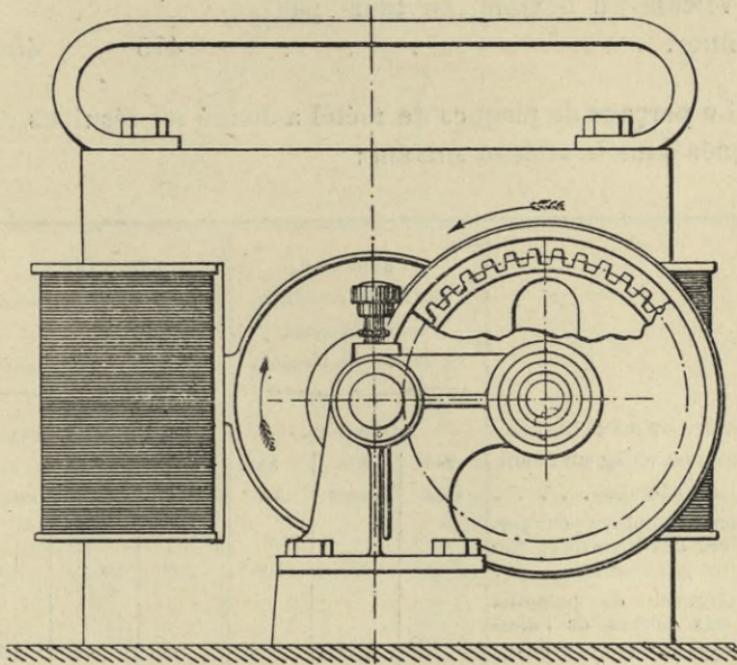


Fig. 120. — Perceuse électrique amovible de MM. Sautter et Harlé.

Le mouvement du foret est encore ici, comme pour les perceuses précédentes, commandé par un arbre flexible accouplé avec l'axe d'une roue dentée mise en mouvement par un pignon monté sur l'arbre de l'induit.

L'induit est un anneau Gramme ; l'excitation des inducteurs est faite en série.

Nous donnons ci-après quelques données de construction et de fonctionnement sur ces deux types de perceuses :

	TYPE P _p .	TYPE C _p .
Longueur en millimètres	305	335
Largeur en millimètres	315	315

	TYPE P _p .	TYPE C _p .
Hauteur en millimètres	170	231
Vitesse de l'induit, en tours par minute	2000	2000
Vitesse du flexible, en tours par minute	475	450

Le perçage de plaques de métal a donné les résultats consignés dans le tableau suivant :

	PERCEUSE P _p pour flexible conduisant un foret hélicoïdal de 28 mm de diamètre.			PERCEUSE C _p pour flexible conduisant un foret hélicoïdal de 36 mm de diamètre.		
	ACIER DOUX			ACIER SIEMENS-MARTIN		
Nature du métal travaillé.	240	320	320	80	240	240
Pression en kg sur l'outil.	à neuf	émoussé	bon	bon	à neuf	médiocre
État d'affûtage						
Temps employé pour percer des trous de 26 mm de profondeur	4 ^m 30 ^s	9 ^m	4 ^m	30 ^m	3 ^m 15 ^s	6 ^m
Différence de potentiel aux bornes de l'électromoteur, en volts . .	68	65	65	50	68	65
Intensité du courant, en ampères	40	40	10,5	40	15	14
Puissance électrique dépensée en watts	680	650	682	500	1020	910

NOTA. — Quand la perceuse travaille d'une manière intermittente, les pressions sur l'outil peuvent être notablement augmentées; les avancements sont alors plus rapides.

529. — La figure 121 représente schématiquement un électromoteur M actionnant, par le flexible F, le porte-outil P, appliqué contre une tôle A à percer, grâce à la pièce d'appui B liée à la tôle A par les boulons HH.

Dans chaque cas particulier, le montage du porte-outil sur la pièce à travailler sera installé de la manière la plus convenable.

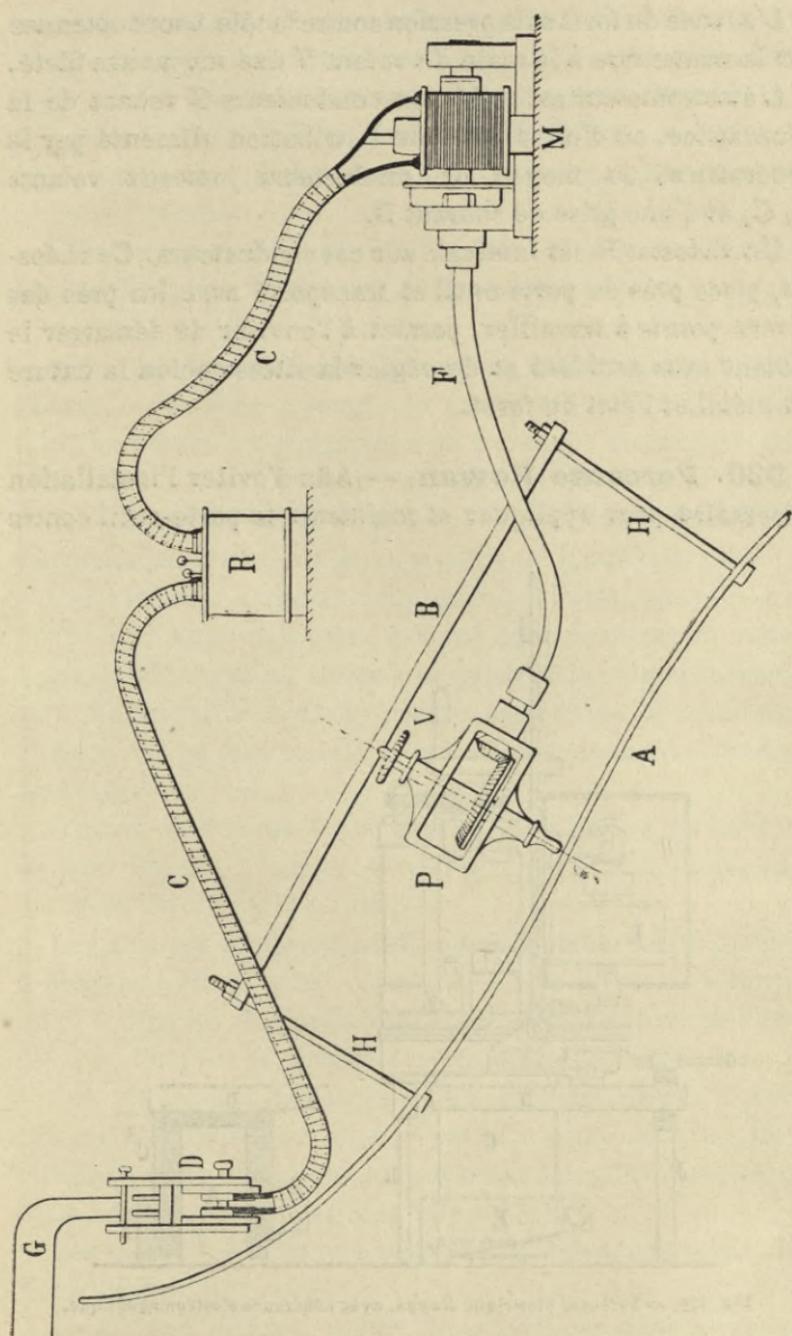


Fig. 121. — Installation d'une perceuse électrique amovible, système de MM. Sautter et Harlé.
 Commande du porte-outil par un flexible.

L'avance du foret et la pression contre la tôle A sont obtenues par la manœuvre à la main du volant V fixé sur un axe fileté.

L'électromoteur est relié aux conducteurs G venant de la génératrice, ou d'un tableau de distribution alimenté par la génératrice, au moyen de conducteurs jumeaux volants C, C, et d'une prise de courant D.

Un rhéostat R est intercalé sur ces conducteurs. Ce rhéostat, placé près du porte-outil et transporté avec lui près des divers points à travailler, permet à l'ouvrier de démarrer le moteur sans accident et de régler la vitesse selon la nature du métal et l'état du foret.

530. Perceuse Rowan. — Afin d'éviter l'installation nécessaire pour appliquer et maintenir le porte-outil contre

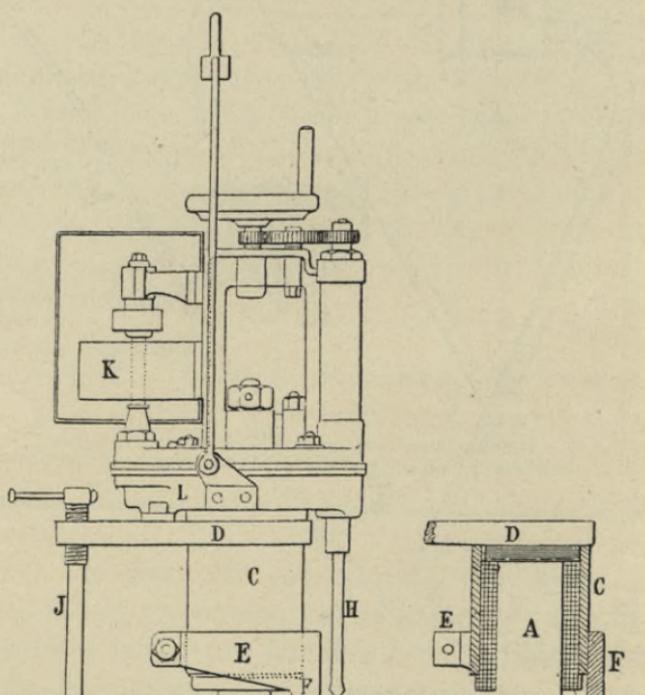


Fig. 122. — Perceuse électrique Rowan, avec adhérence électromagnétique.

la pièce à travailler, M. Rowan a combiné une perceuse dans

laquelle l'adhérence est produite par un électro-aimant AC, dont les deux pôles sont formés par un noyau A et une enveloppe en fer C, dont l'extrémité F porte sur la tôle à percer, très près de l'outil H (*fig. 122*). On évite ainsi tout porte-à-faux. La vis calante J permet de dresser exactement la perceuse sur la tôle.

L'électromoteur K actionne le foret H par un train d'engrenages logé en L.

531. Ateliers électriques du chemin de fer du Nord. — Comme exemple de transmission et de distribution complètement électriques de l'énergie mécanique dans les ateliers, nous citerons les nouveaux ateliers du chemin de fer du Nord, établis à Saint-Ouen pour la réparation et la construction des pièces des appareils télégraphiques.

Ces ateliers, installés auparavant à Paris, dans les bâtiments de l'Administration, étaient actionnés par un moteur à gaz de 12 chevaux. Grâce à la substitution de la transmission électrique à la transmission mécanique, les nouveaux ateliers ont pu être établis à Saint-Ouen dans une construction légère en bois.

L'usine électrique toute voisine de la *Société d'éclairage et de force* fournit l'énergie électrique, sous une différence de potentiel de 115 à 118 volts.

Les ateliers comprennent 6 tours, 5 perceuses, 1 machine à fraiser, 1 étau-limeur, 1 meule, 1 scie à ruban, 1 ventilateur, 1 broyeur et 1 mélangeur pour la fabrication de l'encre oléique destinée au service des bureaux télégraphiques.

Les différentes machines-outils sont actionnées chacune par un électromoteur séparé, par l'intermédiaire de transmissions plus ou moins complexes, analogues à celles que nous avons représentées (*fig. 110 à 114*).

Les moteurs électriques sont de 3 modèles seulement, dont 2 de 1100 et 300 watts.

Le tableau suivant, publié dans la *Revue générale des chemins de fer* par M. E. Sartiaux, chef des services électriques

du chemin de fer du Nord, montre pour chaque machine-outil la dépense à vide et en charge. On peut ainsi vérifier ce que nous avons dit à propos de la perte d'énergie due aux transmissions (517).

Avec la commande électrique, il est clair que l'électromoteur pouvant être arrêté en même temps que l'outil, on évite ainsi la perte considérable due à la marche à vide.

La consommation d'énergie électrique moyenne journalière étant de 11 kilowatts-heure, et l'énergie étant vendue à raison de 0,38 fr. le kilowatt-heure, il en résulte une dépense journalière de 4,18 fr. En comptant 1 fr. par jour pour les frais d'entretien, le graissage, la main-d'œuvre, la dépense ressort à 5,18 fr. par jour.

Les anciens ateliers exigeaient une dépense journalière de 13 fr. pour le gaz, l'eau, le graissage et l'entretien.

TABLEAU.

DÉSIGNATION DES MACHINES.	INTENSITÉ	PUISSANCE	PUISSANCE	
	en ampères.	électrique en kilo- grammètres/s.	électrique en chevaux- vapeur.	
Gros tour à change- ment de marche.	{ Anneau à vide . .	2,5	28	0,375
	{ — en charge.	5 à 6	56	0,750
Tour moyen . . .	{ Anneau à vide . .	6	67	0,900
	{ — en charge.	10 à 12	67	0,900
Petit tour monté à friction.	{ Anneau à vide . .	3,5	112	1,500
	{ — en charge.	5 à 6	133	1,800
Tour de précision.	{ Anneau à vide . .	5	39	0,525
	{ — en charge.	8	56	0,750
Tour d'horlogerie.	{ Anneau à vide . .	2,5	67	0,900
	{ — en charge.	4	90	1,200
Petit tour à polir .	{ Anneau à vide . .	3	56	0,750
	{ — en charge.	5	34	0,450
Petite perceuse . .	{ Anneau à vide . .	2,5	28	0,375
	{ — en charge.	4	45	0,600
Grande perceuse radiale.	{ Anneau à vide . .	3	34	0,450
	{ — en charge.	7	79	1,050
Grosse perceuse .	{ Anneau à vide . .	4	45	0,600
	{ — en charge.	8	90	1,200
Perceuse moyenne.	{ Anneau à vide . .	4	45	0,600
	{ — en charge.	6	67	0,900
Perceuse Huvé petite.	{ Anneau à vide . .	3	34	0,450
	{ — en charge.	5	56	0,750
Machine à fraiser .	{ Anneau à vide . .	11,4	128	1,710
	{ — en charge.	15	167	2,250
Étau-limeur	{ Anneau à vide . .	9	102	1,350
	{ — moitié charge.	11	124	1,650
	{ — pleine charge.	15	167	2,250
Meule	{ Anneau à vide . .	4	45	0,600
	{ — en charge.	7	79	1,050
Scie à ruban . . .	{ Anneau à vide . .	8	90	1,200
	{ — en charge.	9,5	104	1,425
Ventilateur	{ Anneau à vide . .	7	79	1,050
	{ — en charge.	8	90	1,200
Broyeur et mélan- geur.	{ Anneau à vide . .	10	112	1,500
	{ — en charge.	12	135	1,800

532. Transmission et distribution de l'énergie dans les ateliers des Forges et Chantiers de la Méditerranée, à la Seyne. — Tout récemment, la Compagnie des Forges et Chantiers de la Méditerranée a établi dans ses ateliers de la Seyne une distribution d'énergie mécanique par l'électricité des plus importantes.

La puissance motrice était autrefois produite par un certain nombre de machines à vapeur dispersées dans les ateliers, tels que l'*ajustage*, le *poinçonnage*, le *barrotage* et les *vieilles forges*.

Chacune de ces machines à vapeur, avec sa chaudière spéciale, entraînait des arbres de transmission sur lesquels les diverses machines-outils prenaient l'énergie mécanique qui leur était nécessaire.

Dans la nouvelle installation, une puissante machine à vapeur constitue un centre unique de production d'énergie mécanique.

Cette machine actionne une dynamo génératrice qui, par une canalisation convenablement établie, distribue le courant électrique qu'elle engendre à 4 électromoteurs placés précisément près des anciennes machines à vapeur.

Ces réceptrices entraînent alors les anciens arbres de transmission par une commande à courroies, les machines à vapeur devenues inutiles ayant été simplement débiellées.

On voit que la distribution de l'énergie mécanique n'est que partiellement électrique, depuis le centre unique de production jusqu'à 4 centres secondaires ; de là, la distribution est mécanique jusqu'aux machines-outils.

Pour éviter un arrêt des ateliers en cas d'avarie dans la génératrice, le centre générateur a été muni de deux génératrices qui peuvent, soit fournir à tour de rôle toute la puissance nécessaire, soit alimenter chacune séparément une partie des ateliers.

La figure 123 montre en G et G' les deux génératrices, en M₁, M₂, M₃, M₄, les 4 réceptrices.

La canalisation principale C et C' est double. Grâce au

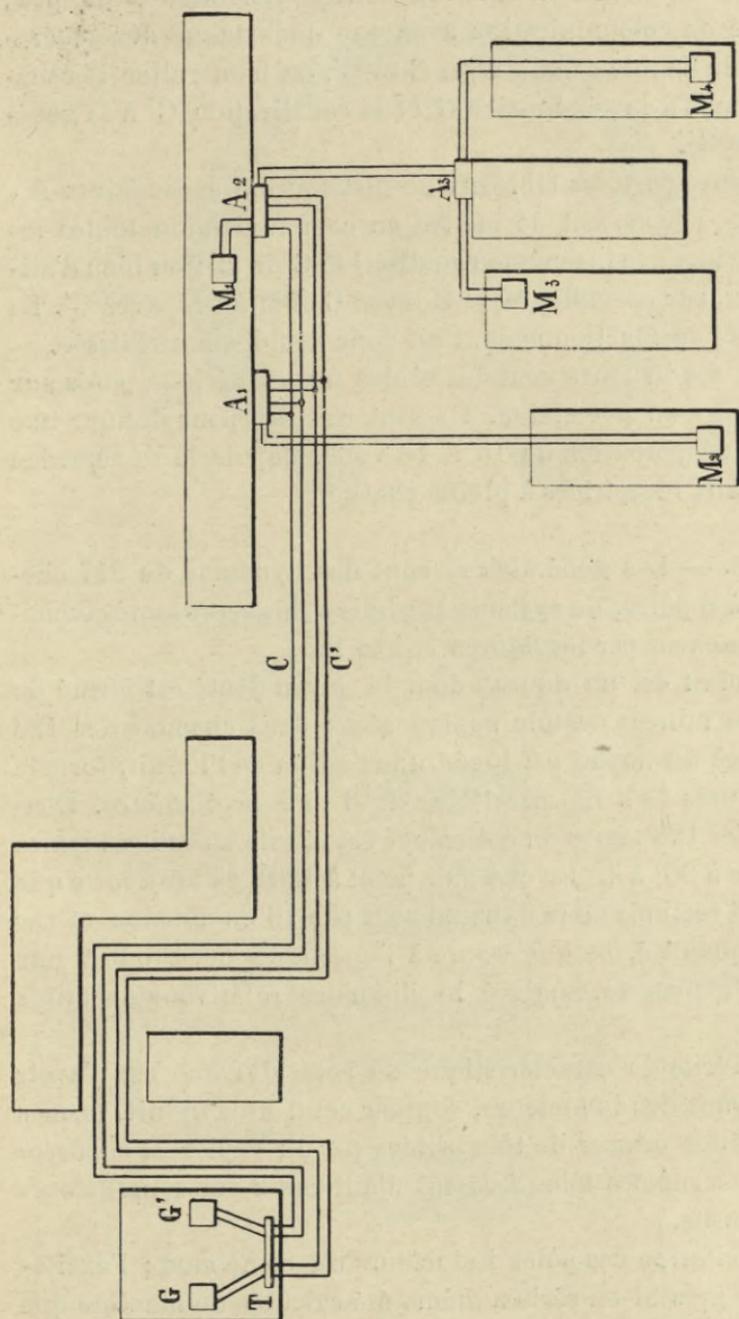


Fig. 123. — Distribution électrique de l'énergie mécanique dans les ateliers de la *Compagnie des Forges et Chantiers de la Méditerranée* à la Seyne. (Disposition schématique.)

tableau de distribution T du centre générateur, on peut mettre en communication avec une quelconque des génératrices la double canalisation C et C', ou bien relier la canalisation C à la génératrice G et la canalisation C' à la génératrice G'.

D'autre part, les tableaux de distribution secondaires A_1 , A_2 , A_3 , permettent de mettre en communication toutes les réceptrices avec la même canalisation C ou C'; ou bien d'alimenter, par exemple, M_1 et M_2 avec C et M_3 et M_4 avec C'. La sécurité de fonctionnement est donc doublement réalisée.

Les conducteurs sont des câbles nus et aériens posés sur isolateurs en porcelaine. Ils sont calculés pour donner une chute de potentiel de 15 à 18 volts, depuis la génératrice jusqu'aux réceptrices à pleine charge.

533. — Les génératrices sont des dynamos de 217 chevaux, à 8 pôles, du système Rechniewski, représentées schématiquement par les figures 124 et 125.

L'induit est un anneau dont le noyau denté est formé de feuilles minces de tôle superposées; dans chacune des 128 entailles du noyau est logée une section de l'induit, formée de 5 spires de 2 fils parallèles de 6 mm de diamètre. Chacune des 128 lames du collecteur est réunie aux autres lames placées à 90° à droite et à gauche et à 180°, de telle sorte que les 128 sections de la dynamo sont par 16 en tension et par 8 en quantité, ce qui assure à l'ensemble de l'induit une faible résistance, malgré le diamètre relativement faible du fil.

La véritable caractéristique de cette dynamo est d'avoir les noyaux des inducteurs, comme celui de l'induit, formés de feuilles minces de tôle isolées par du papier et superposées, les mêmes tôles formant d'ailleurs 2 pôles inducteurs consécutifs.

L'excitation des pôles inducteurs est compound; l'excitation de gros fil en série a même été calculée de manière que la génératrice soit hypercompoundée et donne entre ses bor-

Fig. 121. — Distribution électrique
dans les ateliers de la Seyne.

Génératrice, Profil. Échelle $\frac{1}{25}$.

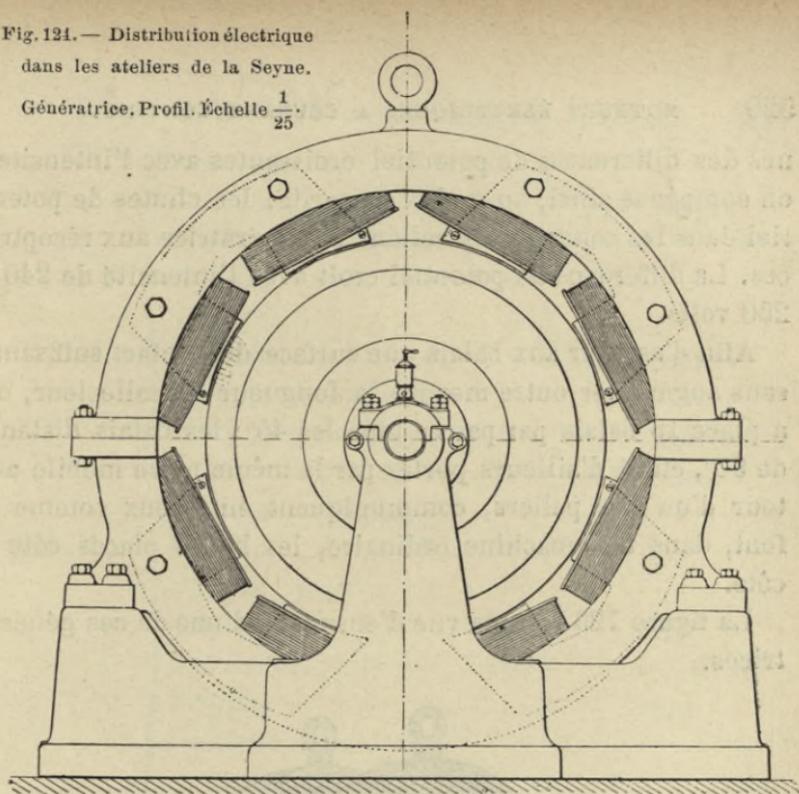
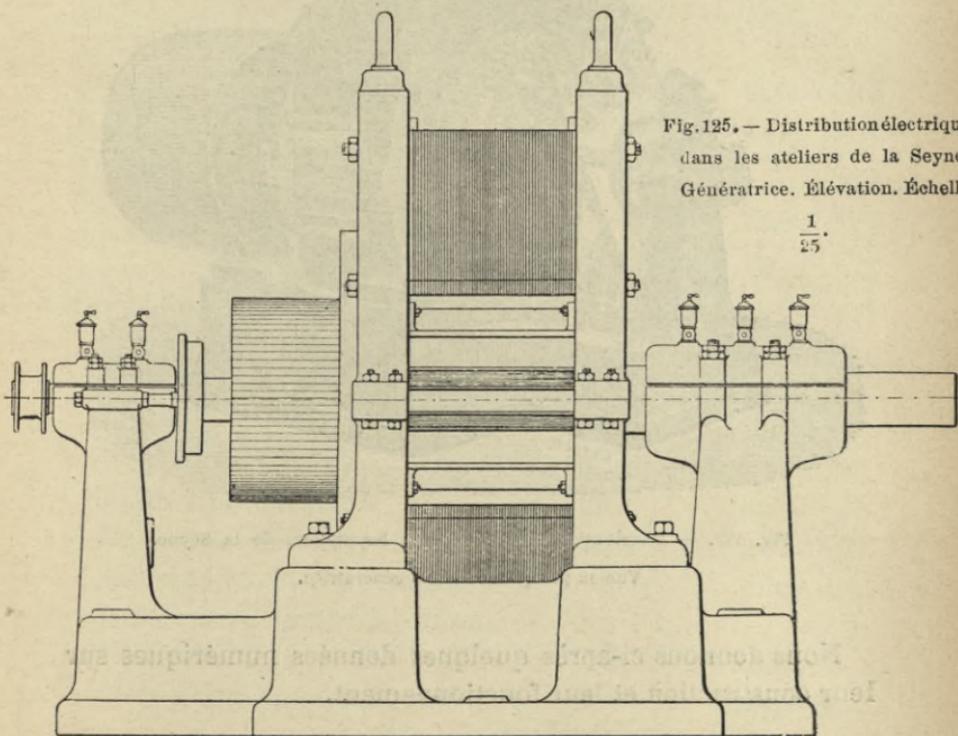


Fig. 125. — Distribution électrique
dans les ateliers de la Seyne.
Génératrice. Élévation. Échelle

$\frac{1}{25}$.



nes des différences de potentiel croissantes avec l'intensité ; on compense ainsi, au moins en partie, les chutes de potentiel dans les conducteurs reliant la génératrice aux réceptrices. La différence de potentiel croît avec l'intensité de 240 à 250 volts.

Afin d'assurer aux balais une surface de contact suffisante sans augmenter outre mesure la longueur du collecteur, on a placé 16 balais par paires tous les 45° ; les balais distants de 90° , étant d'ailleurs portés par la même pièce mobile autour d'un des paliers, communiquent entre eux comme le font, dans une machine ordinaire, les balais placés côte à côte.

La figure 126 est une vue d'ensemble d'une de ces génératrices.

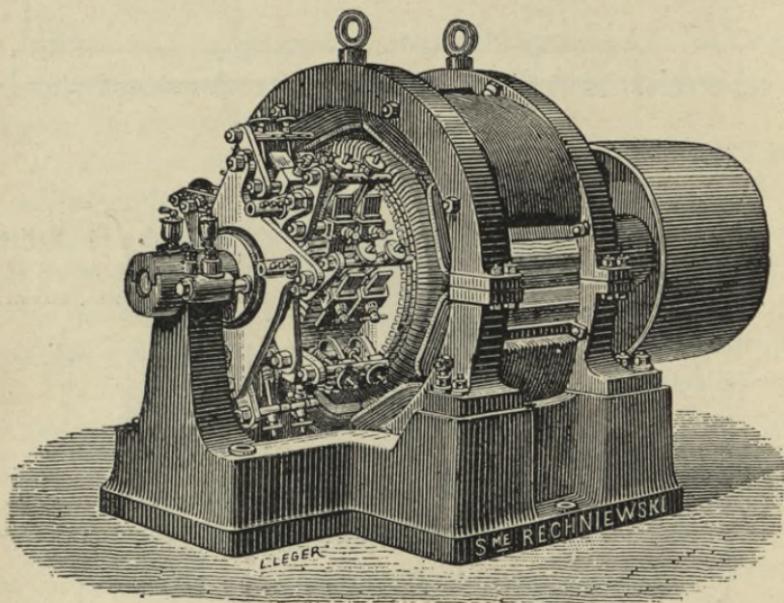


Fig. 126. — Distribution électrique dans les ateliers de la Seyne.

Vue en perspective d'une génératrice.

Nous donnons ci-après quelques données numériques sur leur construction et leur fonctionnement.

Induit	}	Diamètre de l'anneau	1,190	mètre		
		Nombre de sections	128			
		Nombre total de spires	640			
		Diamètre du fil	6	mm		
		Longueur moyenne d'une spire	1,34	mètre		
		Résistance à 15° C	0,00472	ohm		
		Surface de refroidissement	436	dm ²		
		Section du fer de l'anneau	450	cm ²		
		Induction spécifique	8600	C. G. S.		
		Entrefer	5	mm		
		Section totale des conducteurs en quantité	452,4	mm ²		
		Densité maximum de courant	1,42	amp./mm ²		
		Poids du cuivre	486	kg		
		Inducteurs.	}	Nombre des pôles	8	
				Diamètre du fil fin.	2,7	mm
Poids du fil fin	52			kg		
Diamètre des 9 fils parallèles formant le gros fil	7			mm		
Poids du gros fil	34			kg		
Induction spécifique	12400			C. G. S.		
Poids total des tôles	2233	kg				
Poids total de la dynamo	12500	kg				
Vitesse normale, par minute	300	tours				
Différence de potentiel normale aux bornes	250	volts				
Intensité maximum du courant.	640	ampères				

La dynamo, excitée séparément et tournant à *vide* à 300 tours, a donné aux balais les différences de potentiel Δ suivantes, en fonction du courant d'excitation i_d .

COURANT INDUCTEUR i_d en ampères.	DIFFÉRENCE de POTENTIEL aux balais Δ en volts.	COURANT INDUCTEUR i_d en am. ères.	DIFFÉRENCE de POTENTIEL aux balais Δ en volts.
1,55	76	5,28	241
1,85	105	6,16	254
2,63	138	6,47	276
2,80	145	8,3	299
3,33	168	9	308
4	183	9,55	320
4,68	226	15	372

Si on fait tourner la dynamo comme moteur à *vide*, elle réclame, à 300 tours, 35,5 ampères dans l'induit avec 242 volts aux bornes, l'excitation des inducteurs fil fin étant de 6 ampères. La puissance absorbée par les effets parasites est, dans ces conditions, égale à 8591 watts. En admettant que ces effets ont la même valeur quand la dynamo sert de génératrice et donne sa puissance électrique maximum, en supposant d'autre part que la température de l'induit s'élève à 60° environ pendant le fonctionnement à pleine charge, on trouve pour le rendement industriel des génératrices une valeur voisine de 0,91.

534. — Les 4 réceptrices se répartissent en 2 de 60 chevaux et 2 de 25 chevaux. Ces réceptrices sont encore du système Rechniewski multipolaire ; nous avons d'ailleurs représenté schématiquement, dans les figures 127 et 128, une réceptrice de 60 chevaux. Cette dynamo diffère de la

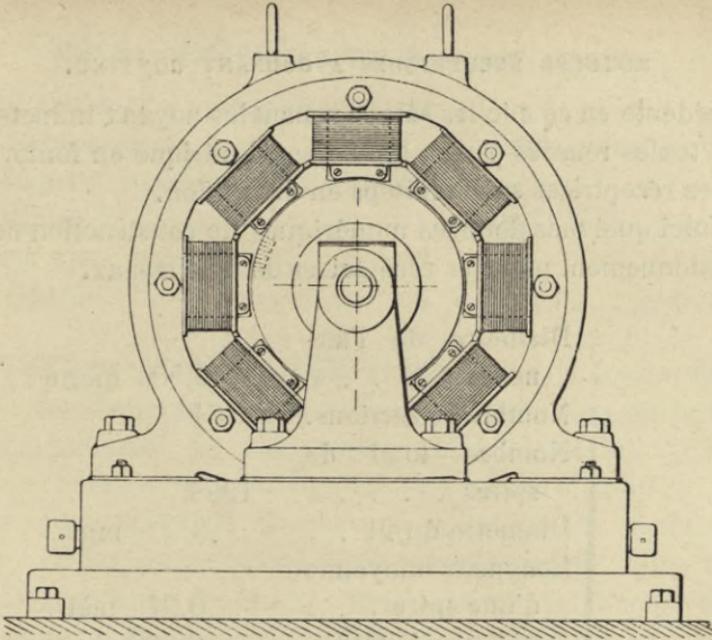


Fig. 127. — Réceptrice de 60 chevaux aux ateliers de la Seyne.

Élévation, Échelle $\frac{1}{20}$.

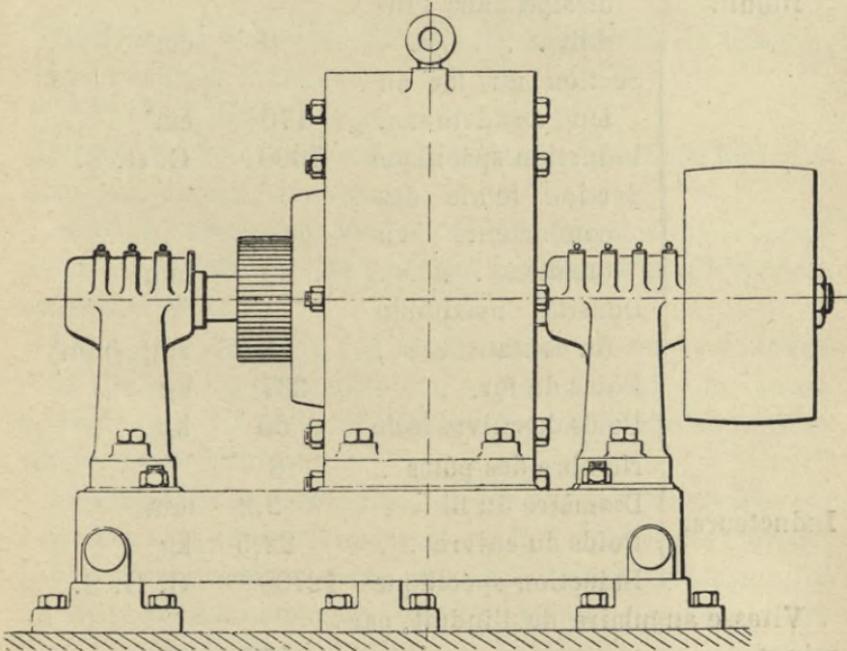


Fig. 128. — Réceptrice de 60 chevaux aux ateliers de la Seyne.

Profil, Échelle $\frac{1}{20}$.

précédente en ce que les tôles formant les noyaux inducteurs sont toutes réunies par un tambour cylindrique en fonte.

Les réceptrices sont excitées en dérivation.

Voici quelques données numériques de construction et de fonctionnement pour les réceptrices de 60 chevaux.

Induit.	{	Diamètre de l'anneau	0,50	mètre
		Nombre de sections.	84	
		Nombre total de spires	1008	
		Diamètre du fil	3	mm
		Longueur moyenne d'une spire	0,97	mètre
		Résistance à 22° C	0,039	ohm
		Surface de refroidissement, par watt dissipé dans l'induit	6	cm ²
		Section du fer au fond des dents	170	cm ²
		Induction spécifique	7600	C. G. S.
		Section totale des conducteurs en quantité	56	mm ²
		Densité maximum du courant	3,28	amp./mm ²
		Poids du fer	337	kg
		Poids du cuivre isolé	60	kg
		Inducteurs.	{	Nombre des pôles
Diamètre du fil	2,2			mm
Poids du cuivre	22,5			kg
Induction spécifique	12700			C. G. S.
Vitesse angulaire de l'induit, par				
minute	550	tours		
Vitesse périphérique, par seconde.				
		14,4	mètres	

Différence de potentiel normale aux bornes.	240	volts
Intensité maximum du courant dans l'induit	184	ampères
Intensité normale du courant d'excitation	4,03	ampères

Nous avons d'ailleurs (193) donné les essais de ces réceptrices de 60 chevaux, par la méthode des machines accouplées mécaniquement. Le rendement industriel atteint 0,89 en pleine charge et ne tombe qu'à 0,85 à moitié charge.

Les réceptrices de 25 chevaux sont établies également pour tourner normalement à 550 tours, sous 240 volts ; l'intensité maximum du courant dans l'induit est 90 ampères et le courant inducteur normal 4,5 ampères. Le rendement industriel atteint 0,84 en pleine charge et tombe à 0,67 à moitié charge.

535. — La différence de potentiel au tableau de distribution du centre générateur est réglée :

- 1° Par la vitesse de la génératrice ;
- 2° Au moyen d'un rhéostat d'excitation placé sur le circuit inducteur de cette génératrice.

Grâce à l'hypercompoundage des génératrices et au réglage possible, la différence de potentiel aux bornes des réceptrices est peu variable.

La mise en marche des réceptrices s'effectue au moyen d'un rhéostat de démarrage sur le circuit induit ; la vitesse se règle, s'il y a lieu, au moyen d'un rhéostat d'excitation, sur le circuit inducteur.

Des tableaux de distribution placés près des réceptrices reçoivent les appareils nécessaires pour la conduite et le réglage.

Un certain nombre d'arcs voltaïques, par 4 en tension, et de lampes à incandescence, par 2 en tension (lampes de 120 volts), peuvent être alimentés par la distribution, en même temps que les moteurs électriques.

CHAPITRE X

ÉTABLISSEMENT D'UN PROJET DE MOTEUR ÉLECTRIQUE

536. Généralités. — Les dynamos étant réversibles et les réceptrices ou génératrices actuelles étant semblables comme formes, il semble que les règles de construction applicables aux dynamos réceptrices doivent être identiquement les mêmes que celles en usage pour les génératrices. Mais, sans entrer dans l'étude approfondie des réactions qui se produisent chez les unes et les autres et constater, comme cela a été fait maintes fois, que l'effet de ces réactions n'est pas le même dans une même dynamo servant de génératrice ou de réceptrice, il n'est pas difficile de mettre en évidence, en s'appuyant sur l'étude théorique des moteurs et de leur fonctionnement faite précédemment (55 à 128), que les règles de construction des moteurs peuvent différer par certains points de celles des génératrices et que la méthode employée pour arriver à la détermination des divers éléments peut être variable d'un genre de dynamos à l'autre.

Pour définir une dynamo génératrice, on indique qu'elle doit donner une intensité de courant extérieur i , avec une différence de potentiel aux bornes égale à D , à une vitesse de rotation V . Suivant le prix qu'on veut mettre à la dynamo, son rendement industriel, son poids, son encombrement varieront. La vitesse de rotation elle-même n'est pas une grandeur dont la valeur doit être nécessairement donnée et réalisée avec une très grande précision, puisque cette vitesse n'est qu'un moyen d'arriver au véritable but, qui est de donner un courant i sous une différence de potentiel D et n'a pas l'inexorabilité d'un résultat à produire.

Nous savons, d'autre part, que le bon fonctionnement des

dynamos génératrices exige que les électro-aimants inducteurs aient une grande masse de fer par rapport à l'induit et que ces inducteurs ne soient pas saturés.

Voyons maintenant comment va se poser le problème des électromoteurs.

Il ne suffit plus de dire que l'électromoteur doit fonctionner avec un courant i et une différence de potentiel D , même en ajoutant que la vitesse doit être V . L'intensité du courant et la différence de potentiel aux bornes sont ici des moyens d'arriver au résultat, qui est de faire tourner à une vitesse V un appareil exigeant un effort F pour être mis en mouvement. C'est donc par cet effort et par cette vitesse qu'il faut définir le moteur. La question de poids et d'encombrement liée, pour les génératrices, surtout à la question d'économie, peut devenir prépondérante pour les moteurs, puisqu'ils peuvent être appelés à prendre place dans des espaces exigus près des appareils à faire mouvoir et même à participer au mouvement de ces derniers.

Nous avons vu enfin, à diverses reprises (63, 89), que le fonctionnement des moteurs se fait dans de meilleures conditions, si le flux inducteur est constant, ce qui, pour les électromoteurs excités en série, n'est sensiblement obtenu que lorsque les électro-aimants inducteurs sont saturés.

537. — Lorsqu'on établit un projet d'électromoteur, il importe d'abord de fixer les points suivants :

1° Grandeur du moment du couple résistant moyen sur l'axe qu'il s'agit de faire mouvoir ;

2° Vitesse en tours par minute de cet axe ;

3° Rapport des vitesses que l'on veut établir entre l'axe de l'électromoteur et l'axe qu'il doit commander ;

4° Nature du travail demandé au moteur, continu ou intermittent ;

5° Variations du moment résistant ;

6° Valeur maximum du moment résistant.

En particulier, la détermination du rapport des vitesses que l'on veut admettre pour l'axe du moteur et l'axe à commander est des plus importantes; c'est elle qui donne lieu souvent aux difficultés les plus grandes. On conçoit, en effet, que si l'axe commandé doit avoir une faible vitesse angulaire, le grand rapport des vitesses qui en résulte conduit à une grande complication pour la transmission; la multiplicité des engrenages que l'on est souvent obligé d'établir entraîne une grande perte d'énergie.

Si, pour éviter cette perte, on veut prendre un rapport des vitesses assez faible, on peut être conduit à un moteur de faible rendement et, en tout cas, le poids et l'encombrement de l'électromoteur sont accrus dans des proportions souvent considérables. Il y a là une sorte de dilemme dont il est difficile de se tirer sans une grande expérience et beaucoup d'ingéniosité.

Le rapport des vitesses étant choisi, on en conclut le moment résistant utile moyen appliqué à l'arbre du moteur et, en même temps, la vitesse en nombre de tours par minute pour cet arbre. Ce sont là les véritables points de départ pour la construction d'un électromoteur. Encore y aura-t-il lieu parfois de revenir sur le choix primitif fait pour le rapport des vitesses, parce qu'on aura été conduit, par la suite, à des dimensions pour l'électromoteur hors de proportion avec la vitesse dérivant du rapport choisi.

538. — On voit donc tout d'abord qu'un projet de moteur applicable à un travail parfaitement déterminé comprend un élément arbitraire, la vitesse du moteur, laissé à l'appréciation de l'ingénieur, mais qu'il importe de fixer avant toute autre chose.

On comprend dès lors que rien n'est moins précis que de dire : *un électromoteur de 10 chevaux*, en entendant par là un moteur capable de développer une puissance utile sur son arbre de 10 chevaux-vapeur. Une infinité de moteurs répondraient à cette définition, en admettant même que l'on fixe

en outre l'intensité du courant et la différence de potentiel aux bornes.

La puissance d'un électromoteur ne peut être prise pour base de sa construction ; elle dépend essentiellement du choix qu'on aura fait préalablement pour la vitesse de rotation.

Cette affirmation peut étonner tout d'abord, puisqu'il semble que la puissance à développer sur l'axe à faire mouvoir comme but définitif étant dans tous les cas la même, le choix d'une vitesse ou d'une autre pour l'axe du moteur ne doive pas influencer sur sa puissance mécanique utile, mais sur l'autre facteur de cette puissance, le moment utile appliqué à l'axe du moteur. En réfléchissant quelque peu à ce que nous avons dit plus haut, on comprend que plus grand est choisi l'écart entre les vitesses de l'axe du moteur et de l'axe à commander, plus est grande aussi l'énergie absorbée par la transmission, à cause de la multiplication des organes qu'elle nécessite.

En second lieu, il suffit de se reporter aux caractéristiques que nous avons tracées, par exemple pour un électromoteur excité en série (*fig. 23*), pour voir que pour deux valeurs égales de la puissance utile p_u , situées de part et d'autre du maximum et correspondant à des vitesses différentes, le rendement industriel d'un même moteur, fonctionnant avec la même différence de potentiel aux bornes, est différent ; par suite, la puissance électrique P qu'il absorbe pour développer la même puissance mécanique utile p_u peut être notablement différente suivant la vitesse adoptée.

Pour mettre en évidence d'une façon parlante, la différence des points de départ dans la construction des dynamos génératrices ou réceptrices, nous dirons encore :

La dynamo génératrice doit développer une puissance électrique utile D_i dans un certain circuit extérieur, et pour cela tourner à une vitesse V . Le rendement de cette génératrice, et par suite la puissance mécanique employée à la faire mouvoir, varie si, conservant la même vitesse de rota-

tion, on fait varier la valeur admise pour la différence de potentiel aux bornes D.

La dynamo réceptrice doit tourner à la vitesse V en actionnant un appareil déterminé, et pour cela développer sur son arbre une puissance mécanique utile p_u . Le rendement de cette réceptrice, et par suite la puissance électrique qu'elle absorbe, varie si, conservant la même valeur pour la puissance mécanique utile développée, on fait varier la valeur admise pour la vitesse de rotation.

539. — Il est indispensable de savoir si le travail qu'on exigera du moteur est continu ou intermittent; on conçoit, par exemple, que la section à donner aux fils constituant l'induit dépend du temps pendant lequel ils doivent être parcourus par le courant, autant que de l'intensité même de ce courant. On pourra employer à un travail intermittent un électromoteur de dimensions bien plus faibles que si ce travail est continu. Autrement dit, on pourra faire développer à un moteur déterminé une puissance bien plus grande, si le travail effectué est intermittent, que s'il est continu.

Si le moment résistant est, de sa nature, variable, l'électromoteur doit être établi de manière à pouvoir supporter sans échauffement trop grand, non seulement le courant correspondant à l'effort résistant moyen, mais encore aux efforts résistants plus grands qui peuvent se produire; la section des fils devra donc, dans ce cas, dépendre du moment résistant maximum et il en est de même évidemment de la solidité des pièces mécaniques, telles que l'axe de rotation, par exemple. Le choix du mode d'excitation des inducteurs pourra dépendre des variations du moment résistant; nous avons vu, en effet (**89** et **127**), que si l'on désire obtenir une vitesse constante, malgré ces variations, il faut avoir recours à l'excitation en dérivation ou compound. Il faut encore adopter l'excitation en dérivation si, la constance de la vitesse n'étant pas indispensable, on veut éviter les trop grands

écarts de vitesse qui produiraient, avec l'excitation en série, de grandes variations du moment résistant.

540. — Cet examen général des conditions de fonctionnement de l'électromoteur une fois accompli, on fait choix de sa forme. Dans ce choix interviendront, pour la plus grande part, l'économie dans la construction, la facilité de démontage et de réparation, et surtout l'amour-propre du constructeur qui veut créer un modèle original. Il ne peut y avoir de règles à ce sujet et l'on n'a qu'à s'en rapporter aux résultats expérimentaux obtenus avec des électromoteurs déjà construits. On partira donc d'un type défini ayant déjà fait ses preuves. Quant aux dimensions à donner à ce type, c'est par approximations successives qu'on parvient à les déterminer et voici comment.

· Ayant fait choix d'un type de dimensions quelconques, on détermine les éléments de l'électromoteur construit sur ces données et réalisant les conditions de vitesse et de moment utile imposées par l'application particulière que l'on a en vue ; si la grandeur trouvée pour ces éléments est satisfaisante, on s'en tient là ; sinon, on modifie judicieusement les dimensions adoptées, de façon à obtenir un meilleur résultat. Ici encore les résultats fournis par la construction antérieure d'électromoteurs de puissance comparable à celui que l'on a en vue peuvent restreindre les tâtonnements. D'ailleurs ces tâtonnements portent surtout sur les dimensions à donner à l'induit de l'électromoteur ; celles-ci admises, les dimensions des inducteurs en dépendent presque inévitablement.

· Nous allons appliquer à un exemple la méthode générale que nous venons d'indiquer, en supprimant, bien entendu, les tâtonnements.

PROJET DE MOTEUR ÉLECTRIQUE POUR TREUIL

541. Données du problème mécanique à résoudre. — Supposons qu'il s'agisse de soulever un poids

moyen de 100 kg, avec une vitesse linéaire verticale de 0,33 m par seconde.

Le câble du treuil s'enroule sur un tambour de 20 cm de diamètre ; le nombre de tours que ce tambour devra faire par seconde sera donc égal à 0,53, soit par minute 32 tours environ.

L'effort tangentiel sur le tambour étant égal à 100 kg, le moment résistant moyen sur son axe sera donc $100 \times 0,10$ ou 10 kilogrammètres.

Nous supposerons que le poids soulevé peut varier de 20 kg en plus ou en moins ; le moment résistant peut prendre, par suite, des valeurs comprises entre 8 et 12 kilogrammètres.

Bien entendu, au démarrage, le moment résistant pourra acquérir des valeurs bien plus considérables ; nous parlerons de la valeur du moment résistant au démarrage quand nous aurons déterminé la transmission du mouvement de l'arbre du moteur à l'axe du tambour.

542. Vitesse adoptée pour l'électromoteur. —

La puissance mécanique moyenne du treuil est de 33 kgm/s ; nous serons amenés sans doute à demander le double environ à l'électromoteur. Or un électromoteur d'une puissance de 60 kgm/s est généralement établi pour des vitesses voisines de 2000 tours par minute, lorsque la différence de potentiel aux bornes est elle-même voisine de 100 volts ; mais il ne faut pas perdre de vue que la vitesse prévue pour l'axe du tambour du treuil est de 32 tours par minute, et qu'en adoptant une vitesse de 2000 tours il faudrait la réduire dans le rapport $\frac{1}{62}$ environ. Si nous ne voulons pas employer des roues d'engrenages de trop grand diamètre, nous ne pourrions guère réduire la vitesse avec un seul train d'engrenages que dans le rapport $\frac{1}{6}$; si nous ne voulons que deux réductions successives, nous ne réduirons la vitesse que dans le

rapport $\frac{1}{36}$ et nous serons conduits à adopter pour l'électromoteur une vitesse inférieure à celle que nous avons donnée comme généralement admise. Pour obtenir les 32 tours par minute sur l'axe du tambour, nous devons donner à l'induit du moteur une vitesse angulaire égale à 32×36 ou 1150 tours par minute environ.

En adoptant ainsi pour le moteur une vitesse un peu faible, nous serons naturellement conduits à augmenter ses dimensions et son poids ; il est vrai que l'électromoteur fonctionnera dans de meilleures conditions de solidité. Le moteur dont nous nous occupons est d'ailleurs destiné à occuper une position fixe et une légère augmentation de poids n'a, par suite, qu'une importance secondaire. Il faut remarquer en outre que cet excédent de poids de l'électromoteur dû au choix d'une vitesse plutôt faible peut compenser l'augmentation du poids des engrenages qu'entraînerait une vitesse plus grande.

543. Puissance mécanique utile du moteur; moment utile. — Le rapport des vitesses du moteur et du treuil étant choisi et même les organes de transmission étant décidés, deux trains d'engrenages ici, on peut évaluer approximativement la perte de puissance due à la transmission et aux frottements de l'axe du treuil sur ses coussinets en se rapportant à des expériences antérieures faites dans des conditions analogues, ou même en essayant directement la transmission par engrenages que l'on veut employer.

Nous supposerons ici que la transmission et les frottements du treuil absorbent 35 p. 100 de l'énergie mécanique développée par le moteur électrique ; c'est un chiffre qui n'a rien d'exagéré dans le cas qui nous occupe, où les engrenages doivent être robustes, en raison du genre de travail que l'appareil est destiné à produire et qui peut amener des chocs.

Par suite, la puissance mécanique résistante correspondant

au poids soulevé n'étant égale qu'à 65 p. 100 de la puissance mécanique utile p_u du moteur, on a

$$p_u = \frac{33}{0,65} = 50,7 \text{ kgm/s.}$$

Le moment utile sur l'arbre du moteur est alors, avec une vitesse de 1150 tours par minute,

$$T_u = \frac{30 p_u}{\pi V} = \frac{30 \times 50,7}{\pi \times 1150} = 0,448 \text{ kgm.}$$

544. Puissance électrique absorbée par le moteur. — Pour connaître la puissance électrique absorbée par le moteur, nous devons encore admettre une valeur pour son rendement industriel ; nous le prendrons, par exemple, égal à 0,70. Ici encore les essais antérieurs peuvent guider ; si on s'est trompé dans cette évaluation du rendement, la suite des déterminations le montrera aisément et le calcul sera refait en partant d'une nouvelle valeur.

La puissance électrique P du moteur sera alors

$$P = \frac{p_u}{0,70} = \frac{50,7}{0,70} = 72,4 \text{ kgm/s,}$$

ou bien

$$P = 72,4 \times 9,81 = 710 \text{ watts.}$$

545. Différence de potentiel aux bornes et intensité du courant. — La puissance électrique absorbée par le moteur est égale au produit Di de la différence de potentiel aux bornes D par l'intensité i du courant arrivant au moteur. Nous pouvons encore choisir arbitrairement l'un des facteurs D ou i ; nous pouvons construire un moteur à potentiel élevé et faible courant, ou l'inverse.

Dans la plupart des cas, le choix d'un des facteurs est déterminé par la source qui doit alimenter le moteur. Ainsi, par exemple, si la source distribue sous une différence de potentiel de 80 volts, nous prendrons D égale à 80 volts.

Dans ce cas, l'intensité i du courant est

$$i = \frac{710}{80} = 8,8 \text{ ampères.}$$

546. Force contre-électromotrice. — Pour déterminer la force contre-électromotrice du moteur, nous devons en premier lieu faire choix du mode d'excitation et, en second lieu, admettre une valeur pour la chute de potentiel dans les conducteurs constituant le moteur.

Supposons que l'excitation soit faite en série et que 17 p. 100 de la puissance électrique absorbée par le moteur soient dissipés par l'échauffement des conducteurs de l'induit et de l'inducteur. La chute de potentiel dans l'inducteur et l'induit sera aussi égale à 17 p. 100 de la différence de potentiel aux bornes; celle-ci étant 80 volts, la chute sera égale à 13,6 volts.

La force contre-électromotrice du moteur sera dès lors

$$e = 80 - 13,6 = 66,4 \text{ volts.}$$

547. Forme et dimensions de l'induit. — Nous adopterons comme type du moteur celui représenté par la figure 129. L'induit est en forme d'anneau Gramme; son noyau A est constitué par des tôles minces de fer découpées en couronnes, empilées et séparées par du papier isolant. Le diamètre extérieur de ces tôles est de 13 cm

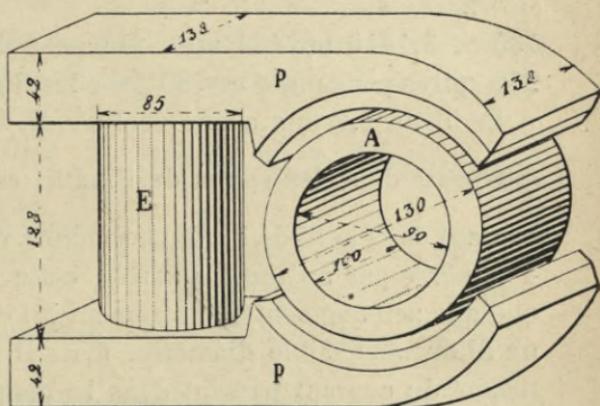


Fig. 129. — Carcasse magnétique d'un projet d'électromoteur.

et leur diamètre intérieur de 9 cm, ce qui donne à l'an-

neau de fer qu'elles constituent une épaisseur radiale de 2 cm.

Des tôles de ces mêmes dimensions peuvent être employées pour des électromoteurs de puissances très différentes, à la condition de faire varier convenablement le nombre des tôles empilées pour former le noyau de l'induit, c'est-à-dire la section du fer de l'anneau.

L'inducteur sera constitué par un seul électro-aimant E, avec deux masses polaires P embrassant l'induit. Le noyau de cet électro-aimant ainsi que les masses polaires sont supposés en fer doux.

548. Nombre des spires enroulées sur l'induit.

— Supposons que nous prenions pour enrouler l'induit du fil de cuivre de 1,2 mm de diamètre ; ce diamètre a été porté à 1,6 mm par un isolant constitué par deux couches de coton. En superposant 3 rangées de spires, on donnera à l'enroulement une épaisseur de 4,8 mm ; avec un isolement de papier ou de toile interposé entre l'enroulement et le noyau de fer, cette épaisseur sera portée à 5 mm. Le diamètre moyen de la circonférence occupée par les spires sera donc égal à $\frac{130 + 140}{2}$ ou 135 mm ; le développement en est égal à $135 \times 3,1416$ ou 424 mm. On peut donc loger aisément 260 spires par rangée et 780 pour les 3 rangées.

Le fil de 1,2 mm a une section de $1,13 \text{ mm}^2$, le courant qui passe dans les spires de l'induit est $\frac{8,8}{2}$; la densité du courant dans le fil de l'induit est donc un peu moindre que 4 ampères par millimètre carré ; cette densité pourrait être quelque peu augmentée, autrement dit on pourrait employer un fil de plus faible diamètre, mais il faut songer que l'intensité du courant passant dans le moteur pourra être augmentée par suite de l'accroissement du poids soulevé, ou tout au moins momentanément au démarrage.

Le nombre total des spires de l'induit étant 780, on

pourra le partager, par exemple, en 52 bobines de 15 spires chacune, c'est-à-dire donner 52 lames au collecteur.

549. Flux de force utile dans les spires de l'induit. — La force contre-électromotrice du moteur est donnée en volts par la formule (14)

$$e = \frac{nNV\Phi'}{30 \times 10^8},$$

dans laquelle V est la vitesse de rotation en tours par minute, Φ' le flux maximum utile passant dans une spire de l'induit exprimé en unités C. G. S., nN le nombre total des spires enroulées sur l'induit.

En remplaçant e , V , nN par leurs valeurs déterminées précédemment, on a

$$\Phi' = \frac{66,4 \times 30 \times 10^8}{780 \times 1150} = 222070 \text{ unités C. G. S.}$$

550. Induction spécifique dans le fer de l'induit.

— En donnant au noyau en fer de l'induit une longueur, suivant l'axe de rotation, de 10 cm, sa section sera de 20 cm², puisque l'épaisseur radiale est de 2 cm ; mais il faut réduire cette section aux 0,9 de sa valeur pour tenir compte du papier interposé entre les tôles minces, de sorte que la section réelle du fer n'est que 18 cm².

L'induction spécifique \mathfrak{B}_1 dans le fer de l'induit sera donc

$$\mathfrak{B}_1 = \frac{222070}{18} = 12300 \text{ unités C. G. S.}$$

Cette valeur est très admissible si le fer est de bonne qualité.

551. Résistance de l'induit. — Nous pouvons maintenant calculer la résistance de l'induit. Le rectangle moyen formé par une spire a pour longueur 105 mm et pour hauteur 25,8 mm (en tenant compte de ce qu'à l'intérieur de l'an-

neau il faudra 4 rangées de spires superposées au lieu des 3 rangées extérieures). La longueur moyenne d'une spire sera donc $2(105 + 25,8)$, ou 262 mm. La longueur des 780 spires sera

$$0,262 \times 780 = 206,36 \text{ mètres.}$$

En admettant pour le cuivre une résistance spécifique de 1,85 microhm-centimètre (pour tenir compte de l'élévation probable de température), on trouve, pour la résistance des 780 spires de l'induit, 3,33 ohms.

La résistance r_a de l'induit entre les balais est 4 fois plus petite, en supposant l'inducteur bipolaire. On a donc

$$r_a = \frac{3,33}{4} = 0,832 \text{ ohm.}$$

552. Flux inducteur. — Nous avons vu (22) qu'entre le flux Φ_1 créé par les inducteurs et le flux Φ passant dans chacune des moitiés de l'anneau de fer induit existe la relation

$$\Phi_1 = 2\Phi \times v,$$

v étant un coefficient auquel on peut donner ici la valeur 1,3 et qui tient compte des dérivations du flux en dehors de l'induit. Il faut aussi tenir compte de la réaction d'induit; mais nous la négligerons provisoirement, pour y revenir plus tard.

Le flux Φ_1 passant dans les inducteurs est donc

$$\Phi_1 = 2 \times 222070 \times 1,3 = 577400 \text{ unités C. G. S.}$$

553. Induction spécifique dans le noyau de l'électro-aimant inducteur. — Si l'on veut que l'induction spécifique \mathfrak{B}_e dans le noyau de l'électro-aimant inducteur soit égale à 10000 unités C. G. S., il faudra donner à ce noyau une section S , dont la valeur soit

$$S = \frac{577400}{10000} = 57,7 \text{ cm}^2.$$

Si le noyau est supposé cylindrique, cette section correspond à un diamètre d'environ 85 mm.

Nous admettons, provisoirement et jusqu'à vérification de convenance, que la longueur du noyau est égale à 128 mm.

Si nous voulons que l'inducteur spécifique \mathfrak{B}_r soit aussi 10000 unités C. G. S. dans les masses polaires, nous leur donnerons une section de 57,7 cm², c'est-à-dire, par exemple, une épaisseur suivant l'axe de l'électro-aimant de 4,2 cm et une profondeur suivant l'axe de l'induit de 13,8 cm. Pour la partie de ces masses polaires qui embrassent l'induit, cette profondeur sera réduite à 11 cm, de manière que les masses polaires affleurent l'enroulement.

554. Entrefer ; induction spécifique dans l'entrefer. — L'entrefer sera constitué de la manière suivante :

Isolant sur le noyau induit (papier ou toile)	0,2 mm
Enroulement de l'induit	4,8 mm
Ligatures de l'enroulement	1,0 mm
Jeu	1,0 mm
Longueur de l'entrefer	7,0 mm

Pour les deux entrefers la longueur totale sera de 14 mm.

Les masses polaires embrassent autour de l'induit un arc de 120° environ et sont alésées à un diamètre de 130 + 14 ou 144 mm.

L'arc de 120° moyen entre la surface interne des masses polaires et la surface externe du noyau induit de 130 mm a pour longueur 143,5 mm. D'après M. M. Hopkinson, il faut ajouter de chaque côté de cet arc une bande égale aux 0,8 de la longueur de l'entrefer ; dans le cas présent, il faut donc ajouter $2 \times 0,8 \times 7 = 11,2$ mm, ce qui porte à 154,7 mm la longueur de l'arc correspondant au champ magnétique dans l'entrefer.

La profondeur des masses polaires étant à cet endroit égale à 11 cm, la surface du champ polaire sera

$$15,47 \times 11 = 170,2 \text{ cm}^2.$$

Le flux de force passant dans l'entrefer étant le double du flux passant dans les spires de l'induit, ou $2 \times 222070 = 444140$, l'induction spécifique dans l'entrefer sera

$$\mathfrak{B}_r = \frac{444140}{170,2} = 2610 \text{ unités C. G. S.}$$

555. Calcul des forces magnétomotrices. — Nous savons que dans un circuit magnétique la force magnétomotrice est égale à la somme des produits de la résistance magnétique de chacune des parties constituant le circuit par le flux de force traversant cette partie. La force magnétomotrice est ici, abstraction faite de la réaction d'induit, égale à $4\pi n' i$, n' étant le nombre des spires de l'électro-aimant inducteur et i l'intensité du courant parcourant ces spires. On a donc

$$4\pi n' i = \Sigma \Phi \mathfrak{R}.$$

On a d'ailleurs, pour une partie quelconque du circuit magnétique,

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu s},$$

l étant la longueur des lignes de force, s la section de la partie considérée et μ sa perméabilité magnétique; d'autre part, les équations suivantes relient le flux Φ , l'induction spécifique \mathfrak{B} , la force magnétisante \mathfrak{H} et la perméabilité μ .

$$\Phi = \mathfrak{B} s,$$

$$\mathfrak{B} = \mu \mathfrak{H}.$$

On en conclut

$$4\pi n' i = \Sigma \mathfrak{H} l.$$

La force magnétomotrice est donc égale à la somme des produits, pour chaque partie du circuit magnétique, de la

longueur par la force magnétisante correspondant à l'induction spécifique dans cette partie.

On peut évidemment employer les unités C. G. S. pour calculer cette dernière formule ; on a alors

$$4 \pi n' i \text{ unités C. G. S.} = \Sigma \mathfrak{H} \text{ unités C. G. S.} \times l \text{ centimètres.}$$

Mais comme le résultat final cherché est le nombre d'ampèretours nécessaires à l'excitation, on mettra la formule sous la forme

$$n' i \text{ ampères} = \Sigma \frac{10 \mathfrak{H} \text{ unités C. G. S.}}{4 \pi} \times l \text{ centimètres.}$$

Le nombre $n' i$ représente alors le nombre d'ampèretours de l'excitation. Comme la somme des produits des nombres $\frac{10 \mathfrak{H} \text{ unités C. G. S.}}{4 \pi}$ par la longueur correspondante exprimée en centimètres représente des ampèretours, on peut dire que chaque nombre $\frac{10 \mathfrak{H} \text{ unités C. G. S.}}{4 \pi}$ représente les *ampèretours par centimètre* correspondant à la partie du circuit considérée, ou bien la force magnétisante exprimée en ampèretours par centimètre. Le produit $\frac{10 \mathfrak{H} \text{ unités C. G. S.}}{4 \pi} \times l \text{ centimètres}$ représentera le nombre d'ampèretours nécessité par la partie du circuit correspondante.

On peut dresser à l'avance une table des valeurs de $\frac{10 \mathfrak{H} \text{ unités C. G. S.}}{4 \pi}$, ou $0,8 \mathfrak{H} \text{ unités C. G. S.}$ correspondant aux diverses valeurs usuelles de l'induction spécifique pour les métaux magnétiques les plus employés, fer, fonte ; pour l'air, \mathfrak{H} se confond avec l'induction spécifique \mathfrak{B} .

Nous donnons ci-après cette table, calculée par M. Hospitalier¹.

1. *L'Industrie électrique*. — 25 février 1892.

556. Table des forces magnétisantes en fonction de l'induction.

INDUCTION spécifique \mathfrak{B} en unités C. G. S.	FORCE MAGNÉTISANTE en ampères-tours par centimètre.		
	Air.	Fonte.	Fer doux.
1000	800	»	»
2000	1600	»	»
3000	2400	»	»
4000	3200	4	»
5000	4000	8	1,6
6000	4800	17,2	1,95
7000	5600	33,6	2,3
8000	6400	64,0	2,7
9000	7200	101,6	3,2
10000	8000	150,4	4,0
11000	»	233,6	5,2
12000	»	»	6,8
13000	»	»	9,6
14000	»	»	13,6
15000	»	»	22,8
16000	»	»	41,6
17000	»	»	84
18000	»	»	160
19000	»	»	280
20000	»	»	»

557. Joints. — Dans le calcul des forces magnétomotrices, il faut tenir compte des joints existant entre les diverses pièces magnétiques. M. Ewing a étudié cette influence des joints et reconnu qu'un joint équivaut à l'introduction dans le circuit magnétique d'une couche d'air d'épaisseur un peu variable avec l'induction spécifique des pièces qu'il sépare. Voici les résultats obtenus pour des barres en fer et des joints bien ajustés.

INDUCTION spécifique \mathfrak{B} en unités C. G. S.	LONGUEUR d'air en cm de même résistance que celle du joint.
4000	0,0026
6000	0,0030
8000	0,0031
10000	0,0031
12000	0,0035
14000	0,0037

Le nombre d'ampèretours correspondant à un joint est donc $0,8 \mathfrak{B} \times K$, K étant une des longueurs du tableau précédent. La valeur moyenne de K pour les inductions généralement employées étant 0,0033, le nombre d'ampèretours pour un joint peut être pris égal à $0,0027 \mathfrak{B}$.

558. Application au moteur étudié. — Nous pouvons maintenant appliquer au moteur qui nous occupe le calcul des forces magnétomotrices tel que nous venons de l'exposer. Nous avons indiqué successivement l'induction spécifique dans les diverses parties du circuit magnétique. La longueur l des lignes de force est relevée sur le plan du moteur.

	\mathfrak{B} .	l .	$\frac{10 \mathfrak{B}}{4 \pi}$	NOMBRE d'ampère- tours.
Noyau de l'électro-aimant.	10000	12,8	4	51,2
Masses polaires	10000	2×17	4	136
Joints	10000	$2 \times 0,0031$	8000	49,6
Anneau induit.	12300	13	7,6	98,8
Entrefers	2610	$2 \times 0,7$	2088	2920
NOMBRE TOTAL D'AMPÈRETOURS				3255,6

559. Réaction d'induit. — Le nombre d'ampèretours nécessaires à l'excitation serait donc égal à 3255, si l'on n'avait pas à compter avec la réaction d'induit et l'effet du décalage des balais.

D'après M. M. Hopkinson, pour en tenir compte il faut ajouter à la force magnétomotrice calculée comme précédemment un nombre d'ampèretours égal à $\frac{\alpha}{\pi} \cdot n N \frac{i_a}{2}$, α étant l'angle de décalage des balais, nN le nombre total des spires sur l'induit et i_a le courant total en ampères passant dans l'induit. En appliquant au cas qui nous occupe et prenant $\frac{\alpha}{\pi} = \frac{1}{6}$, ce qui correspond à un angle de décalage de 30°, on trouve pour le nombre d'ampèretours à ajouter 570.

Le nombre d'ampèretours total devra donc être 3800 en chiffres ronds.

560. Nombre des spires et résistance de l'électro-aimant. — Comme l'intensité du courant inducteur est 8,8 ampères et le nombre d'ampèretours à réaliser 3800, le nombre de spires n' de l'électro-aimant sera

$$n' = \frac{3800}{8,8} = 431.$$

Si nous prenons du fil de 2,2 mm de diamètre, ou avec l'isolement de coton de 2,6 mm, on pourra aisément loger 43 spires sur la longueur du noyau et réserver même aux deux bouts un espace suffisant pour placer entre l'enroulement et les pièces polaires deux lames isolantes. Avec 10 couches, on aura 430 spires.

L'épaisseur de l'enroulement sera alors de $2,9 \times 10 = 27$ mm. Le noyau enroulé aura donc un diamètre total de $85 + 52$ ou 137 mm. La longueur moyenne d'une spire étant alors 35 cm environ, la longueur des 430 spires sera 151 mètres.

La résistance du fil inducteur, en prenant toujours 1,85 microhm-centimètre comme résistance spécifique, sera

$$r_g = 0,733 \text{ ohm.}$$

561. Poids approximatifs. — Nous donnons ci-après les poids approximatifs des diverses pièces de l'électromoteur.

Induit	{	Fer	4,9 kg
		Enroulement	2,2
Électro-aimant.	{	Fer	5,3
		Enroulement	5,2
Masses polaires.			20,4
Axes, paliers, coussinets, etc.			5,0
		Poids total	<u>43,0 kg</u>

562. Vérifications. — Le projet de moteur étant établi, il importe de soumettre les divers éléments trouvés ou admis à des vérifications ; si elles se font, c'est que le choix des grandeurs prises arbitrairement est convenable ; sinon on refait un nouveau projet, après modification convenable des grandeurs arbitraires. Nous avons supposé exécutés tous les calculs préalables et n'avons conservé que les calculs définitifs. Nous allons cependant soumettre ce projet définitif aux mêmes vérifications que les projets provisoires antérieurs.

Tout d'abord, nous avons admis que 17 p. 100 de la puissance électrique étaient dissipés par l'échauffement des conducteurs de l'induit et de l'inducteur et que, par suite, la chute de potentiel dans ces conducteurs était aussi égale à 17 p. 100 de la différence de potentiel aux bornes.

Nous avons trouvé :

Résistance de l'induit : $r_a = 0,832$ ohm. On en déduit, pour une intensité de courant de 8,8 ampères,

Chute de potentiel dans l'induit . . . $r_a i = 7,3$ volts ;

Perte de puissance dans l'induit . . . $r_a i^2 = 64,4$ watts.

On a de plus :

Résistance de l'inducteur $r_g = 0,733$ ohm ;
 Chute de potentiel dans l'inducteur. $r_g i = 6,4$ volts ;
 Perte de puissance dans l'inducteur. $r_g i^2 = 56,8$ watts.

La chute de potentiel totale est donc 13,7 volts, au lieu de 13,6 que nous avons admis ; la force contre-électromotrice sera donc 66,3 volts, au lieu de 66,4 ; la vitesse sera inférieure de $\frac{1}{600}$ environ à celle prévue, variation absolument négligeable.

La perte totale de puissance dans l'induit et l'inducteur est 121,2 watts, c'est-à-dire pour une puissance électrique totale de 710 watts, 17,07 p. 100, chiffre aussi voisin que possible de celui que nous avons prévu.

563. — Nous avons aussi admis un rendement industriel de 0,70 ; nous venons de voir que 17 p. 100 de la puissance électrique sont bien absorbés par l'échauffement des conducteurs ; il restera donc 13 p. 100 pour les courants de Foucault, l'hystérésis et les frottements mécaniques dans le moteur. Nous ne pouvons évaluer ces derniers, puisqu'ils dépendent essentiellement de l'entretien et du graissage de l'axe et de ses coussinets, ni même avec quelque exactitude la perte de puissance par courants de Foucault, de sorte que la vérification du rendement ne pourra se faire que le moteur une fois construit. Cependant, comme nous pouvons calculer assez exactement la puissance absorbée par l'hystérésis, on peut toujours vérifier que cette perte rentre bien dans les limites imposées.

Pour faire le calcul de la perte par hystérésis, on utilise la formule de M. Steinmetz :

$$\frac{W}{V} = \eta B^{1,6},$$

dans laquelle W est l'énergie en ergs dissipée par hystérésis dans un cycle complet d'aimantation, V le volume du fer en cm^3 , \mathfrak{B} l'induction spécifique en unités C. G. S. et η un coefficient variable avec la qualité du métal magnétique employé. Pour le fer doux, ce coefficient peut être pris égal à 0,002; mais nous admettrons ici une valeur double, pour raisonner *a fortiori*.

Le volume du fer de l'induit est égal à 622 cm^3 et l'induction spécifique γ est égale à 12300 unités C. G. S. On a donc

$$W = 0,004 \times \overline{12300}^{1,6} \times 622 = 8703600 \text{ ergs}$$

ou

$$W = \frac{8703600}{10^7} = 0,870 \text{ joule.}$$

Comme la vitesse est de 1150 tours par minute, nous aurons 19 cycles décrits par seconde; l'énergie dépensée par seconde, ou la perte de puissance par hystérésis, sera

$$p_h = 0,870 \times 19 = 16,5 \text{ watts,}$$

c'est-à-dire un peu plus de 2 p. 100 de la puissance électrique totale. Il restera donc au moins 11 p. 100 pour les courants de Foucault et les frottements mécaniques, ce qui paraît plus que suffisant, si la division du fer de l'induit est bien faite et si le graissage du moteur est convenable.

564. — Il importe aussi de vérifier si le refroidissement de l'induit et de l'inducteur est suffisamment assuré pour que la température n'y devienne pas excessive.

M. Esson a établi que pour des électro-aimants dont l'enroulement ne dépasse pas 7 à 8 centimètres, l'échauffement en degrés centigrades θ est donné par la formule

$$\theta = \frac{355 \times p_c}{S},$$

dans laquelle p_c est la puissance en watts absorbée par l'échauffement de l'inducteur suivant la loi de Joule et S la surface de rayonnement en cm^2 .

La surface rayonnante de l'électro-aimant unique comprend la surface externe de l'enroulement et les deux faces latérales de l'électro-aimant. Comme le diamètre extérieur est de 13,7 cm et la hauteur enroulée de fil de 12 cm, la surface rayonnante sera de 811 cm^2 . On a donc, pour la température d'échauffement

$$\theta = \frac{355 \times 56,8}{811} = 25^\circ \text{C.}$$

Cet échauffement est donc tout à fait admissible; il conduit à une température de 40° C., si la température ambiante est de 15° C. C'est cette température que nous avons supposée en admettant 1,85 microhm-centimètre pour la résistance spécifique du fil de cuivre.

Pour l'induit, la température d'échauffement est, d'après M. Esson,

$$\theta = \frac{255 p_c}{S},$$

p_c étant toujours la puissance en watts dissipée et S la surface de rayonnement en cm^2 . Cette surface de rayonnement comprend la surface périphérique de l'anneau enroulé et les deux couronnes annulaires sur les deux faces. Le diamètre extérieur de l'anneau enroulé est de 140 mm; le diamètre intérieur est de 76,8 mm (en tenant compte des quatre rangées de fil superposées à l'intérieur). La longueur axiale de l'induit étant 100 mm, la surface rayonnante sera égale à $439,8 + 2 \times 107,7$, ou 655 cm^2 . La perte de puissance dans l'induit étant 64,4 watts, on a

$$\theta = \frac{255 \times 64,4}{655} = 25^\circ \text{C.}$$

L'échauffement, de même valeur que celui de l'inducteur, est donc bien encore dans les limites admises.

565. — Calculons maintenant la vitesse périphérique de l'anneau induit. Avec un diamètre extérieur de 14 cm et une vitesse angulaire de 1150 tours par minute, la vitesse périphérique sera de 8,4 mètres par seconde; c'est une valeur plus faible que celle généralement admise; nous avons expliqué le choix de cette vitesse réduite.

566. Remarques. — Le projet de moteur que nous venons d'établir ne saurait prétendre à une précision absolue; il importe en effet de faire observer que nous avons admis sans vérification deux éléments du problème, la nature du fer employé pour la construction, ou les forces magnétisantes correspondant aux inductions employées, et l'angle de calage des balais. Il est clair qu'une construction réelle d'un moteur devra toujours être précédée d'une étude des propriétés magnétiques des métaux qui doivent le constituer.

D'ailleurs, même en dehors de ces deux points, le moteur établi est loin d'être le seul qui satisfasse aux conditions mécaniques que nous avons posées; ce n'est même pas probablement le plus avantageux, c'est-à-dire le plus économique et le plus léger. La comparaison de divers projets établis sur les mêmes bases pourrait seule montrer exactement si des modifications apportées au projet que nous venons d'exposer produiraient ou non un effet heureux.

567. — Il est clair, en particulier, qu'on pourrait modifier les dimensions des tôles découpées servant à confectionner le noyau en fer de l'induit, diminuer, par exemple, le diamètre extérieur. Si l'on veut conserver la même vitesse de rotation et le même flux dans l'induit, il faudra conserver aussi le même nombre de spires; comme le nombre de spires logées sur la circonférence devient plus faible, il faudra augmenter le nombre des couches de fil et par suite la longueur

de l'entrefer. Si l'on veut avoir dans l'entrefer la même induction spécifique qu'auparavant, comme l'arc embrassé par les masses polaires aura diminué de longueur, il faudra augmenter la profondeur des masses polaires suivant l'axe de l'induit et par suite la longueur de celui-ci. Même avec cet allongement de l'induit, qui peut conduire à une augmentation de poids du fer et du cuivre et à une augmentation de résistance, le nombre d'ampèretours correspondant à l'entrefer sera augmenté proportionnellement à sa longueur et le tableau que nous avons donné (558) montre que l'entrefer est de beaucoup la partie du circuit magnétique qui réclame la portion la plus considérable de l'excitation. On sera donc conduit fatalement à augmenter le poids du cuivre sur l'inducteur. A supposer même que l'induit ait diminué de poids, il n'est donc pas certain *a priori* qu'il y ait gain sur le total.

Si, pour conserver la même longueur à l'entrefer, après réduction du diamètre du noyau induit, on consent à une diminution du nombre des spires induites, comme le flux devra être alors augmenté, le nombre d'ampèretours inducteurs devra encore être accru, à moins que la section du fer de l'induit et la surface de champ de l'entrefer ne soient augmentées convenablement.

568. — On peut être tenté d'augmenter le rendement de l'électromoteur en diminuant la résistance du fil induit. On ne peut y parvenir, si on veut conserver le même nombre de spires, qu'en augmentant la section du fil et par suite la longueur de l'entrefer, ce qui conduit toujours à une augmentation de l'excitation, et rien ne montre à l'avance si l'on gagnerait à cette modification.

Supposons, par exemple, qu'on porte le diamètre du fil enroulé sur l'induit de 1,2 mm à 1,5 mm. Les sections étant respectivement 1,13 mm² et 1,76 mm², la résistance du fil induit sera réduite de 0,832 à 0,534 ohm, et la perte de puissance de 64,4 à 41,4 watts.

Mais chaque entrefer ayant été augmenté de $0,3 \times 3$

$= 0,9$ mm, on voit, en se reportant au tableau donné précédemment, que le nombre d'ampèretours supplémentaire devra être

$$2088 \times 2 \times 0,09 = 376.$$

Le nombre des spires inductrices devra être augmenté de $\frac{376}{8,8} = 43$. Comme chaque spire supplémentaire a un diamètre de 13,7 cm, la longueur du fil ajouté sur l'inducteur sera 18,5 m, et sa résistance 0,09 ohm. La résistance du fil inducteur sera donc portée de 0,733 à 0,823 ohm et la perte de puissance de 56,8 à 63,7 watts.

La perte totale sera donc réduite de 121 à 105 watts, c'est-à-dire qu'elle passera de 17 p. 100 à 14,8 p. 100 de la puissance électrique totale. Il y aura donc un gain appréciable au point de vue du rendement, dans le cas présent. Dans d'autres circonstances, il pourrait y avoir désavantage. Il faut songer cependant que cette augmentation de 2,2 p. 100 dans le rendement n'est acquise, comme toujours, qu'au détriment du poids. Il est facile de voir que l'augmentation totale du poids du cuivre, tant sur l'induit que sur l'inducteur, sera de 1,7 kg, c'est-à-dire 22 p. 100 du poids primitif du cuivre.

569. — Une augmentation du diamètre du fil inducteur, le nombre des spires restant le même, conduira toujours à une majoration du rendement. Mais, outre que le poids du cuivre employé à la construction pourra être considérablement augmenté, on pourra être amené, pour loger le fil plus gros, à augmenter la longueur du noyau de l'électro-aimant, et par suite le poids du fer.

Nous n'avons donné ces quelques exemples que pour montrer comment la période préparatoire de l'établissement d'un projet de moteur électrique peut entraîner de longs tâtonne-

ments, si l'on désire faire non pas un moteur quelconque, mais un moteur présentant quelque avantage particulier, d'économie ou de poids, par exemple.

570. Variations du moment résistant. — Nous avons jusqu'à présent laissé de côté les variations admises pour le moment résistant appliqué au moteur; nous devons examiner si le moteur, tel que nous l'avons projeté, peut supporter ces variations.

Nous avons dit que le moment résistant peut prendre des valeurs comprises entre 8 et 12 kilogrammètres, le moment moyen étant égal à 10 kgm.

Une diminution du moment résistant amènera une augmentation de la vitesse; mais nous avons admis pour celle-ci une valeur assez faible pour que rien ne soit à craindre de ce côté; en même temps, le courant passant dans le moteur diminuera, ce qui ne peut que rendre meilleures les conditions de fonctionnement, au point de vue de l'échauffement.

Au contraire, l'augmentation du moment résistant amène une diminution de la vitesse et une augmentation du courant et il faut examiner si celle-ci n'est pas exagérée; car nous supposons que l'électromoteur peut être appelé à fonctionner pendant quelque temps avec cet accroissement de charge.

En admettant que le flux de force demeure invariable et que le moment résistant parasite soit négligeable, comme le moment moteur est proportionnel au produit du flux par le courant, celui-ci devrait croître comme le moment résistant utile et, puisqu'à un moment de 10 kgm correspond une intensité de 8,8 ampères, un moment de 12 kgm exigerait une intensité de 10,56 ampères.

Mais le flux augmente en même temps que le courant; de plus, la portion du moment parasite relative aux courants de Foucault diminue quand la vitesse diminue (50); par suite, le courant n'atteindra même pas 10 ampères.

La résistance du fil inducteur, par exemple, étant 0,733

ohm, la perte de puissance sera tout au plus 73,3 watts et l'échauffement (564)

$$\theta = \frac{355 \times 73,3}{811} = 32^{\circ} \text{C.},$$

ce qui n'a rien d'exagéré.

571. — Au démarrage, le moment résistant utile peut et doit prendre une valeur bien supérieure au moment résistant moyen. Le courant maximum qui passera dans le moteur immobilisé sera, avec une différence de potentiel aux bornes de 80 volts et une résistance totale de $0,832 + 0,733 = 1,565$ ohm,

$$i_m = \frac{80}{1,565} = 51 \text{ ampères.}$$

Le moment moteur sera donc au moins multiplié par 6 ; or le moment résistant au démarrage ne sera certainement pas augmenté dans cette proportion. Le moteur démarrera toujours, et même il sera possible d'introduire dans le circuit un rhéostat de démarrage pour réduire le courant. Rappelons d'ailleurs que le démarrage ne durant qu'un temps très faible, il n'y a pas à s'inquiéter outre mesure de l'exagération momentanée du courant.

572. Modifications apportées par l'excitation en dérivation. — Nous pouvons maintenant étudier quelles modifications entraînerait dans l'électromoteur la substitution de l'excitation en dérivation à l'excitation en série actuellement prévue.

Nous supposons que, conservant le même induit, on enroule l'électro-aimant avec un fil en dérivation entre les bornes du moteur, de manière à obtenir le même nombre d'ampèretours qu'auparavant, c'est-à-dire 3800.

Quelle sera l'intensité du courant inducteur en dériva-

tion? Elle dépendra évidemment de la perte de puissance consentie pour l'échauffement du fil inducteur.

Admettons la même perte que pour le moteur en série, c'est-à-dire 56,8 watts. En désignant par i_d le courant dérivé inducteur, par D la différence de potentiel aux bornes et par p_c la perte de puissance par échauffement de l'inducteur, on a

$$p_c = D i_d.$$

On tire de là, pour $D = 80$ volts,

$$i_d = \frac{56,8}{80} = 0,71 \text{ ampère.}$$

D'autre part, en désignant par r_d la résistance du fil inducteur, on a

$$i_d = \frac{D}{r_d};$$

on en déduit

$$r_d = \frac{80}{0,71} = 112,6 \text{ ohms.}$$

Le nombre des ampèretours à réaliser étant 3800 et l'intensité du courant 0,71 ampère, le nombre n' des spires inductrices doit être

$$n' = \frac{3800}{0,71} = 5352.$$

Employons du fil de 0,7 mm de diamètre, pour lequel une seule couche de coton de 0,1 mm pourra à la rigueur suffire, ce qui donne un diamètre total de 0,9 mm.

Sur la longueur disponible de 120 mm du noyau de l'électro-aimant, on peut placer 133 spires; il faudra donc 40 couches pour obtenir le nombre de spires nécessaire.

L'épaisseur de l'enroulement sera donc $40 \times 0,9$ ou 36 mm; cette épaisseur est plus grande que celle de l'enrou-

lement en série, malgré la réduction de l'isolant, mais n'a rien d'excessif.

La longueur moyenne d'une spire est alors 38 cm et la longueur totale 2034 mètres. Pour une résistance spécifique de 1,85 microhm-centimètre, la résistance de ce fil inducteur sera égale à 97,6 ohms. Pour compléter la résistance nécessaire de 112,6 ohms, on introduira un rhéostat d'excitation qui pourra être utilisé pour le réglage de l'électromoteur.

573. — Voyons maintenant si les conditions de fonctionnement de l'électromoteur ainsi modifié seront les mêmes que celles du moteur primitif excité en série.

On a donné la même valeur à l'excitation des inducteurs, et par conséquent au flux passant dans l'induit; par suite, si l'induit tourne à la même vitesse de 1150 tours que précédemment, la force contre-électromotrice sera la même, ou 66,4 volts. L'intensité du courant dans l'induit i_a sera dès lors, pour la différence de potentiel de 80 volts et une résistance d'induit de 0,832 ohm :

$$i_a = \frac{80 - 66,4}{0,832} = 16,3 \text{ ampères.}$$

L'intensité dans l'induit ayant une valeur sensiblement double de celle admise pour le moteur en série et le flux inducteur étant sensiblement identique (si on ne tient pas compte de l'augmentation de la réaction d'induit), le moment moteur sera approximativement double. Par conséquent, avec le même moment résistant qu'auparavant, 10 kgm, l'équilibre ne pourra plus avoir lieu à 1150 tours; la vitesse augmentera donc jusqu'à ce que, la force contre-électromotrice augmentant elle-même, l'intensité du courant dans l'induit ait diminué et ramené le moment moteur à la valeur qui fait équilibre au moment résistant; l'intensité du courant devra être, au moment de l'équilibre, un peu plus grande que l'intensité

correspondant au moteur en série (8,8 ampères), puisque, la vitesse étant plus grande, le moment résistant parasite a lui-même augmenté et nécessite un moment moteur d'équilibre un peu plus grand.

En admettant que l'intensité du courant dans l'induit soit 9,5 ampères au moment de l'équilibre, la chute de potentiel dans l'induit étant alors $9,5 \times 0,832$, la force contre-électromotrice e du moteur sera

$$e = 80 - 9,5 \times 0,832 = 72,1 \text{ volts.}$$

A une force contre-électromotrice de 66,4 volts correspond une vitesse de 1150 tours; à une force contre-électromotrice de 72,1 volts correspondra une vitesse de 1250 tours environ. La puissance mécanique développée par le treuil deviendra 36,3 kgm/s, au lieu de 33 kgm/s.

Le treuil est donc un peu plus puissant; mais l'énergie électrique qu'il consomme est aussi un peu plus grande, puisque le courant dans l'induit est augmenté et qu'il faut encore y ajouter le courant inducteur. De plus, le poids du cuivre inducteur et son prix, par suite, ont été eux-mêmes majorés.



ERRATA

Page 24, ligne 28, *au lieu de* : inducteur

lire : inducteur

— 44, — 32, *au lieu de* : $I = \frac{D}{r + r}$

lire : $I = \frac{D}{r_a + r_g}$

— 67, — 26, *au lieu de* : $\eta_e = \frac{(D - i_a r_a) i_a}{D i_d + D i_a}$

lire : $\eta_e = \frac{(D - i_a r_a) i_a}{D i_d + D i_a}$

— 178, fig. 35, le calage des balais dessiné en avant du mouvement de l'induit doit être supposé en arrière.

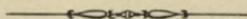


TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER.

GÉNÉRALITÉS SUR LES MOTEURS ÉLECTRIQUES A COURANT CONTINU.

	Pages.
Moteur électrique.	1
Réversibilité des machines électriques à courant continu.	4
Constitution générale d'une machine réceptrice.	5
Fonctionnement d'un moteur électrique.	8

CHAPITRE II.

THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES.

Force contre-électromotrice développée par un moteur électrique.	11
Relation entre la force contre-électromotrice d'un moteur électrique, le flux de force et la vitesse de rotation	14
Modifications apportées dans le champ inducteur par l'action magnétisante du courant passant dans l'induit.	16
Calage des balais dans un électromoteur.	18
Influence du calage des balais sur le flux inducteur et sur la force contre-électromotrice	22
Relation entre le flux inducteur et l'excitation des électro-aimants.	22
Puissance électrique totale dépensée dans un électromoteur.	25
Puissance électrique absorbée par l'échauffement des conducteurs formant le moteur.	26
Puissance électrique absorbée par la rotation d'un moteur	29
Puissance mécanique développée par un électromoteur.	29
Rendement d'un électromoteur	31
Moment de rotation développé par un électromoteur	32
Variation des effets parasites avec la vitesse de rotation.	35
Équilibre d'un électromoteur	36
Condition de stabilité d'équilibre d'un électromoteur	38

CHAPITRE III.

DIVERS MODES D'EXCITATION DES ÉLECTROMOTEURS, PROPRIÉTÉS
QUI EN DÉRIVENT.§ 1. *Électromoteurs excités en série.*

	Pages.
Sens de la rotation des machines excitées en série employées comme réceptrices.	41
Relations entre les divers éléments d'un électromoteur excité en série fonctionnant en équilibre.	41

I. — La différence de potentiel aux bornes du moteur est constante.

Variation de l'intensité du courant et du moment de rotation.	44
Stabilité d'équilibre.	46
Variation des puissances dépensées et développées.	49
Variation du rendement.	51

II. — La différence de potentiel est maintenue constante entre deux points des conducteurs amenant le courant au moteur.

Variation de l'intensité du courant et du moment moteur.	52
Stabilité d'équilibre.	53

III. — L'intensité du courant est constante.

Moment moteur.	54
Variation des puissances dépensées et développées.	55
Variation du rendement.	56

§ 2. *Électromoteurs excités en dérivation.*

Sens de la rotation des machines excitées en dérivation employées comme réceptrices.	56
Relations entre les divers éléments d'un électromoteur excité en dérivation fonctionnant en équilibre.	58

I. — La différence de potentiel aux bornes du moteur est constante.

Variation de l'intensité du courant et du moment de rotation.	59
Stabilité d'équilibre.	62
Variation des puissances absorbées et développées.	65
Variation du rendement.	66

II. — La différence de potentiel est maintenue constante entre deux points conducteurs amenant le courant au moteur.

	Pages.
Variation de l'intensité du courant et du moment de rotation.	70
Stabilité d'équilibre.	74
Modification dans les liaisons de l'inducteur et de l'induit permettant d'améliorer le fonctionnement du moteur.	77

III. — L'intensité totale du courant entrant dans le moteur est maintenue constante.

Variation du moment moteur.	78
-------------------------------------	----

§ 3. *Électromoteurs à excitation compound.*

Dispositions diverses du double enroulement des électro-aimants inducteurs.	80
Sens de la rotation d'une machine à excitation compound employée comme réceptrice.	81
Relations entre les divers éléments d'un électromoteur à excitation compound fonctionnant en équilibre.	81
Variation du moment de rotation, la différence de potentiel aux bornes étant maintenue constante.	82
Exemples d'emploi de la double excitation pour les électromoteurs.	84

CHAPITRE IV.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES MOTEURS ÉLECTRIQUES.

§ 1. *Méthodes de mesure.*

Généralités.	87
Mesure des résistances de l'induit et des inducteurs.	88
Mesure de la vitesse.	90
Mesure du moment résistant utile; dynamomètres.	91
Frein de Prony.	91
Frein à leviers parallèles.	94
Balance dynamométrique de Raffard.	95
Freins pour moteurs de faible puissance.	97
Mesures indirectes de la puissance mécanique développée par un moteur	99
Méthode de M. Swinburne, ou de l'essai à vide.	100
Méthode de l'essai à vide modifiée.	101

	Pages.
Emploi d'une génératrice pour absorber le travail produit par le moteur.	103
Méthode de la génératrice étalonnée.	104
Méthode des deux machines identiques couplées mécaniquement . .	105
Méthode précédente modifiée.	111
Méthode des machines identiques couplées mécaniquement et électriquement.	112
Séparation des pertes par hystérisis, par courants de Foucault et par frottements	117
<i>§ 2. Applications des méthodes de mesure.</i>	
Généralités.	121
Étude d'un moteur excité en série fonctionnant sous différence de potentiel constante, au moyen d'un frein de Prony.	122
Dispositions des essais.	122
Manière d'opérer	123
Calcul des éléments du moteur au moyen des données des observations	126
Résultats des essais.	128
Autre application	129
Étude d'un moteur en série fonctionnant sous différence de potentiel constante, au moyen de la balance dynamométrique Raffard .	131
Dispositions des essais.	131
Résultats des essais.	132
Remarques.	133
Étude d'un moteur excité en série, au moyen de la balance dynamométrique Raffard, l'intensité du courant étant maintenue constante.	134
Disposition des essais.	134
Manière d'opérer	134
Résultats des essais.	137
Étude d'un moteur excité en dérivation par la méthode des machines identiques couplées mécaniquement	137
Disposition des essais.	137
Manière d'opérer.	139
Calcul des éléments des machines au moyen des données des observations	143
Température.	145
Résultats des essais.	146
Remarques.	147
<i>§ 3. Étude graphique des électromoteurs.</i>	
Courbes caractéristiques.	148

	Pages.
I. — Caractéristiques d'un moteur excité en série fonctionnant sous différence de potentiel constante.	
Caractéristiques électriques.	148
Caractéristiques mécaniques	150
Caractéristiques pour diverses valeurs de la différence de potentiel maintenue constante aux bornes.	153
Vitesse en fonction de l'intensité.	153
Moments moteur et résistant en fonction de l'intensité.	155
Moments moteur et résistant en fonction de la vitesse.	156
Stabilité d'équilibre.	156
Caractéristiques pour une différence de potentiel constante en deux points séparés des bornes par une certaine résistance.	157
II. — Caractéristiques d'un moteur en série fonctionnant avec une intensité de courant constante.	
Vitesse en fonction de la différence de potentiel aux bornes.	160
III. — Caractéristiques d'un moteur excité en dérivation, la différence de potentiel étant maintenue constante.	
Caractéristiques électriques.	161
Caractéristiques mécaniques	161
Modifications apportées dans les caractéristiques d'un moteur en dérivation par l'introduction en permanence d'une résistance dans son circuit.	165
1 ^{er} cas. La résistance est intercalée sur le circuit de l'induit seulement.	166
2 ^e cas. La résistance est intercalée avant la dérivation des inducteurs.	167

CHAPITRE V.

MOYENS DE GOUVERNER LES ÉLECTROMOTEURS.

Généralités.	174
Moteurs en série, fonctionnant sous différence de potentiel constante.	
Maintien d'une vitesse constante, malgré les variations des efforts résistants	175
Démarrage.	177

	Pages.
Inversion du sens de la rotation.	177
Changement de marche avec manœuvre des balais.	178
Changement de marche sans toucher aux balais.	179
Moteurs excités en dérivation ; fonctionnement sous différence de potentiel constante.	
Maintien d'une vitesse constante, malgré les variations de l'effort résistant.	181
Modification du régime de la vitesse.	188
Démarrage.	190
Changements de marche.	191
Arrêt du moteur.	191
Moteurs fonctionnant à intensité constante.	
Impossibilité du réglage des moteurs excités en série.	193
Moteurs excités en dérivation.	194

CHAPITRE VI.

TRANSMISSION ET DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE.

§ 1. *Transmission de l'énergie mécanique.*

Généralités.	195
Rendement d'une transmission d'énergie mécanique au moyen d'une dynamo-génératrice et d'une dynamo-réceptrice.	198
Transmission à l'aide de deux machines magnéto-électriques ou de deux dynamos à excitation séparée.	
Équilibre du moteur ; stabilité.	199
Rendement.	201
Mise en marche.	204
Transmission au moyen de deux dynamos excitées en série.	
Équilibre du moteur ; stabilité.	205
Autorégulation	207
Rendement.	211
Exemple de transmission avec deux machines excitées en série.	215
Résultats de la transmission	216
Remarques.	217

Emploi pour les transmissions de machines excitées en dérivation et à enroulement compound,

	Pages.
Transmission avec deux machines excitées en dérivation.	220
Transmission avec une génératrice excitée en série et une réceptrice excitée en dérivation.	221
Emploi des machines à enroulement compound.	223

Établissement d'un projet de transmission électrique.

Transmission en supposant nulle la résistance des conducteurs qui relie les deux machines.	226
Influence de la résistance des conducteurs qui relie les deux machines.	228
Prix des conducteurs	230
Variation du prix avec la distance et le rendement.	232

Transmissions électriques expérimentées ou en exploitation.

Expériences de M. Marcel Deprez	232
Expérience de Munich; 1882.	233
Expérience de la gare du Nord; 1883.	233
Expériences de Greil; 1885.	234
Expériences de M. Hippolyte Fontaine.	234
Transmission de Domène.	235
Usine centrale de Pontrésina.	236

§ 2. *Distribution de l'énergie mécanique.*

Principaux modes de distribution.

Généralités.	240
Distribution en tension, ou à intensité constante.	240
Distribution en dérivation, ou sous différence de potentiel constante.	242
Distribution mixte.	244

Distribution à bord des navires.

Mode de distribution adopté.	248
Installation des circuits	249
Mode d'excitation des moteurs.	251
Excitation et réglage des génératrices	252
Emploi de plusieurs génératrices	254
Couplage des génératrices	255

CHAPITRE VII.

APPLICATIONS DES ÉLECTROMOTEURS A BORD DES NAVIRES.

§ 1. *Divers modes de distribution de l'énergie mécanique à bord des navires; avantages et inconvénients de la distribution électrique.*

	Pages.
Emmagasinement de l'énergie mécanique à bord des navires.	260
Importance de la distribution de l'énergie mécanique à bord des navires	263
Tableau des machines auxiliaires d'un cuirassé français.	265
Tableau des machines auxiliaires du cuirassé italien <i>Re Umberto</i>	266
Modes divers de distribution de l'énergie mécanique à bord des navires	266
Distribution de l'énergie mécanique par engrenages, câbles, arbres, poulies	268
Distribution par la vapeur	269
Distribution par l'eau comprimée	270
Distribution par l'air comprimé.	271
Distribution par le courant électrique	271
Appareils pour lesquels la distribution électrique est toujours recommandable.	274
Appareils pour lesquels la distribution électrique peut entrer en concurrence avec les autres systèmes de distribution.	275
Appareils pour lesquels la distribution électrique ne peut logiquement être employée.	276
Résumé	276

§ 2. *Ventilateurs.*

Grands ventilateurs de refoulement, type de la <i>Société l'Éclairage électrique</i>	277
Grands ventilateurs de refoulement, type de la <i>Compagnie continentale Edison</i>	283
Ventilateurs électriques de refoulement modèle de la <i>Société Gramme</i>	284
Ventilateurs de refoulement C. et C.	284
Petits ventilateurs aspirateurs.	286
Petits ventilateurs à suspension.	290

§ 3. *Pompes électriques.*

	Pages.
Généralités.	292
Pompes rotatives	293
Pompes à piston	295

§ 4. *Monte-charges, treuils et norias électriques.*

Généralités.	296
Treuil-escarilleur de la <i>Société l'Éclairage électrique.</i>	300
Treuil pour cuirassé de la <i>Compagnie Edison.</i>	303
Treuil pour ascenseur.	312
Treuil pour mines.	314
Grue électrique.	315

Monte-charges électriques pour le service de l'artillerie à bord des navires.

Diverses espèces de monte-charges électriques	315
Monte-charges alternatifs.	317
Dispositions de la benne et des cartouches	317
Dispositions du treuil électrique.	318
Frein automatique système Mègy	322
Appareils de manœuvre des treuils alternatifs.	324
Système du blocage	324
Système du déclenchement.	331
Système des relais	343
Modifications apportées au système des relais.	352
Données numériques relatives aux monte-charges alternatifs . . .	357
Monte-charges continus ou norias électriques	359

§ 5. *Manœuvre électrique des canons.*

Généralités.	364
Pointage électrique, système <i>Canel.</i>	365
Pointage électrique, système <i>Fiske</i>	366
Divers systèmes employés pour la manœuvre des canons, à bord des navires	368
Système de la cartouche électrique	369

Manœuvre électrique des canons sur le croiseur chilien *Capitan Prat.*

Dispositions générales.	379
Pointage des tourelles de 24 cm.	380

	Pages.
Commande des électromoteurs actionnant le pointage des tourelles de 24 cm.	384
Monte-charge des canons de 24 cm.	391
Commande du monte-charge	392
Résultats du fonctionnement du pointage latéral et du monte-charge des tourelles de 24 cm.	396
Génératrices	398

§ 6. *Commande électrique des projecteurs à distance.*

Utilité de la commande à distance.	402
Conditions à réaliser.	403
Projecteur commandé à distance de MM. Sautter et Harlé	403
Projecteur commandé à distance, de la maison Bréguet.	410

§ 7. *Commande électrique du gouvernail.*

Conditions générales que doit remplir un appareil à gouverner.	421
Commande électrique de la barre, système Marit	425
Commande électrique de la barre, système des relais.	437

CHAPITRE VIII.

NAVIGATION ÉLECTRIQUE.

Conditions générales de la navigation électrique.	444
---	-----

Canotage électrique.

Canots de plaisance.	448
Embarcations des ports	450
Canots des navires.	454
Formules utiles pour l'établissement d'un projet de canot électrique.	456
Application au calcul de la batterie d'accumulateurs et de la machinerie électrique.	461
Puissance nécessaire.	461
Batterie d'accumulateurs.	463
Électromoteur.	467
Manœuvre des embarcations électriques	468
Premiers essais de canotage électrique.	471

Bateaux de grandes et moyennes dimensions.

	Pages.
Le <i>Volta</i>	472
Canot électrique de la <i>Marine Française</i>	473
Bateaux électriques de la <i>Tamise</i>	473
Chaloupes électriques du <i>Canal de l'Union</i>	474
<i>L'Éclair</i>	476
Le <i>P'tit Bob</i>	476
Considérations générales.	477
Navires de commerce	480
Navires de guerre.	482
Bateaux de plaisance.	486
Le <i>Zurich</i>	487

Navigation électrique sous-marine.

Généralités.	488
Éléments électriques de quelques bateaux sous-marins	491

CHAPITRE IX.

DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE DANS LES ATELIERS.

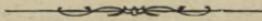
Généralités.	494
Tours, machines à percer, étau-limeur, coupe-tubes	498
Perceuses amovibles.	502
Perceuse <i>Jenkin</i>	502
Perceuse <i>Weyburn</i>	503
Perceuses de la Société <i>l'Éclairage électrique</i>	504
Perceuses <i>Sautter et Harté</i>	509
Perceuse <i>Rowan</i>	512
Ateliers électriques du chemin de fer du Nord.	513
Transmission et distribution de l'énergie dans les ateliers des <i>Forges et Chantiers de la Méditerranée</i> , à la Seyne.	516

CHAPITRE X.

ÉTABLISSEMENT D'UN PROJET DE MOTEUR ÉLECTRIQUE.

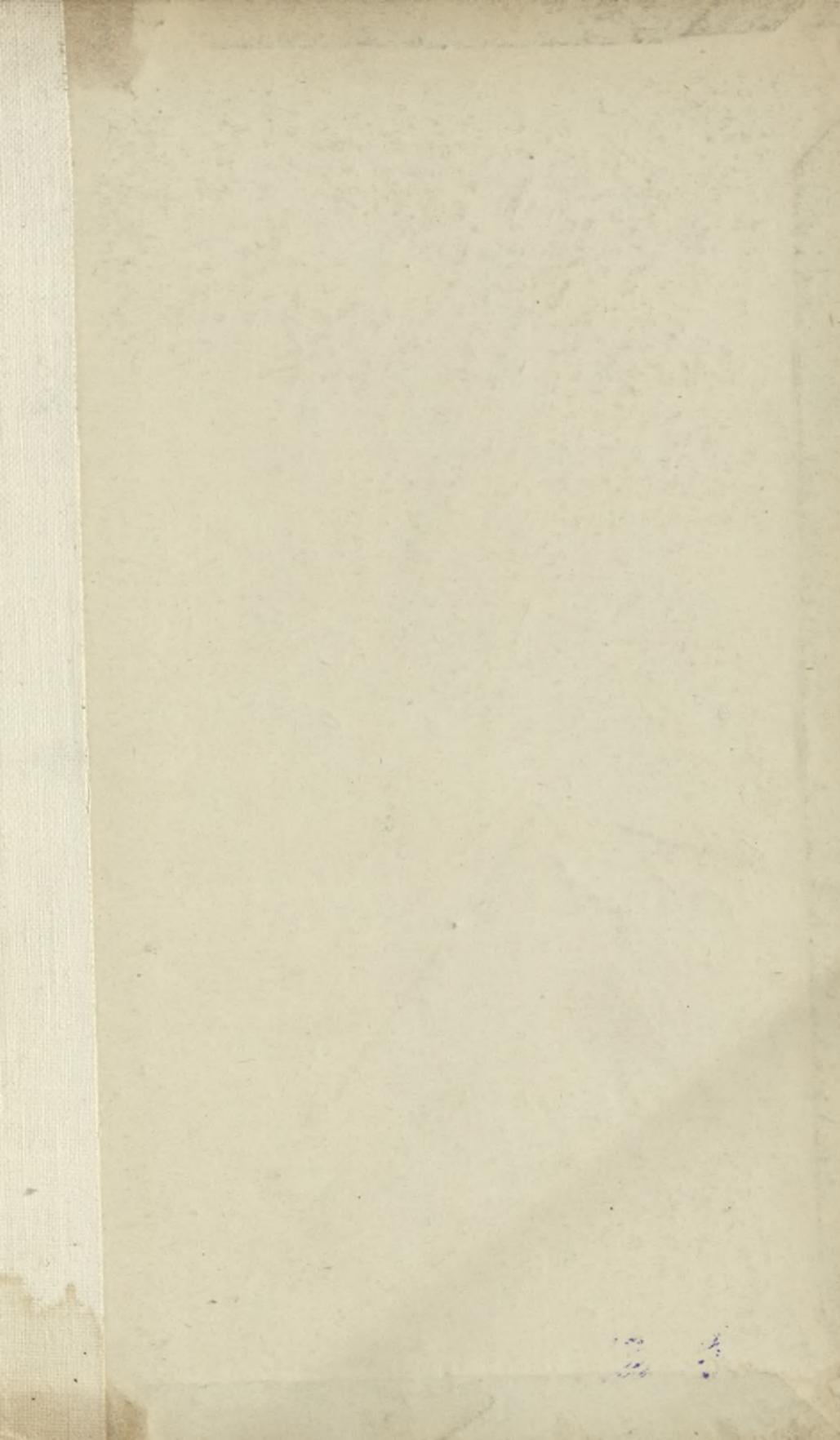
Généralités.	526
----------------------	-----

	Pages.
Projet de moteur électrique pour treuil.	
Données du problème mécanique à résoudre	531
Vitesse adoptée pour l'électromoteur.	532
Puissance mécanique utile du moteur ; moment utile.	533
Puissance électrique absorbée par le moteur.	534
Différence de potentiel aux bornes et intensité du courant	534
Force contre-électromotrice.	535
Forme et dimensions de l'induit.	535
Nombre des spires enroulées sur l'induit.	536
Flux de force utile dans les spires de l'induit.	537
Induction spécifique dans le fer de l'induit.	537
Résistance de l'induit	537
Flux inducteur	538
Induction spécifique dans le noyau de l'électro-aimant inducteur.	538
Entrefer ; induction spécifique dans l'entrefer	539
Calcul des forces magnétomotrices.	540
Table des forces magnétisantes en fonction de l'induction.	542
Joints.	542
Application au moteur étudié.	543
Réaction d'induit	544
Nombre des spires et résistance de l'électro-aimant.	544
Poids approximatifs	545
Vérifications	545
Remarques.	549
Variations du moment résistant.	552
Modifications apportées par l'excitation en dérivation.	553
 ERRATA	 557



S - 98

S. 61



WYDZIAŁY POLITECHNICZNE

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-5381

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299053