http://cnum.cnam.fr
Conservatoire numérique des Arts & Métiers

Auteur ou collectivité : Piérard, Émile
Auteur : Piérard, Émile
Titre : Cours d'électricité et de magnétisme. Tome II, Production, utilisation, transformation, transport et distribution de l'énergie électrique, avec application à l'éclairage, aux tramways, à la télégraphie et à la téléphonie

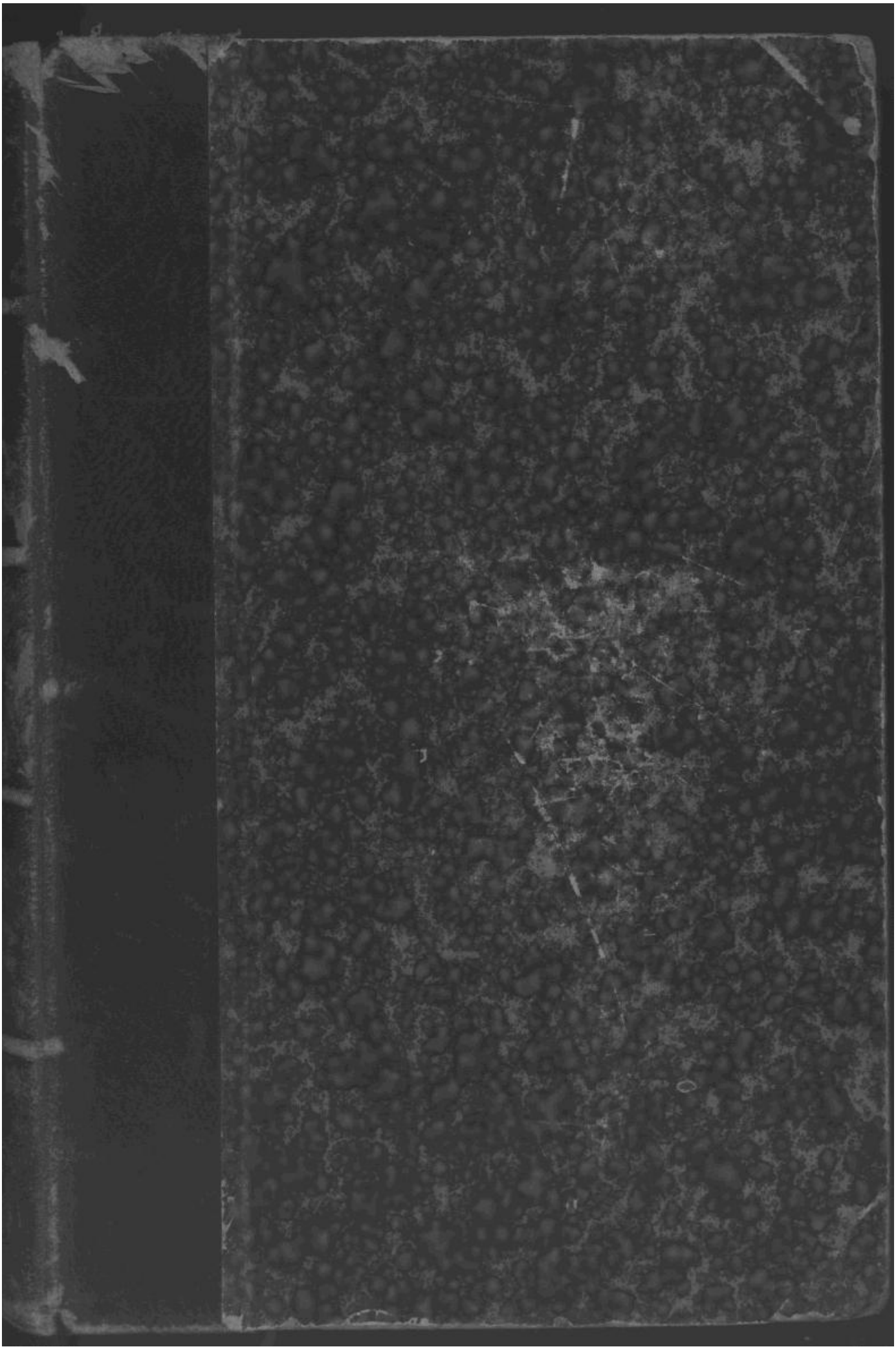
Adresse : Bruxelles : Ramlot ; Paris : Dunod et Pinat, 1910
Collation : 1 vol. (VI-596-[1] p.) : ill. ; 25 cm
Cote : CNAM-BIB 8 Ca 398 bis (1)
Sujet(s) : Électricité ; Magnétisme ; Électricité -- Applications industrielles
Langue : Français

Date de mise en ligne : 18/07/2018
Date de génération du document : 18/7/2018

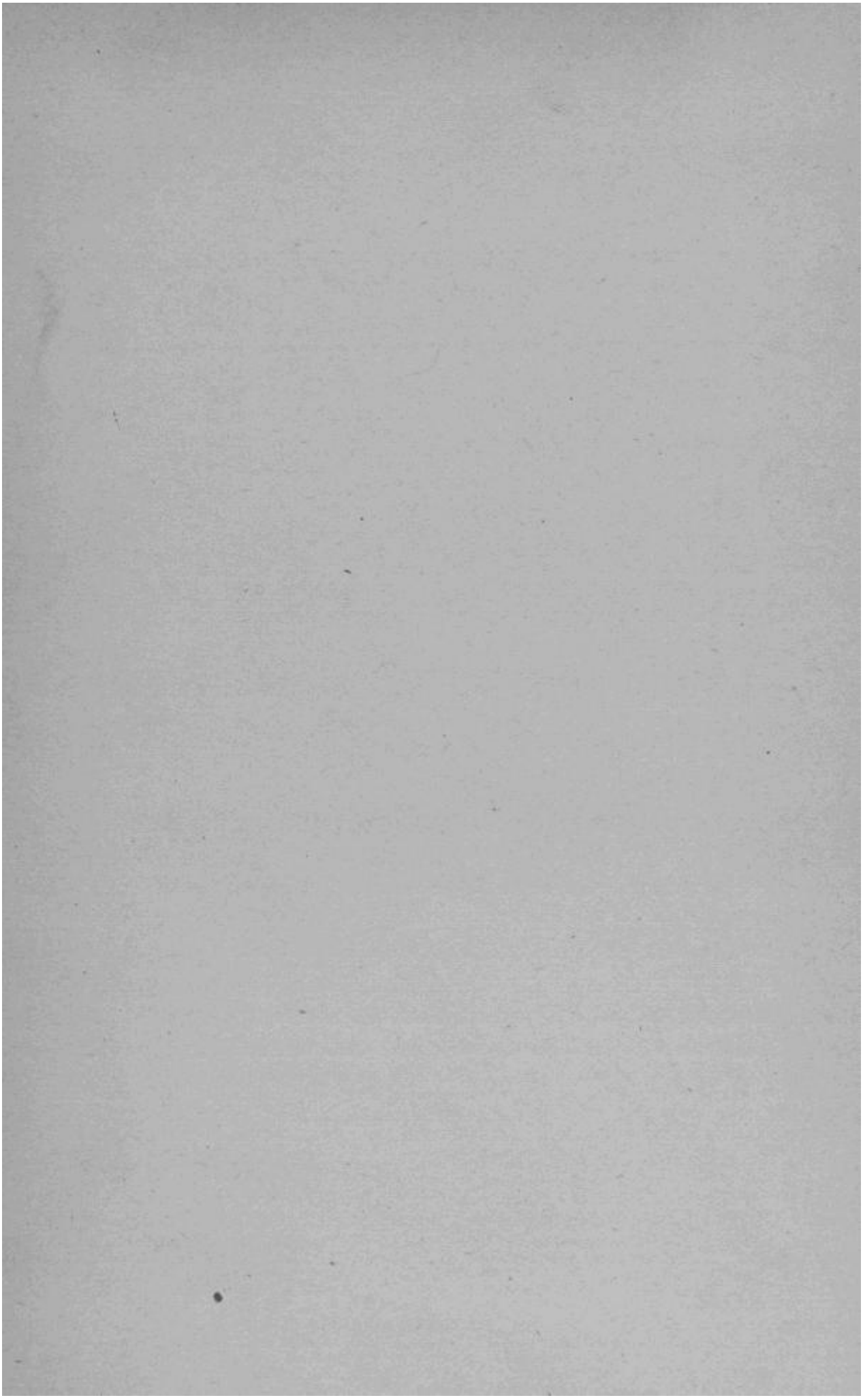
Permalien : http://cnum.cnam.fr/redir?8CA398_TOME2

La reproduction de tout ou partie des documents pour un usage personnel ou d'enseignement est autorisée, à condition que la mention complète de la source (*Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*) soit indiquée clairement. Toutes les utilisations à d'autres fins, notamment commerciales, sont soumises à autorisation, et/ou au règlement d'un droit de reproduction.

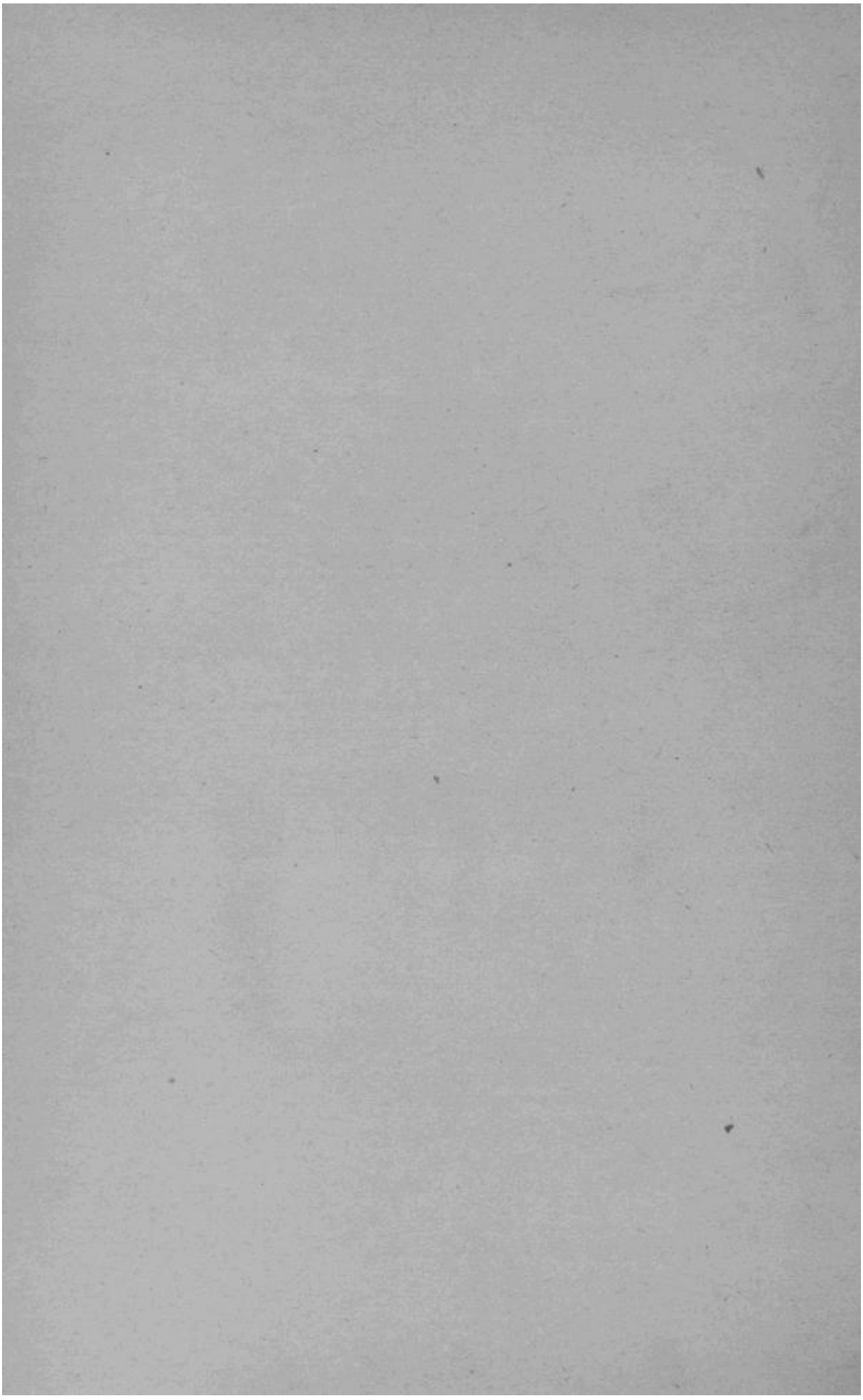
You may make digital or hard copies of this document for personal or classroom use, as long as the copies indicate *Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*. You may assemble and distribute links that point to other *CNUM* documents. Please do not republish these PDFs, or post them on other servers, or redistribute them to lists, without first getting explicit permission from *CNUM*.



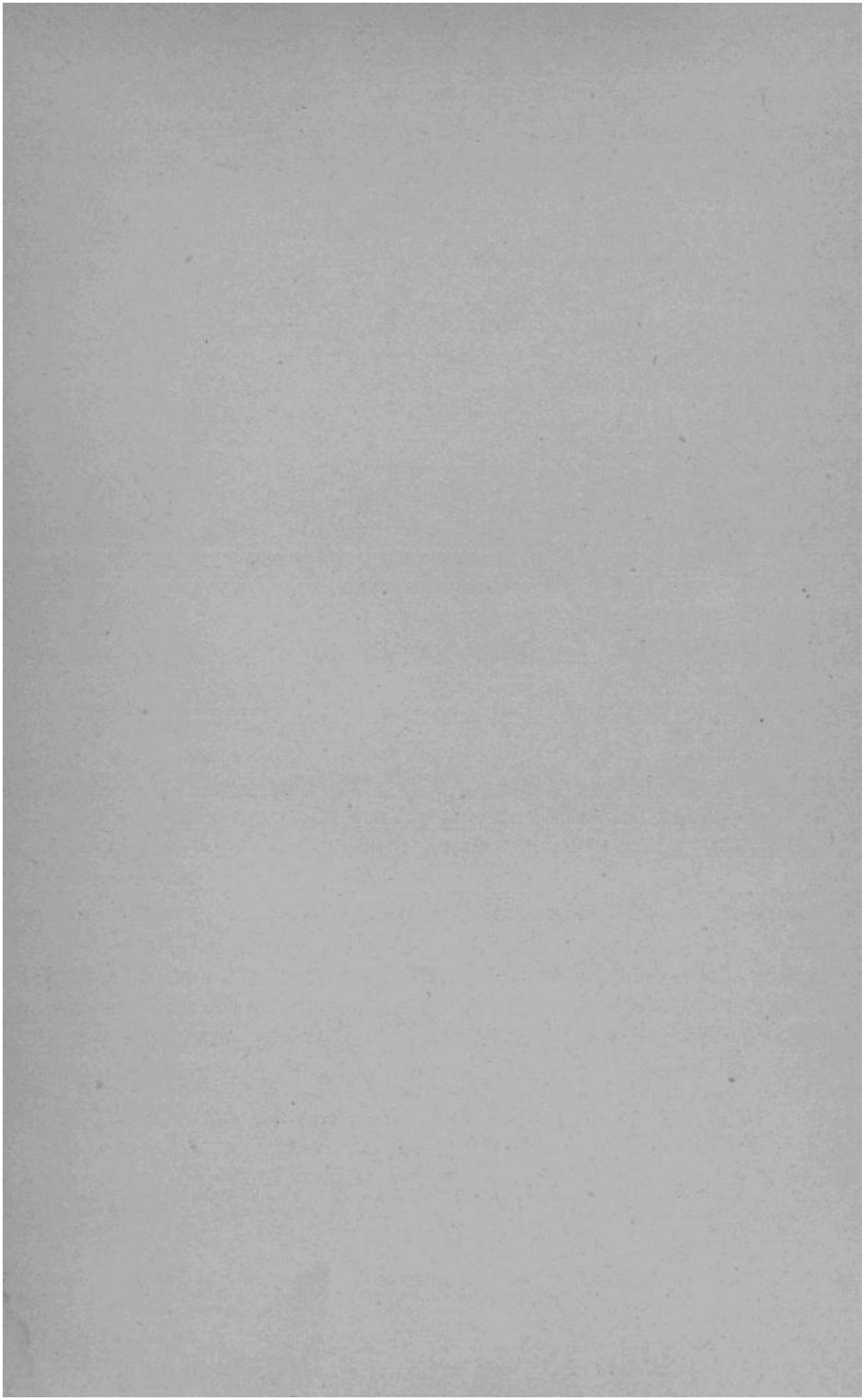
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



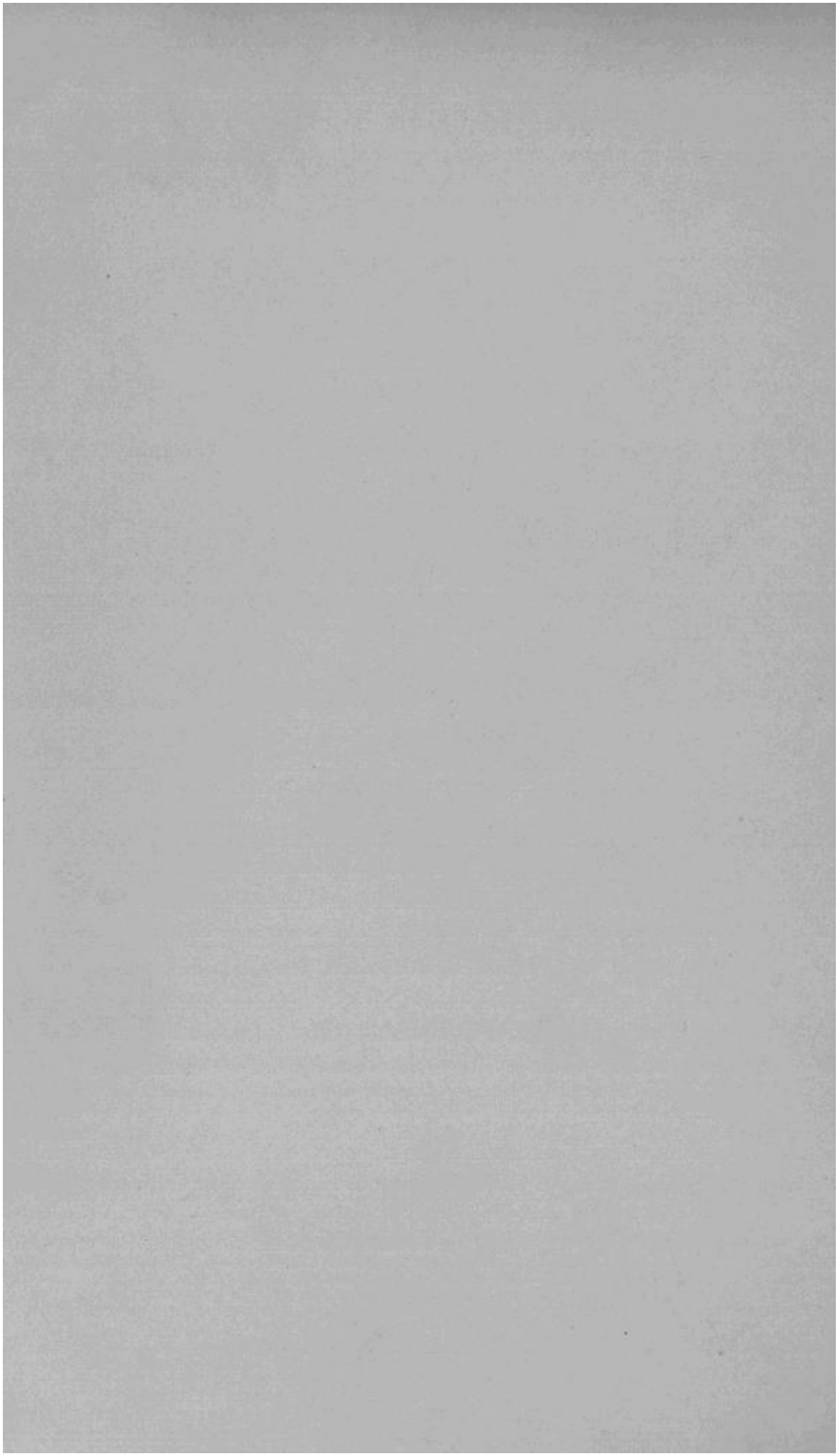
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

COURS

d'Electricité et de Magnétisme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

8° Ca 398

COURS

d'Électricité et de Magnétisme

PAR

EMILE PIERARD,

INGÉNIEUR HONORAIRE DES MINES,
INGÉNIEUR-ÉLECTRICIEN SORTI DE L'INSTITUT MONTEFIORE,
INGÉNIEUR EN CHEF, DIRECTEUR DE SERVICE TECHNIQUE A L'ADMINISTRATION DES TÉLÉGRAPHES BELGES,
PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

BIBLIOTHÈQUE
DU CONSERVATOIRE NATIONAL
DES ARTS ET MÉTIERS
8°Ca 398.
Entrée, le 24 Mars 1910.

T. II

2e édition

Production, utilisation, transformation, transport et distribution de l'énergie électrique, avec application à l'éclairage, aux tramways, à la télégraphie et à la téléphonie.

PRIX : 11 FRANCS

CONSERVATOIRE Nal DES ARTS ET MÉTIERS
Bibliothèque

RAMLOT, frères et sœurs
25, rue Grétry, 25,
BRUXELLES

DUNOD & PINAT
49, quai des Grands Augustins, 49
PARIS

1910

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

DU MÊME AUTEUR :

La Télégraphie sans fil à travers les âges (Conférence). Brochure raisin de 31 pages avec 24 figures dans le texte. Prix . fr. **1,50**

La Destruction du bureau central des téléphones d'Anvers et le rétablissement provisoire des installations. Brochure raisin de 32 pages, avec 24 figures dans le texte. Prix. . . fr. **1,00**

Cours d'Electricité et de Magnétisme, T. I. THÉORIES GÉNÉRALES : ELECTROSTATIQUE, MAGNÉTISME, ELECTROMAGNÉTISME, UNITÉS ET MESURES. In-8°, 358 pages, 238 fig. dans le texte. Prix fr. **10,00**

La Téléphonie, T. I. LES LIGNES TÉLÉPHONIQUES. 3e édition. In-8°, 254 pages avec 174 figures dans le texte. Prix . . . fr. **7,50**

EN VENTE CHEZ

RAMLOT, frères et sœurs
25, rue Grétry, 25
BRUXELLES

DUNOD & PINAT
49, quai des Grands Augustins, 49
PARIS

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PRÉFACE

Nous devons d'abord expliquer pourquoi ce volume est indiqué comme seconde édition, bien qu'il paraisse pour la première fois sous le présent titre.

La chose est simple : il continue nos *Principes d'Électrotechnie* complètement épuisés, mis à jour et adaptés à leur nouveau cadre.

Nous en avons élagué les premiers chapitres, rappel de généralités faisant double emploi avec le tome I actuel, et conservé à peu près intacte, l'ordonnance du reste.

De même que dans les *Principes d'Électrotechnie*, nous avons systématiquement laissé de côté tout ce qui concerne la construction proprement dite et le calcul des appareils. Ces applications ne sont pratiquées que par une infime minorité ; elles constituent des spécialités auxquelles on se fait vite, dès que l'on connaît bien les notions qui sont à la base de la science électrique et le sens physique des formules fondamentales.

L'utilisation rationnelle du temps limité dont nous disposons, nous a fait éliminer les longs calculs, lorsque ceux-ci n'apportaient pas plus de lumière que l'application directe de raisonnements simples.

Par contre, nous avons développé autant que possible, l'étude des courants alternatifs, les essais des divers appareils et enfin le calcul des canalisations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces matières appartiennent, en effet, au domaine immédiat d'application de l'ingénieur, même non spécialisé.

Enfin, bien que le volume ait pris une certaine ampleur (presque 600 pages au lieu de 440), nous n'avons pas cru pouvoir élaguer les chapitres sur l'éclairage, les tramways, la télégraphie et la téléphonie. Il nous a paru inadmissible qu'un ingénieur, même tout court, ne connaisse pas d'une manière déjà complète, le fonctionnement des tramways qu'il prend, des lampes qui l'éclairent et du téléphone dont il se sert.

Pour éviter toute équivoque, nous faisons expressément remarquer que ce cours s'adresse aux ingénieurs proprement dits et non aux spécialistes qui voudraient approfondir leurs études en électricité : à ces derniers, les bons traités ne manqueront pas.

*
* *

Nous remercions très cordialement M. l'ingénieur A. Bocquet, d'avoir bien voulu se charger de l'aride tâche, de la révision des épreuves.

E. P.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE I

Piles thermo-électriques.

§ I. — Généralités.

Effet Volta.— Nous avons vu (T. I p. 83) qu'entre deux métaux différents mis en contact, existe une différence de potentiel appelée *force électromotrice de contact*, fonction de la nature des métaux juxtaposés et de la température des points de contact. Cette fonction peut être représentée par

$$A/B = a + b\,t + c\,t^2 \qquad (1)$$

a, b, c, étant des constantes dépendant des métaux en présence et t la température.

Si le circuit est fermé et les deux jonctions à la même température, les forces électromotrices de contact, égales et opposées, s'équilibrent et aucun courant ne se développe. On a donc

$$A/B + B/A = 0 \text{ ou } A/B = -B/A.$$

Effet Seebeck. — L'annulation des forces électromotrices de contact n'existe plus, si l'équilibre des températures est rompu. Lorsque deux métaux différents forment un circuit et que l'on chauffe ou refroidit une des jonctions, on constate la production d'un courant indiquant qu'une force électromotrice s'est développée.

Ainsi, en prenant une lame de fer et une de cuivre et les soudant, après avoir intercalé un galvanomètre dans l'une d'elles, dès que l'on chauffe une des soudures (fig. 1), le galva-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nomètre dévie par le passage d'un courant allant du cuivre vers le fer dans la soudure chaude.

La force électromotrice varie non seulement avec la nature des métaux en présence, mais encore avec la différence de température des deux jonctions.

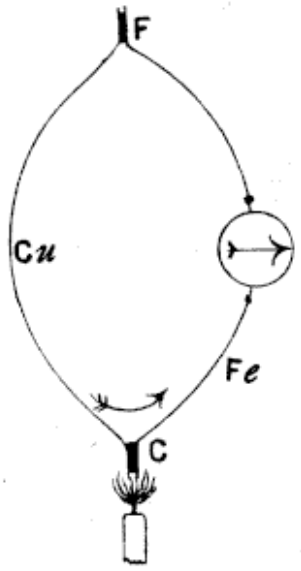


FIG. 1.

La formule (1) permet d'établir aisément la valeur de la force électromotrice développée dans le circuit.

A la température t_1 on a

$$(A/B)_1 = a + b\,t_1 + c\,t_1^2.$$

A la température t_2

$$(A/B)_2 = a + b\,t_2 + c\,t_2^2.$$

D'où, pour la force électromotrice développée par la différence de température $t_2 - t_1$

$$E = b\,(t_2 - t_1) + c\,(t_2^2 - t_1^2) = (t_2 - t_1)\{b + c\,(t_2 + t_1)\}$$

Posons $b = -2\,c\,t_0$, remplaçons et mettons $2\,c$ en évidence

$$E = 2\,c\,(t_2 - t_1)\left(\frac{t_2 + t_1}{2} - t_0\right) \qquad (2)$$

Cette formule montre que la force électromotrice est nulle si les soudures sont à la même température, ou si les températures t_2 et t_1 sont également éloignées de la température intermédiaire $t_0 = -\frac{b}{2\,c}$, appelée *température neutre.*

Loi des températures successives. — Dans un circuit hétérogène dont les soudures sont aux températures t_1 et t_2, le courant électrique est la différence des courants que l'on observe si, l'une des soudures étant maintenue à 0°, l'autre est portée successivement aux températures t_1 et t_2.

Couple thermo-électrique. — On appelle ainsi l'ensemble de deux soudures portées à des températures différentes et produisant,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par la force électromotrice qui se développe, un courant dans le circuit où elles sont intercalées.

Un métal est dit positif par rapport à un autre, lorsque la force électromotrice de contact est dirigée du premier vers le second à travers la soudure chaude.

Inversion. — En chauffant graduellement une des jonctions du couple cuivre-fer (fig. 1), on constate que la déviation du galvanomètre va en augmentant jusque vers 260°, pour diminuer ensuite et changer de sens *à une température double.* Ce phénomène d'inversion se présente pour un très grand nombre de couples ; toutefois, certains d'entre eux, dits à *marche uniforme*, semblent soustraits à cette loi, du moins dans les limites de température qui nous sont abordables ; leur force thermo-électromotrice est simplement proportionnelle à la différence de température des deux soudures.

Courbes de Gaugain. — En portant en abscisses la différence de température des deux soudures, dont une était maintenue à 20° C, et en ordonnées des valeurs proportionnelles aux forces électromotrices relevées, Gaugain a dressé des courbes analogues à celles de la figure 2. Ce sont des paraboles à axe vertical, montrant nettement que la température d'inversion est double de celle procurant le maximum.

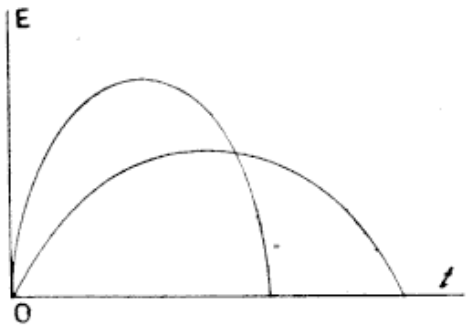


FIG 2.

Pouvoir thermo-électrique. — Les deux soudures d'un couple étant à une température t, si l'on donne à l'une d'elles un accroissement dt de température, il se développe une force électromotrice $d\,\mathrm{E}$ proportionnelle à un facteur p, fonction de t. On a

$$d\,\mathrm{E} = f(t)\,dt = p\,dt, \quad \text{d'où } p = \frac{d\,\mathrm{E}}{dt}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

p est le *pouvoir thermo-électrique* des deux corps à la température t.

Cette valeur peut être tirée des courbes de Gaugain, car elle représente précisément le coefficient angulaire de la tangente au point considéré de la courbe.

Voici, en microvolts par degré centigrade, les pouvoirs thermo-électriques de divers métaux par rapport au plomb et à la température de + 20° C. (1) :

Antimoine	— 17
Bismuth	89
Cuivre commercial	— 0,1
Fer	— 16,2
Maillechort	12,95
Nickel	22,8
Palladium	6,9
Platine malléable	8,82
Zinc	— 2,79

Il est utile de tracer la courbe des pouvoirs thermo-électriques de divers couples en fonction de la température. On réduira le nombre des essais, en remarquant que *le pouvoir thermo-électrique de deux métaux* A *et* B, *à une température* t, *est égal à la différence des pouvoirs thermo-électriques de chacun de ces métaux, par rapport à un troisième* C *quelconque, à la même température.*

En effet, considérons les trois métaux A, B, C, formant une chaîne fermée à la même température.

On a

$$A/B + B/C + C/A = 0 \text{ ou } A/B = -C/A - B/C.$$

Remplaçant — C/A par la quantité équivalente A/C il vient

$$A/B = A/C - B/C.$$

L'égalité a lieu pour toutes les températures, ce qui justifie la proposition ci-dessus.

---

(1) HOSPITALIER, *Formulaire de l'électricien*, 1901, p. 206.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Piles thermo-électriques. — Un couple thermo-électrique ne développant, comme nous venons de le voir, qu'une force électromotrice extrêmement faible et sa résistance intérieure étant également fort peu élevée, il convient, pour obtenir des résultats appréciables, d'en grouper un certain nombre en tension. Comment effectuer le montage? Considérons deux couples formés de métaux A et B (fig. 3) ouverts à leur partie supérieure. En chauffant les deux soudures 1 et 3, nous développerons deux forces électromotrices orientées dans le même sens. Nous obtenons, en somme, deux générateurs d'électricité, ayant leur pôle positif en A, par exemple, leur pôle négatif en B. Pour les monter en tension, il suffira de raccorder le pôle négatif de l'un au pôle positif de l'autre, en soudant en 2 les lames B et A intermédiaires et ainsi de suite.

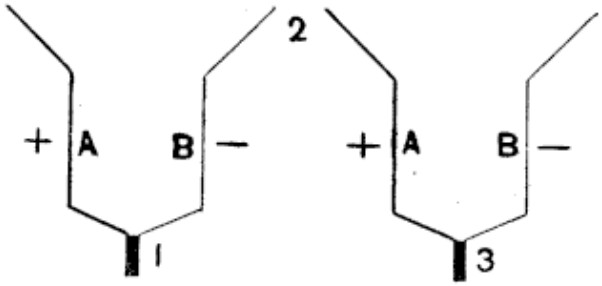


FIG. 3.

On voit que l'on est amené à former une chaîne dont les soudures de même rang, toutes les soudures impaires ou toutes les soudures paires, sont chauffées, les autres restant le plus froides possible. On obtient ainsi une pile thermo-électrique.

Pour faciliter le chauffage, d'une part, et le refroidissement, d'autre part, on replie la chaîne en zigzag, de manière à amener toutes les soudures de même rang soit dans un plan, soit suivant un cylindre. En outre, on munit d'expansions métalliques noircies les soudures opposées à la source de chaleur, pour aider au refroidissement.

On évitera éventuellement les coups de feu brusques donnant lieu à des dilatations nuisibles, en protégeant les soudures chaudes par une garniture réfractaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 2. — Description et usage de quelques piles thermo-électriques.

Pile de Nobili et Melloni. — Le thermo-multiplicateur de Nobili comporte des séries de barres de bismuth et d'antimoine coudées à angle droit (fig. 4), soudées alternativement l'une à l'autre, isolées au papier verni et affectant, dans leur ensemble, la forme d'un parallélipipède rectangle. Toutes les soudures paires se trouvent sur une des faces, toutes les soudures impaires sur la face opposée.

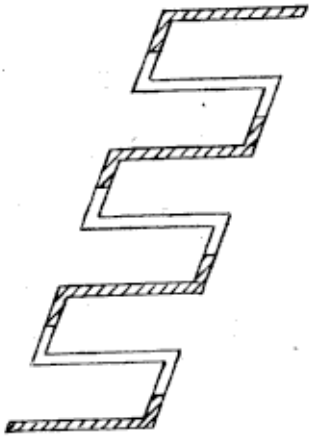


FIG. 4.

D'après le tableau donné plus haut, le pouvoir thermo-électrique du couple bismuth-antimoine, égal à la différence des pouvoirs thermo-électriques de ces métaux par rapport au plomb, vaut $+ 89 - (- 17) = 106$ microvolts environ à 20° C.

En faisant communiquer une telle pile avec un galvanomètre sensible et de résistance se rapprochant de celle de la pile, il est possible de déceler les plus petites différences de température se produisant entre ses deux faces.

Pile de Noé et Rebicek. — Couple maillechort et alliage zinc-antimoine. Les soudures chaudes sont protégées par un cône en cuivre ; les froides, pourvues d'une expansion en cuivre noirci. Les éléments se disposent radialement, de manière à permettre un chauffage central général.

Force électromotrice d'un élément en marche normale 0,06 V ; résistance 0,025 O.

Pyromètre Le Chatelier. — Couple de platine et alliage de platine à 0,1 de rhodium protégé par un revêtement réfractaire. Les fils, d'environ un mètre de longueur, sont torsadés et soudés à la flamme du chalumeau oxhydrique. Le soudage est certain quand on aperçoit des traces de fusion dans les parties en contact ; il est obligatoire pour éviter une résistance variable à

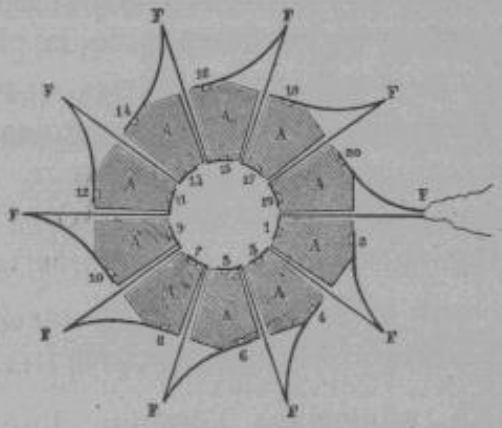
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ce contact. La torsade peut supporter 1600° en toute sécurité et cette température, une des plus élevées auxquelles on ait affaire industriellement, est à peu près la limite que l'on puisse atteindre et mesurer sans danger pour le couple, dont le point de fusion est de 1750°. L'isolement des deux conducteurs se fait par un mince cordon d'amiante replié en forme de 8.

La force électromotrice obtenue à 1600° n'est que de 0,03 V. Néanmoins avec un bon galvanomètre, on obtient sans difficulté une sensibilité de 0,1 de degré au voisinage de 1000°.

Les fils devant avoir un diamètre de quelques dixièmes de millimètre, un couple revient assez cher. On peut substituer au rhodium de l'iridium, ce qui donne un appareil moins coûteux, un peu plus sensible et non moins exact (1)

Lorsque les températures à mesurer ne dépassent pas 1000°, on peut faire usage d'un couple formé de fer et de constantan (parties égales de cuivre et nickel) qui revient beaucoup meilleur marché.



Pile Clamond et Carpentier. — Couple fer ou nickel et alliage zinc-antimoine par parties égales. Les soudures chaudes sont logées dans une couronne réfractaire.

On empile l'une au-dessus de l'autre, en les séparant par de l'amiante, des couronnes constituées par dix couples montés en tension (fig. 5). L'ensemble des cou-

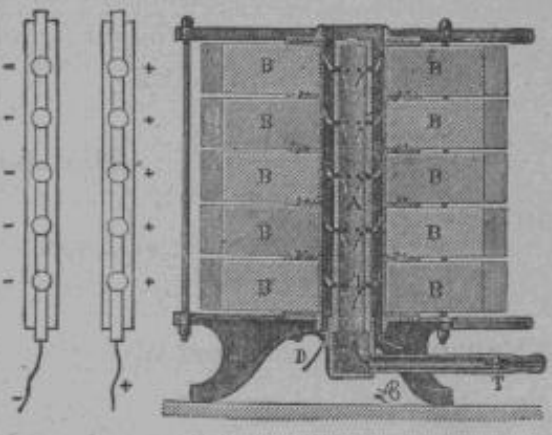


Fig. 5, 6 et 7.

(1) D. Berthelot. Académie des Sciences, 28/4/1902.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ronnes ainsi disposées est serré par des boulons entre deux cadres en fonte (fig. 6). Des bornes permettent de les connecter soit en tension, soit en dérivation (fig. 7).

On chauffe la pile au gaz, en amenant celui-ci dans un tube en terre réfractaire percé de trous (fig. 6), disposé dans l'évidement cylindrique central de la pile. Un régulateur à valve mobile assure la constance du débit de gaz, malgré les variations de pression.

Le modèle de douze couronnes de dix couples consomme 180 litres de gaz à l'heure. Tout étant monté en tension, on obtient une force électromotrice de 8 volts avec une résistance intérieure de 3,2 ohms.

Rendement. — Les chiffres ci-dessus vont nous permettre d'évaluer le rendement de la pile Clamond et Carpentier, qui est une des mieux comprise au point de vue industriel.

Le modèle de douze couronnes développera sa puissance utile maximum, quand la résistance extérieure sera égale à la résistance intérieure, soit 3,2 O. D'après ce que nous avons vu antérieurement (T I p 108), cette puissance

$$p_M = \frac{E^2}{4r} = \frac{64}{12,8} = 5 \text{ watts.}$$

En admettant l'emploi d'un gaz donnant 5 200 calories (kg-degrés) par mètre cube ou 5,2 calories par litre, les 180 litres à l'heure correspondront à

$$\frac{180}{3\,600}\,5,2 = 0,26 \text{ calorie par seconde,}$$

soit

$$\frac{0,26 \cdot 425 \cdot 736}{75} = 1\,085 \text{ watts.}$$

Le rendement ressort à

$$\frac{5}{1\,085} = \frac{1}{217} \text{ environ.}$$

Usages. — La pile thermo-électrique est donc un appareil de mauvais rendement, qu'on ne peut songer à appliquer indus-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

triellement aux tranformations de l'énergie. Mais elle rend de grands services dans certaines applications spéciales.

Melloni, notamment, s'en est servi avantageusement dans ses recherches sur la chaleur rayonnante.

Ainsi que l'a fait remarquer Becquerel, on peut l'utiliser comme thermomètre différentiel pour mesurer la température d'endroits inaccessibles, tels que le fond de trous de forage. En intercalant un galvanomètre sensible dans le circuit d'un couple, puis, modifiant graduellement la différence de température des soudures, on peut dresser un diagramme donnant les déviations du galvanomètre en fonction des différences de température, ce qui permettra inversement d'évaluer ces dernières pour des déviations données. Mais il est plus simple et plus exact d'employer une méthode de réduction à zéro. A cet effet, on chauffe ou refroidit la soudure libre installée dans le laboratoire, jusqu'à ce que le galvanomètre ne dévie plus. Les deux soudures sont alors à la même température, que l'on peut aisément connaître au moyen d'un thermomètre ordinaire. On rend négligeable l'effet des différences introduites par la variation de résistance du circuit avec la température, en employant un galvanomètre très résistant, ou en plaçant en série avec lui des résistances suffisantes, le circuit proprement dit étant peu résistant.

Les métallurgistes mettent couramment à contribution le pyromètre Le Chatelier pour déterminer la température interne

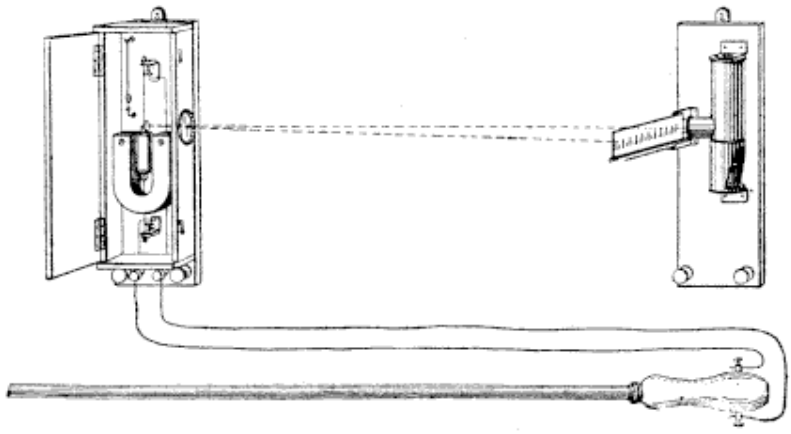


Fig. 8.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de leurs hauts fourneaux. Dans ce but, le couple est mis en circuit avec un galvanomètre Deprez-d'Arsonval (fig. 8). L'intensité (ou la force électromotrice) du courant développé permet de déduire la température à l'aide d'un diagramme (fig. 9). Celui-ci se dresse en plongeant une des soudures du couple, protégée par un revêtement réfractaire, dans des bains de température connue.

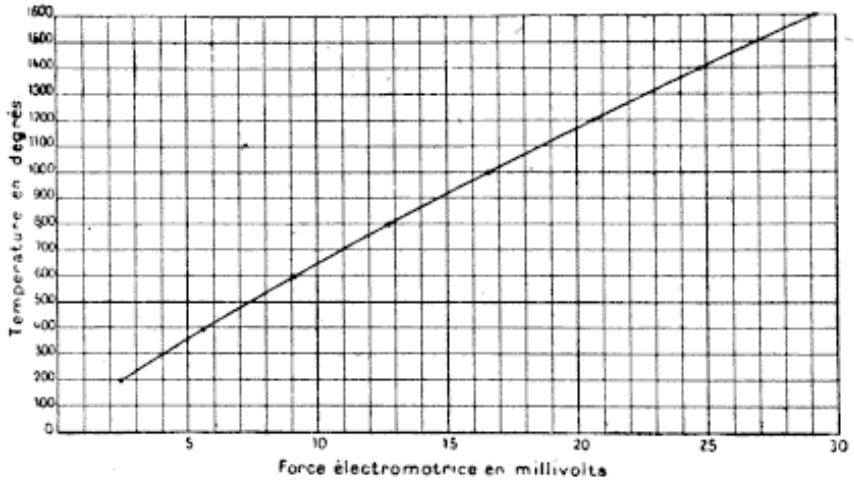


FIG. 9.

La fusion du plomb donne une température stable de 325°, celle du zinc de 415, etc.

Enfin, on utilise aussi la pile thermo-électrique dans les laboratoires, où la question de rendement s'efface devant la constance et la facilité d'entretien et de conduite de ce genre de générateur d'électricité.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE II

Piles hydro-électriques.

§ 1. — Principales piles hydro-électriques.

Nous avons vu que, d'après Nernst, une lame de métal plongée dans un liquide et attaquable par celui-ci, tend à émettre des ions, de la même manière qu'un liquide dégage des vapeurs en présence d'un espace non saturé. Les ions métal possédant une charge positive, la lame reste chargée négativement et le phénomène est rapidement limité par l'action réciproque des charges positives des ions entrés en solution et de la charge négative de la lame.

Si l'on plonge maintenant dans le liquide une lame d'un métal inaltérable qu'on relie métalliquement à la lame attaquée, elle se charge négativement comme cette dernière. Alors les ions de la solution, chargés positivement, se précipitent sur elle et le phénomène continue. Un courant prend naissance allant, dans la solution, de la lame attaquée à celle qui ne l'est pas et dans le circuit extérieur, de la lame inaltérable à l'autre.

L'action se maintiendra d'autant plus constante, que les ions venant s'appliquer sur l'électrode positive seront plus vite éliminés, ce que l'on obtiendra au moyen d'un dépolarisant approprié. Le choix du dépolarisant est donc très important ; il constitue d'ailleurs la caractéristique de la plupart des éléments ; aussi est-il naturel de classer les éléments hydro-électriques d'après la nature de ce constituant essentiel. On distingue donc les piles sans dépolarisant et celles à dépola-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

risant solide ou liquide, ces dernières admettant deux subdivisions : les piles à un ou deux liquides.

Lorsqu'un élément hydro-électrique débite sur une résistance constante, on remarque souvent que la force électromotrice monte pendant les premiers moments du passage du courant, pour retomber bientôt à une valeur moindre qui se maintient à peu près constante pendant plus ou moins longtemps. La poussée du début, due à l'absence de polarisation et de déchets dans la pile, porte le nom de *coup de fouet*.

Piles sans dépolarisant.—Pile de Volta.— C'est la plus ancienne et la plus simple. Elle se compose (fig. 10) d'un vase rempli d'eau acidulée au $1/10$ d'acide sulfurique, dans laquelle plongent deux lames métalliques, l'une en zinc, pôle négatif, l'autre en cuivre, pôle positif. Dès que l'on ferme le circuit, l'eau acidulée est électrolysée. Les ions d'oxygène réagissent avec ceux de zinc pour former de l'oxyde de zinc, tandis que ceux d'hydrogène vont se fixer sur le cuivre, où l'hydrogène apparaît à l'état naissant.

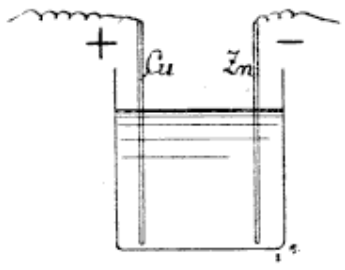


Fig. 10.

Ces effets sont représentés par l'équation

$$Zn + H^2 O = Zn O + \overset{\uparrow}{H^2}.$$

Puis l'oxyde de zinc réagit avec l'acide sulfurique suivant la formule

$$Zn O + H^2 SO^4 = Zn SO^4 + H^2 O.$$

En résumé, il y a décomposition d'un équivalent d'acide sulfurique et formation d'un équivalent de sulfate de zinc.

Appliquons la formule de Kelvin.

$$E = 0{,}0432 (W_e - W'_e) \text{ volts.}$$

La différence de chaleur de formation du sulfate de zinc et de l'acide sulfurique étant de 19 calories kilogrammes-degrés nous aurons

$$E = 0{,}0432 \times 19 = 0{,}821 \text{ volt.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En réalité on trouve près d'un volt à circuit ouvert.

L'H s'attache à la plaque positive, ce qui polarise la pile et réduit la section de passage du courant.

On atténue son effet nocif en utilisant une plaque positive de grande surface rendue grenue par un dépôt électrolytique préalable de platine ou d'argent. L'H s'agglomère en effet en petites bulles, qui tendent à maintenir l'intégrité de leur forme sphérique; les aspérités les écartent et, se détachant, elles viennent crever à la surface du liquide. On active aussi le dégagement des bulles en mettant l'électrode en mouvement. De bons résultats sont également fournis par l'emploi de charbon de cornue ou de charbon artificiel.

La force électromotrice peu élevée de cette pile, jointe à une polarisation rapide, l'ont fait abandonner complètement.

Piles à dépolarisant solide. — ELÉMENT LECLANCHÉ. — C'est le type d'une importante catégorie d'éléments convenant particulièrement pour les applications ne demandant qu'un courant faible et intermittent, telles que sonneries, télégraphes, téléphones.

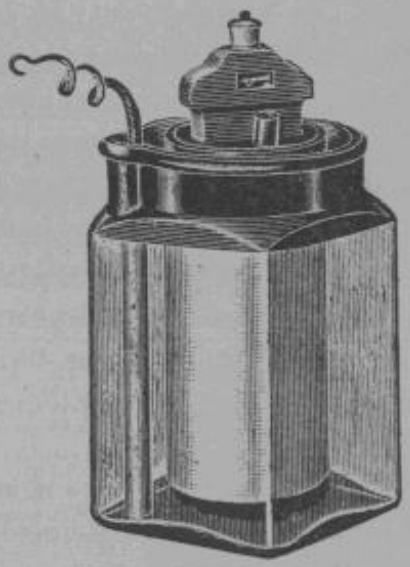


FIG. 11.

L'élément Leclanché primitif se compose (fig. 11) d'un bocal en verre contenant une solution saturée de chlorure ammonique dans l'eau et un bâton ou cylindre de zinc amalgamé, pôle négatif. Au centre du bocal se trouve un vase poreux rempli de charbon de cornue concassé et de bioxyde de manganèse (pyrolucite, bioxyde aiguillé du commerce) entourant un prisme de charbon, pôle positif, coiffé d'un empâtement en plomb fondu dans lequel est fixée une borne de prise de courant.

La tête en plomb est soustraite à toute attaque chimique, au moyen d'un vernis isolant,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le mélange dépolarisant est recouvert d'une couche de cire percée d'un trou pour l'évacuation des gaz.

En circuit fermé, le zinc se dissout partiellement à l'état de chlorure de zinc. L'hydrogène réduit le bioxyde de manganèse en sesquioxyde et l'ammoniaque se dégage. Ces réactions sont représentées par l'équation discutée :

$$Zn + 2\,NH^4Cl + 2\,Mn\,O^2 = Zn\,Cl^2 + 2\,\overset{\uparrow}{H^3}N + H^2O + Mn^2O^3.$$

Des réactions secondaires donnent naissance à du chlorure double de zinc et d'ammonium et à de l'oxychlorure de zinc. Ce dernier sel, peu soluble, se forme surtout quand l'élément est inactif. Il s'attache au zinc et doit être gratté après quelque temps.

On n'est pas fixé sur le rôle exact du bioxyde de Mn. D'après les recherches de M. Obak [1], la moitié seulement de l'oxygène consommé par la pile serait fournie par le bioxyde. Il est probable que l'autre moitié est empruntée à l'air emprisonné dans le charbon et le bioxyde, et dissous dans le liquide environnant. Lorsque la pile travaille continuellement, la chute rapide de force électromotrice que l'on observe pendant les premiers jours (coup de fouet) est vraisemblablement due à la disparition de la plus grande partie de cet oxygène. Après une période de repos, cette perte est partiellement recouvrée. *Il est avantageux d'employer le peroxyde en poudre bien tassée.*

Le vase, de 15 centimètres de hauteur, est de forme quadrangulaire ou ronde. Il est bon d'enduire ses bords supérieurs de paraffine ou plus simplement de savon mou, pour arrêter les sels grimpants.

En circuit ouvert les réactions sont à peu près nulles.

La force électromotrice de l'élément est 1,48 volt, sa résistance intérieure atteint souvent 10 ohms. Elle est principalement due à la présence de la cloison poreuse qui, d'autre part, s'obstrue et devient imperméable à la longue. On s'est donc ingénié à la supprimer.

---

[1] Obak, *L'Électricien*, numéro du 24 octobre 1891, p. 287.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Leclanché a agglomérés. — Le vase poreux et le mélange dépolarisant sont remplacés par deux plaques d'agglomérés (fig. 12) juxtaposées au charbon. Un bâton en zinc, souvent séparé par un blochet en bois, est réuni aux plaques au moyen de jarretières en caoutchouc. La lame de charbon se termine à la partie supérieure par une garniture en plomb munie d'une borne de prise de courant. La partie supérieure de la lame, ainsi que la tête en plomb, sont noyées dans un mélange de cire et de paraffine destiné à remplir les pores et à arrêter les sels grimpants qui pourraient attaquer le métal et compromettre la communication électrique. Enfin, pour protéger plus complètement le plomb contre les actions extérieures, on l'enduit d'un mélange de résine et de goudron.

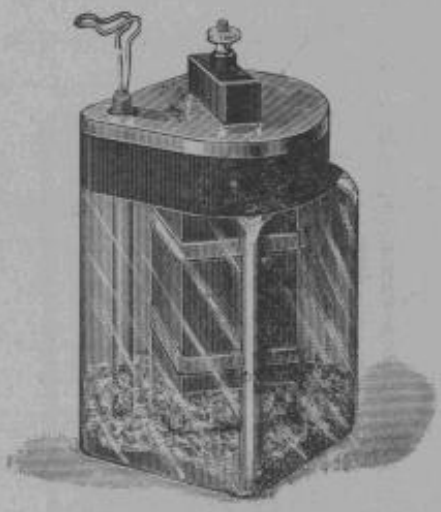


Fig. 12.

Les plaques d'agglomérés sont formées d'une pâte composée de 42 parties de bioxyde de manganèse, 52 de charbon de cornue granuleux 6 de gomme laque, comprimées sous 300 atmosphères à la température de 100° centigrades.

La résistance intérieure de cet élément est de 3 à 4 ohms.

Élément Leclanché-Barbier. — Variante du précédent (fig. 13). Le zinc est maintenu dans l'axe du bocal. Concentriquement se trouve un cylindre creux formé par l'agglomération de graphite et de bioxyde de manganèse pulvérisés. Ces matières sont mélangées avec du brai et un peu de soufre, puis moulées à la forme voulue, sous pression, et soumises à une tem-



Fig. 13.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pérature de 35o°. Le produit ainsi obtenu est solide en même temps que poreux, ce qui facilite l'action dépolarisante.

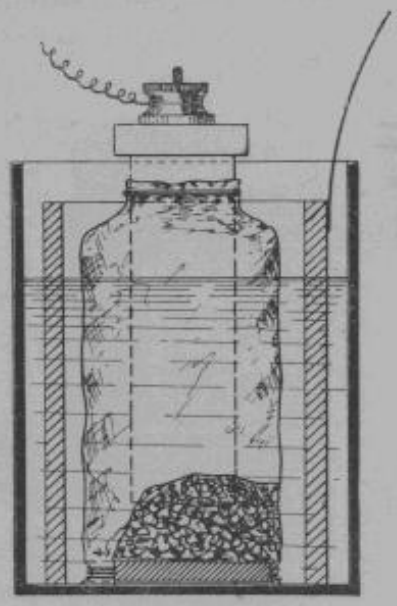


Fig. 14.

Élément Warnon. — Autre variante beaucoup utilisée en Belgique pour la télégraphie (fig. 14). Le vase poreux est remplacé par un sac en forte toile à fond de bois, rempli du mélange dépolarisant. Des blochets en bois l'isolent du zinc cylindrique.

Éléments secs. — Un grand inconvénient des éléments hydro-électriques réside dans l'évaporation plus ou moins rapide du liquide et dans la présence des sels insolubles ou grimpants qui imposent un entretien périodique.

La tendance actuelle est de transformer les éléments du genre Leclanché, qui s'y prêtent particulièrement bien, en éléments dits *secs*. Ces éléments (fig. 15, 16) sont constitués par un cylindre ou prisme de charbon muni d'une borne de prise de courant, entouré de bioxyde de manganèse en poudre enfermé dans un linge, sur lequel est plaqué du plâtre imprégné de chlorure ammonique. Souvent le linge disparaît et le dépolarisant est simplement mélangé au plâtre imprégné. Le tout est enfermé dans un vase cylindrique ou parallélipipédique, en zinc, formant l'électrode négative et pourvu, à cet effet, d'une borne de prise de courant. Le dessus du cylindre est fermé par une couche de cire dans laquelle on a ménagé, pour l'évacuation des gaz engendrés,



Fig. 15.



Fig. 16.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

deux conduits capillaires formés par deux petits bouts de jonc calciné.

Les dimensions sont : diamètre 7 à 8 centimètres, hauteur 14 à 18 centimètres,

La force électromotrice est de 1,54 volt pouvant aller à 1,58. *La résistance intérieure n'atteint en moyenne que 0,28 O.*

Élément de Lalande et Chaperon. — Un des modèles comprend un bocal rempli, jusqu'à 4 centimètres environ du bord, d'une solution de potasse caustique à 30 ou 40 °/₀. Le fond porte un cylindre en tôle A (fig. 17) contenant le mélange dépolarisant qui est ici de l'oxyde de cuivre.



Fig. 17.

Une tige de zinc contournée en spirale pour présenter une grande surface sous un petit volume, attachée au couvercle en ardoise fermant le vase, plonge sa partie spiraloïde dans la solution potassique. Une borne fixée à l'extrémité de cette tige constitue le pôle — ; le pôle + est fourni par une tige de cuivre recouverte de caoutchouc à la traversée du vase et rivée au cylindre du fond.

On verse au-dessus de la solution potassique, une couche de pétrole brut ou de paraffine fondue, pour éviter l'attaque de la potasse par l'acide carbonique de l'air, ou on rend l'élément hermétique.

On emploie aussi l'oxyde de cuivre sous la forme d'aggloméré, ce qui donne des éléments d'une disposition semblable à celle du Leclanché à aggloméré.

L'action chimique est nulle à circuit ouvert. En circuit fermé, l'eau est électrolysée ; l'oxygène se portant à l'anode forme de l'oxyde de zinc qui se dissout à l'état de zincate de potasse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'hydrogène dégagé à la cathode réduit l'oxyde de cuivre en cuivre métallique.

Ces réactions répondent à la formule :

$$Zn + 2\,K\,OH + Cu\,O = K^2O^2Zn + H^2O + Cu\downarrow.$$

La force électromotrice est de 0,8 à 0,9 volt ; la résistance intérieure 0,15 ohm.

La manipulation des piles à la potasse exige certaines précautions, la potasse brûlant la peau et détériorant les vêtements. On guérit la lésion produite en lavant la partie attaquée avec une solution de chlorhydrate d'ammoniaque ou plus simplement avec de l'eau pure, puis de l'eau vinaigrée.

Modification Edison. — M. Edison ajoute à l'hydrate de potassium 15 % de silicate de potassium, ce qui double la puissance dissolvante de l'électrolyte pour le zinc et par suite augmente beaucoup la quantité d'électricité fournie. D'autre part, on peut substituer à l'oxyde de cuivre de l'hydroxyde de nickel.

Il se forme un sel double de zinc, de silicium et de potassium, beaucoup plus soluble dans la solution alcaline, que le zincate de potassium.

Piles à dépolarisant liquide et à un seul liquide. — Les éléments de cette classe mettent à contribution comme liquide dépolarisant de l'acide chromique, soit ajouté directement à la solution excitatrice, soit produit par la réaction de l'acide sulfurique de celle-ci sur du bichromate de potassium ou de sodium.

On a

$$3\,Zn + K^2Cr^2O^7 + 7\,H^2SO^4 = 3\,Zn\,SO^4 + Cr^2(SO^4)^3, K^2SO^4 + 7\,H^2O.$$

Les produits de la réaction sont donc du sulfate de zinc, de l'alun de chrome et de l'eau.

La force électromotrice est de 1,9 à 2 volts.

A circuit ouvert, le zinc est attaqué très énergiquement ; aussi convient-il de le retirer du liquide après usage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Élément Grenet. — C'est un des plus connus de cette classe. Un récipient en forme de ballon, d'où aussi le nom de *pile-ballon* (fig. 18), porte un couvercle isolant auquel se rattachent une tige centrale en zinc et deux lames en charbon raccordées à des bornes. La tige de zinc peut coulisser de manière à être retirée du liquide.

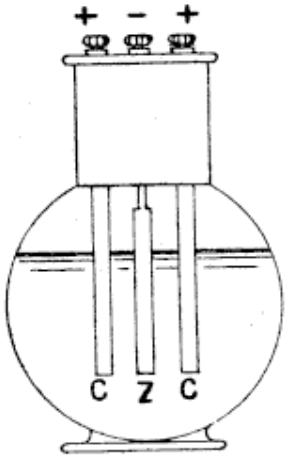


Fig. 18.

Piles à deux liquides. — Élément Daniell. — Un récipient en verre contient un cylindre en zinc auquel est rivée une lame de connexion en cuivre. Le zinc baigne dans une solution acidulée d'acide sulfurique. Au centre du bocal en verre, se trouve un vase poreux rempli d'une solution saturée de sulfate de cuivre, dans laquelle plonge un cylindre en cuivre raccordé à l'extérieur par un fil de même métal.

Lorsque la pile fonctionne, le zinc se dissout à l'état de sulfate de zinc et l'H naissant réduit le sulfate de cuivre suivant la formule.

$$Zn + H^2SO^4 + Cu\ SO^4 = Zn\ SO^4 + H^2SO^4 + Cu\downarrow.$$

Tout se borne à la formation d'un équivalent de sulfate de zinc et à la réduction d'un équivalent de sulfate de cuivre.

Appliquons la même équation que précédemment. La formation d'un équivalent de $Zn\ SO^4$ dégage 54,8 calories (kilogrammes-degrés) tandis que la décomposition d'un équivalent de $Cu\ SO^4$ absorbe 29,5 calories, de sorte que la force électromotrice calculée est égale à

$$0{,}043\ (54{,}8 - 29{,}5) = 1{,}09\ \text{volt}.$$

On trouve en réalité 1,07 volt.

Par suite de la réduction du $Cu\ SO^4$, la solution se trouvant dans le vase poreux tend à s'appauvrir. On maintient sa concentration au moyen de cristaux de $Cu\ SO^4$. Dans le modèle à ballon

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 19), ils sont contenus dans un ballon renversé plongeant par le col dans le vase poreux. La solution saturée étant plus dense coule au fond du vase poreux et est incessamment remplacée par la solution appauvrie.

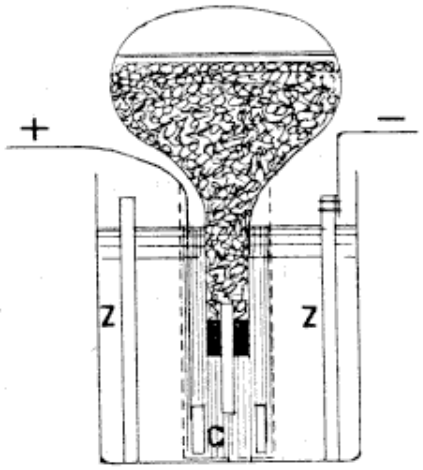


Fig. 19.

La résistance de l'élément augmente par suite de la formation de sulfate de zinc, qui a, en outre, l'inconvénient de provoquer la formation de cristaux grimpants. On doit donc renouveler le liquide extérieur de temps à autre.

A circuit ouvert, la solution cuivrique diffuse lentement à travers le vase poreux dans le liquide acide. Elle vient en contact avec le zinc, et le cuivre se précipite en dépôts boueux. *Il convient donc de laisser l'élément débiter constamment.*

Il faut avoir soin d'éviter que la solution acidulée ne monte jusqu'au niveau de la lame de cuivre de connexion fixée à celle de zinc, car elle serait attaquée et rapidement détruite.

Élément Gravity. — Un vase cylindrique renferme deux liquides superposés par ordre de densité : l'un inférieur est une solution de sulfate de cuivre, l'autre est de l'eau. Dans le premier, plongent des lames de cuivre formant une étoile à six branches entourée de cristaux de sulfate de cuivre (fig. 20) pour maintenir la concentration de la solution ; dans le second, un zinc amalgamé ramifié en sept branches et attaché au bocal au moyen d'un crochet venu de fonte avec la masse du support. Aux lames de cuivre vient se fixer un fil de cuivre recouvert de gutta-percha pour la traversée des liquides.

A circuit fermé, le zinc se transforme en sulfate de zinc ; le sulfate de cuivre est réduit en cuivre.

$$Zn + H^2O + Cu\,SO^4 = Zn\,SO^4 + H^2O + Cu.$$
$$\downarrow$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par le travail de la pile, la solution supérieure se concentre de plus en plus. On la retire au bout d'un certain temps au moyen d'une pipette et on la remplace par de l'eau de pluie.

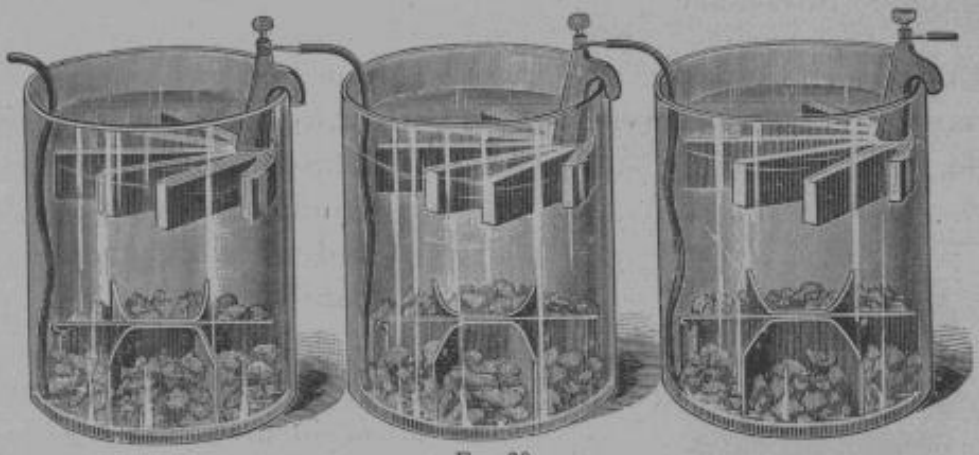


Fig. 20.

Quand l'élément ne fonctionne pas ou lorsqu'il est soumis à des vibrations, le sulfate de cuivre remonte en petite quantité à la partie supérieure du bocal et produit un dépôt de cuivre sur le zinc. Ce dépôt s'allonge en filaments qui finissent par réunir les pôles et mettre l'élément en court-circuit. Il est donc nécessaire de passer de temps à autre une baguette de verre sous l'électrode en zinc, de manière à en détacher les dépôts cuivreux, mais il est préférable de *laisser débiter constamment l'élément*, comme il a été dit plus haut.

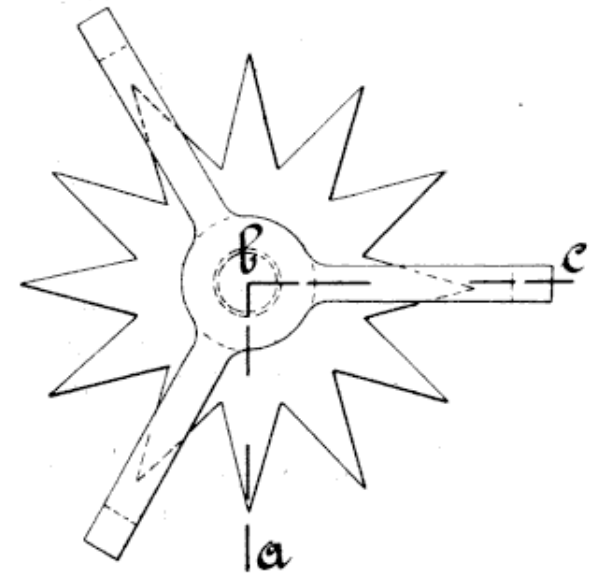
La résistance intérieure est de 4 à 5 ohms.

Le montage du Gravity est quelque peu délicat. On commence par déposer les lames de cuivre et les cristaux de sulfate sur lesquels on place une feuille de papier circulaire ayant approximativement le diamètre inférieur du vase. On verse la solution cuivrique le long de la paroi en s'aidant d'un agitateur. Le papier surnage. Quand la couche de sulfate dépasse d'environ 2 centimètres les lames de cuivre, on verse légèrement sur le disque de l'eau de pluie, au moyen d'une pipette ou d'une seringue. Le papier empêche les remous et par suite le mélange de l'eau et du sulfate de cuivre. Quand l'eau parvient à quelques centimètres du bord, on retire le papier et l'on accroche le zinc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Avant de mettre l'élément en service, il convient de réunir les deux pôles en court-circuit pendant quelques heures, pour provoquer la formation de sulfate de zinc et réduire ainsi la résistance intérieure.

Élément d'Infreville. — En Belgique, on utilise pour les éléments du genre Gravity, une modification due à M. d'Infreville, qui permet d'utiliser complètement les zincs dont les bouts donnent, dans les piles ordinaires, un déchet qui peut s'élever à 30 ou 40 %.



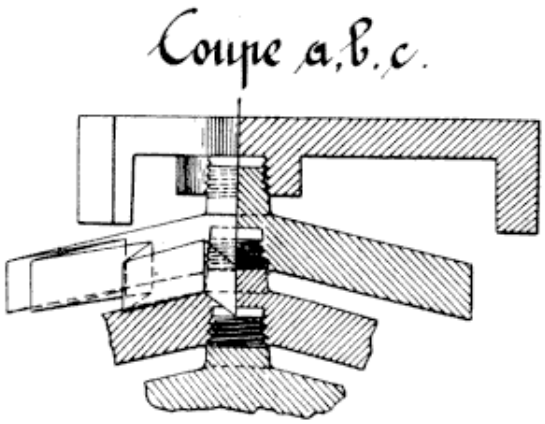


Fig. 21 et Fig. 22.

Dans ce but, le zinc a la forme d'une étoile à douze branches (fig. 21) terminée à sa partie supérieure par un tronc de cône fileté, tandis que l'autre face présente un creux taraudé aux mêmes dimensions.

Le pôle + consiste en une étoile de cuivre plongeant dans une solution de $CuSO^4$ saturée par des cristaux. Au-dessus, déposée avec les précautions indiquées plus haut, se trouve l'eau.

Le zinc plonge dans celle-ci. Il s'attache à un support en fer verni prenant appui sur le vase en verre, en vissant dans le support (fig. 21) le tronc de cône fileté, qu'il présente sur sa face supérieure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand le zinc est presque entièrement usé, on le dévisse du support, on applique sur celui-ci un nouveau zinc et, sur ce dernier, l'ancien zinc (fig. 22), puis on remet le tout en place. De cette manière, l'utilisation du métal est complète.

Élément Bunsen. — Il a été beaucoup employé naguère dans les laboratoires pour la production de courants de 10 à 15 ampères pendant quelques heures, ainsi que pour les éclairages provisoires du début.

Un vase en grès contient de l'eau acidulée au vingtième, dans laquelle plonge un cylindre en zinc Z (fig. 23). Au centre du bocal, un vase en terre poreuse renferme de l'acide nitrique du commerce ainsi qu'un prisme en charbon C pourvu d'une pièce de connexion en cuivre.

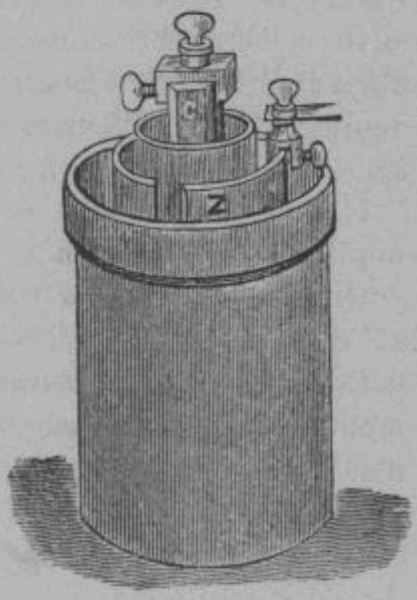


Fig. 23.

A la fermeture du circuit, le zinc se transforme en sulfate et l'hydrogène libre décompose l'acide nitrique en eau et peroxyde d'azote qui se dégage sous forme de vapeurs rutilantes.

$$Zn + H^2SO^4 + 2\,H\,NO^3 = Zn\,SO^4 + 2\,\dot{N}O^2 + 2\,H^2O.$$

La force électromotrice est de 1,8 volt en moyenne; elle se maintient pendant plusieurs heures, pour tomber brusquement dès que la densité de l'acide nitrique arrive à 1,26.

D'après M. d'Arsonval, il y a avantage, au point de vue de l'épuisement complet des constituants, à remplacer l'acide sulfurique par de l'acide chlorhydrique, et l'acide nitrique par un mélange d'acides nitrique et chlorhydrique à proportions égales.

Piles étalons. — Certains éléments présentent, lorsqu'ils sont employés sous des conditions définies, une constance de force électromotrice telle, qu'ils peuvent servir d'étalons.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Élément au sulfate de cuivre.—Pour les essais sommaires, on peut prendre un élément au sulfate de cuivre fraîchement monté et admettre que sa force électromotrice est de 1,07 volt.

Élément Latimer Clarck. — Pour des essais précis, on dispose de divers types d'éléments, parmi lesquels un des plus employés est le *Latimer Clarck*, composé comme suit :

Pôle positif. . . .	platine dans mercure.
Dépolarisant . . .	Hg^2SO^4 en pâte autour du platine.
Liquide actif . . .	$Zn\,SO^4$ sursaturé.
Pôle négatif . . .	zinc amalgamé.

Il faut un montage soigné, des constituants très purs et appliquer rigoureusement les prescriptions.

On a alors pour la force électromotrice $E = 1{,}434$ volt à 15° centigrades.

Cet élément, comme tous ses congénères, se polarise rapidement. Il ne doit être employé qu'en circuit, avec une résistance d'au moins 10 000 ohms et ne débiter que pendant le temps strictement nécessaire.

Sa force électromotrice à θ degrés est donnée par la formule

$$E_\theta = 1{,}434[1 - 0{,}00077(\theta - 15)] \text{ volts.}$$

Élément Weston ou au cadmium. — Sa forme est celle d'un tube en H, c'est-à-dire qu'il comporte deux tubes verticaux réunis entre eux par un canal horizontal. Le tout est en verre. L'électrode positive est formée par du mercure pur distillé. Elle est recouverte d'une pâte formée de sulfate mercureux solide, de sulfate de cadmium et de mercure. L'électrode négative est un amalgame à 72 % de cadmium. Enfin l'électrolyte est une solution de sulfate de cadmium avec du sulfate de cadmium solide en excès.

La force électromotrice de l'élément Weston est de 1,0184.

Le grand avantage de l'élément au cadmium est qu'il prend immédiatement sa force électromotrice normale, tandis que le Clarck doit reposer plusieurs semaines avant d'être employé, et que le coefficient de variation de l'élément au cadmium est pratiquement négligeable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Choix des constituants des piles. — La puissance utile maximum développée par un élément a pour expression

$$p_M = \frac{E^2}{4r},$$

dans laquelle E est la force électromotrice totale et r la résistance intérieure. On a donc intérêt à utiliser des substances donnant la *force électromotrice la plus élevée*, tout en étant de la *meilleure conductibilité* possible. Un autre point, dont il faut tenir compte, réside dans l'*attaque à circuit ouvert*. Enfin, la *valeur éventuelle des sous-produits* d'une pile doit entrer en ligne de compte.

Pôle négatif. — Le métal le plus utilisé jusqu'ici est le zinc. C'est, en effet, parmi les métaux usuels, le plus positif. On pourrait employer des métaux moins chers, mais la réduction de prix obtenue, ne compenserait pas la diminution d'activité qui en résulterait.

Le zinc chimiquement pur n'est pas attaqué par une solution sulfurique à circuit ouvert. On emploiera donc du zinc commercial *le plus pur possible*. Les impuretés qu'il contient agissent, en effet, comme pôles positifs de couples locaux, dès que la solution acidulée est en présence et provoquent une attaque continue du zinc, même quand l'élément ne fonctionne pas.

On évite cet inconvénient par l'amalgamation. Elle se réalise le mieux en fondant en vase clos 96 parties de zinc avec 4 parties de mercure. On peut aussi plonger le zinc dans une solution mercurique ou le frotter avec une brosse et du mercure. Mais ces derniers procédés ne produisent qu'une amalgamation superficielle qu'il faut renouveler au bout d'un certain temps.

Quel est exactement le rôle de l'amalgamation ? Il semble que la surface du zinc subisse une transformation telle, que les bulles isolantes d'H viennent s'y attacher aisément et la recouvrent d'une gaine protectrice. Si, en effet, on fait le vide au-dessus d'un élément dont le zinc amalgamé est passif, le gaz se dégage et l'attaque commence.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pôle positif. — On le constitue au moyen d'un corps conducteur non attaqué par les réactifs, ayant la plus grande surface possible pour réduire la résistance intérieure et faciliter éventuellement le dégagement des gaz naissants.

On emploie dans les petits éléments spéciaux une lame métallique revêtue d'une mince couche d'un métal inattaquable par les réactifs.

En général, on recourt au charbon de cornue taillé en parallélipipèdes allongés ou, beaucoup plus fréquemment actuellement, au charbon artificiel moulé sous pression.

Cloisons et récipients poreux. — On utilise principalement la porcelaine dégourdie, dont on fixe le degré de porosité par la lenteur avec laquelle l'eau pure la traverse. On rencontre aussi des vases poreux en charbon artificiel qui servent de pôle positif, tout en renfermant le dépolarisant.

---

§ 2. — Energie fournie par les piles hydro-électriques.

Quantités de substances réagissant dans une pile. — La loi de Faraday permet de calculer aisément les quantités de substances réagissant dans une pile.

Prenons comme exemple la pile De Lalande et Chaperon, dont l'équation est

$$Zn + 2KOH + Cu\,O = K^2O^2Zn + H^2O + Cu.$$

Remplaçons les symboles par les poids atomiques nous aurons :

$$65{,}4 + 2(39{,}15 + 16 + 1) + (63{,}6 + 16) = (78{,}3 + 32 + 65{,}4) + (2 + 16) + 63{,}6$$

ou

$$65{,}4 + 112{,}30 + 79{,}6 = 175{,}7 + 18 + 63{,}6$$

ce qui veut dire que 65,4 gr de zinc réagissant avec 112,30 gr de potasse et 79,6 gr d'oxyde de cuivre, fournissent 175,7 gr de zincate de potassium, 18 gr d'eau et 63,5 gr de cuivre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Energie fournie et son cout. — En même temps, il y a production d'électricité à raison de 96 540 coulombs par valence engagée ou rompue. Ici nous avons deux valences en jeu, de sorte que l'*équation électrolytique* de la pile est

$$\frac{Zn}{2} + KOH + \frac{CuO}{2} = \frac{K^2O^2Zn}{2} + \frac{H^2O}{2} + \frac{Cu}{2}$$

En remplaçant les symboles par les poids atomiques, on voit que 32,7 de zinc réagissent avec 56,15 de potasse et 39,8 d'oxyde de cuivre pour dégager 96 540 coulombs ou

$$\frac{96\,540}{3\,600} = 26{,}81 \text{ ampères-heures.}$$

La force électromotrice de la pile De Lalande et Chaperon étant de 0,85 v environ, les quantités de matières engagées ci-dessus correspondront à une puissance de $26{,}81 \times 0{,}85 = 22{,}7$ watts-heures ou

$$\frac{22{,}7}{736} = 0{,}0308 \text{ cheval-heure.}$$

Pour développer un cheval-heure, il faudra donc théoriquement faire réagir des quantités de substances 32,4 fois plus grandes que celles indiquées ci-dessus.

On peut encore effectuer cette détermination autrement. Considérons n éléments de force électromotrice E montés en tension et débitant le courant I. La force électromotrice totale est nE. En appelant z l'équivalent électrochimique d'un des corps réagissant, le poids de ce corps mis en liberté dans chaque élément est Iz et pour les n éléments le poids total libéré

$$P = nIz \text{ par seconde.}$$

La puissance de la pile

$$InE = \frac{nEP}{nz} = \frac{EP}{z}.$$

Pour déterminer la consommation correspondant à la puissance d'un cheval, il suffira d'écrire que l'expression précédente vaut 736 watts, soit

$$\frac{EP}{z} = 736, \quad \text{d'où} \quad P = \frac{736z}{E}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour l'hydrogène $z = 1{,}037 . 10^{-5}$ gramme, d'où

$$P = \frac{736 . 1{,}037}{E . 10^5} \text{ grammes par seconde.}$$

Par heure, la dépense sera 3 600 fois plus grande, soit

$$\frac{27{,}42}{E} \text{ grammes d'H par cheval-heure.}$$

Les autres corps donneront des dépenses proportionnelles à leur équivalent chimique b, soit le poids en grammes

$$\frac{27{,}42}{E} b.$$

On peut dès lors déterminer aisément le coût de l'énergie électrique obtenue au moyen des éléments hydro-électriques.

Pour l'élément Bunsen, par exemple, on obtient les dépenses suivantes, en admettant une force électromotrice moyenne de 1,8 volt.

CORPS	ÉQUIVALENTS	POIDS ENGAGÉS en kilogrammes
Zinc	32,45	0,495
H^2SO^4	49	0,745
HNO^3	63	0,958

En comptant le zinc à fr 0,50 le kilogramme, l'H^2SO^4 à fr 0,10 et l'HNO^3 à fr 0,60, on arrive au prix global de fr 0,898 par cheval-heure total.

Mais la main-d'œuvre de montage et de nettoyage de la pile est onéreuse et les déchets sont considérables. En estimant ces derniers à 0,4 seulement, ce qui est trop faible, et admettant un rendement électrique de 0,7, le prix ci-dessus devient

$$\frac{0{,}898}{0{,}6 . 0{,}7} = \text{fr } 2{,}14.$$

On dépasserait largement 3 francs en faisant entrer en ligne de compte le coût de la main-d'œuvre. Les autres éléments hydro-électriques fourniraient des chiffres analogues.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces résultats sont excessifs, si on les rapproche de ceux obtenus avec les machines. Par exemple, à Bruxelles, grâce au bas prix du charbon qui peut revenir de fr 0,009 à fr 0,0016 le kilogramme, l'hectowatt-heure est vendu fr 0,02 pour la force motrice, ce qui fait ressortir le cheval-heure à fr 0,15.

Conclusion. — Les piles hydro-électriques trouvent surtout leur emploi dans les applications domestiques ou de laboratoire pour la production de courants faibles et, en général, intermittents.

---

§ 3. — Essai des piles hydro-électriques.

Les principaux consommateurs d'éléments hydro-électriques étant les administrations télégraphiques, nous décrirons les essais auxquels procède l'administration des télégraphes belges. Pour se rendre compte du prix de revient de l'énergie que des éléments peuvent fournir, ainsi que de leurs qualités, elle les soumet à trois séries d'essais.

I. **Essai à circuit ouvert.** — Il est important de connaître la façon dont la pile se comporte à circuit ouvert, ce qui se fait en mesurant une fois par mois la force électromotrice et la résistance de l'élément resté en circuit ouvert.

En outre, il y a lieu de noter si l'élément se conserve bien, si l'enveloppe ne se perce pas, etc.

La mesure de la résistance se fait par la méthode de la perte de charge (T. I p. 334). A cet effet, on utilise un voltmètre de grande résistance (500 ohms), ce qui permet de considérer le nombre de volts E qu'il indique quand on le relie aux bornes de l'élément de pile, comme étant celui existant à circuit ouvert. En shuntant alors l'ensemble par une faible résistance r, par exemple de deux ohms, l'aiguille du voltmètre fléchit et reste un instant stationnaire, indiquant un voltage e avant de fléchir de nouveau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La résistance intérieure $\rho = \frac{r(E - e)}{e}$

Lorsque le nombre de mesures est élevé, il y a avantage à utiliser une table à double entrée donnant directement ρ pour chaque couple de valeurs de E et e.

II. **Essai télégraphique.** — Il comporte deux phases.

A. Pendant huit jours, on ferme, de 7 à 19 h, le circuit des piles sur une résistance de 20 ohms par volt, de sorte que le débit ne peut excéder 0,050 A. Matin et soir on mesure la force électromotrice en circuit ouvert et la résistance intérieure, par la méthode indiquée ci-dessus.

B. Après cette première période, on laisse les éléments en circuit ouvert pendant deux jours, puis on les laisse débiter d'une manière continue sur un circuit comprenant 40 ohms par volt, ce qui limite l'intensité au maximum de 0,025 A.

On mesure toutes les semaines E et ρ.

L'essai télégraphique, dont la durée varie de 4 à 10 mois, peut être considéré comme terminé quand la force électromotrice en circuit ouvert tombe au-dessous de 0,8 V par élément.

III. **Essai téléphonique.** — Reliées en série, les piles débitent périodiquement, par l'intermédiaire d'un interrupteur à mouvement d'horlogerie, sur un circuit comprenant 15 Ω par élément. Le voltage moyen étant 1,5, le courant ne dépasse pas 0,1 A et l'interrupteur est réglé de telle manière que l'aiguille en platine qui le constitue, reste plongée cinq minutes toutes les demi-heures dans le mercure d'une petite cuvette en bois. Un interrupteur ordinaire existe aussi dans le circuit. On l'utilise, les huit premiers jours, pour fermer le circuit pendant 12 à 14 h par jour, soit de 7 à 19 h et on mesure matin et soir E et ρ.

Les piles reposent ensuite durant deux jours ; on reconstitue le circuit comme précédemment, mais l'on ne mesure plus E et ρ qu'une fois par semaine.

L'essai, dont la durée varie généralement de 6 à 12 mois, est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

considéré comme terminé quand la force électromotrice en circuit ouvert est tombée à 0,8 V.

Indépendamment de ce qui précède, on soumet encore les éléments, une fois par mois, à un essai de polarisation, pour lequel on utilise un voltmètre enregistreur.

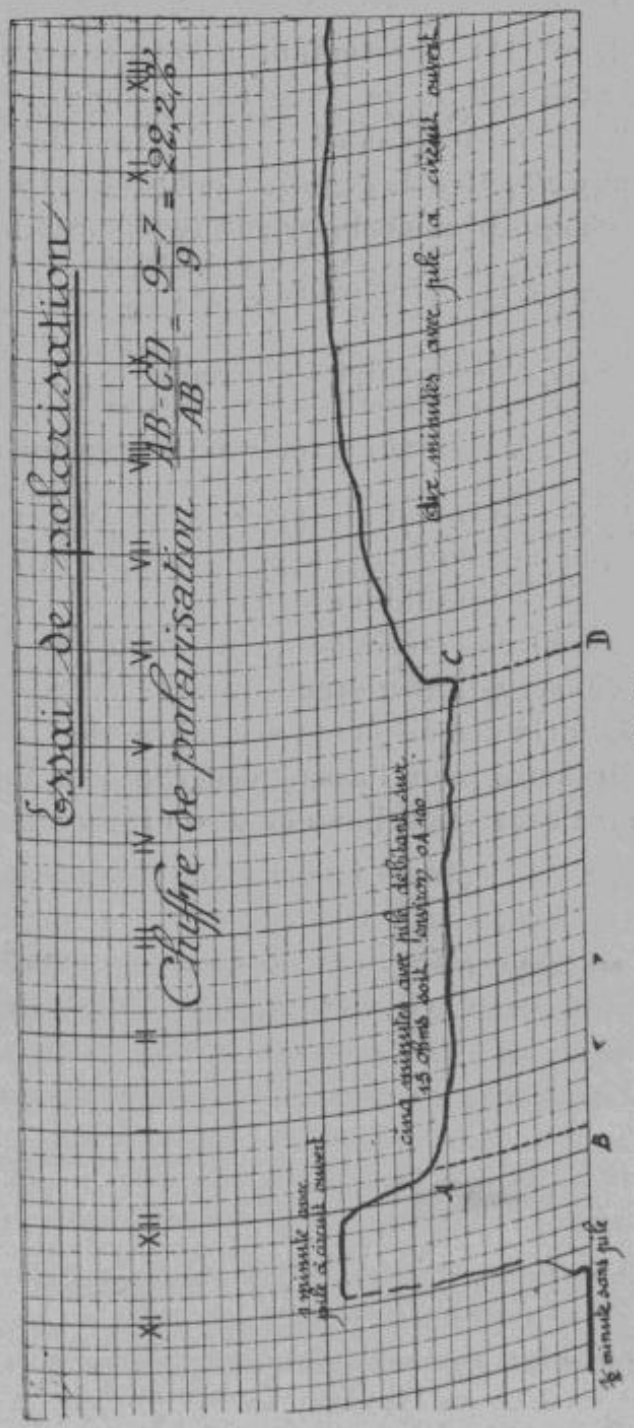


Fig. 24.

Essai de polarisation. On laisse d'abord marcher l'appareil pendant une demi-minute, ce qui donne l'axe du zéro, (fig. 24) puis on le relie à l'élément et on enregistre la force électro-motrice à circuit ouvert. Une minute après, on shunte la pile par une résistance de 15 ohms, ce qui fait tomber immédiatement la force électromotrice. On supprime le shunt après cinq minutes. Le voltage remonte plus ou moins lentement et on coupe la connexion de l'enregistreur après 10 nouvelles minutes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le diagramme figure 24, le chiffre de polarisation en % est donné par

$$\frac{A\,B - C\,D}{A\,B}\,100$$

A B et C D représentant la force électromotrice au commencement et à la fin de la période de shunt.

A l'aide des données ainsi recueillies, on peut calculer : la durée effective de l'essai en heures Σt, t étant la durée en heures de chaque période de fermeture du circuit ; le nombre d'ampères-heures $\Sigma i t$, le courant moyen $\frac{\Sigma i t}{\Sigma t}$, les watts-heures $\Sigma E i t$, la force électromotrice moyenne $\frac{\Sigma E i t}{\Sigma i t}$, la puissance moyenne $\frac{\Sigma E i t}{\Sigma t}$, la résistance intérieure moyenne $\frac{\Sigma \frac{a}{o} \rho}{n}$.

Ces déterminations peuvent se faire, soit par le calcul, soit graphiquement et l'on en déduit le prix du watt-heure pour l'usage télégraphique ou téléphonique. On connaît, d'autre part, la valeur de l'élément aux points de vue de la polarisation et de sa conservation à circuit ouvert.

Le prix des éléments secs varie de 1,25 fr à 4 fr, le coût du watt-heure pour l'usage télégraphique de 0,0121 à 0,063 fr et pour l'usage téléphonique de 0,0141 à 0.08 fr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE III

Les dynamos à courant continu.

Les machines productrices de courant comprennent deux parties essentielles : l'*inducteur* et l'*induit*.

L'*inducteur* a pour objet de développer un ou des flux magnétiques ; il comporte un ou des aimants permanents et la machine s'appelle magnéto-électrique ou simplement magnéto, et un ou plusieurs électro-aimants et la machine devient une dynamo.

L'*induit* supporte les conducteurs qui, dans leur déplacement par rapport aux flux magnétiques, deviennent le siége de forces électromotrices d'induction. Nous commencerons par l'étude de ce dernier organe.

---

§ I. — Etude de l'induit (1).

Induit bipolaire en anneau. — NOYAU ET BOBINAGE. Supposons un champ magnétique N S (fig. 25) dans lequel tourne, suivant la direction indiquée par la flèche, un induit Gramme composé d'un tore en fil de fer isolé, sur lequel est uniformément enroulé un conducteur en cuivre recouvert d'un guipage isolant et assujetti au moyen de frettes en acier ou en bronze.

---

(1) LOPPÉ. *Traité élémentaire des enroulements des dynamos à courant continu*. Gauthier-Villars, Paris.

BRUNSWICK et ALLIAMET. *Enroulements d'induits à courant continu*. Gauthier Villars, Paris.

MEYNIER et NOBIRON. *Les enroulements modernes des dynamos à courant continu*. Béranger, Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par suite de la perméabilité élevée du fer, le flux $\mathfrak{N}$ issu des inducteurs, va bifurquer également entre les deux moitiés de l'induit, l'air environnant n'étant traversé que par un nombre de lignes de force beaucoup moindre, vu sa grande réluctance.

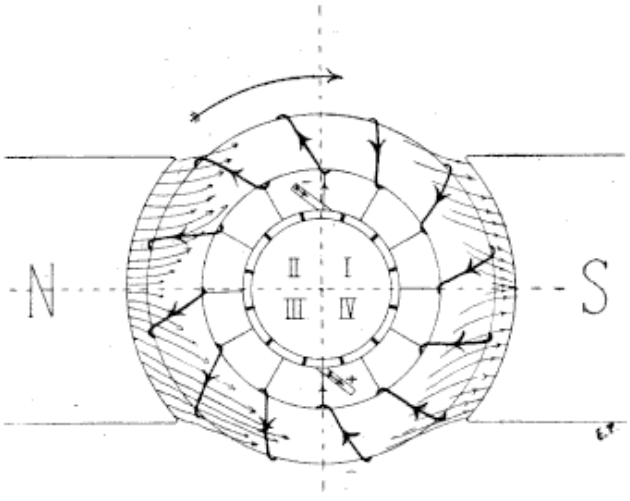


FIG. 25.

Les spires formées par le fil sont, à cause de la variation de l'inclinaison de leur plan sur la direction des deux champs partiels, traversées par des flux de force différents.

Si nous considérons les spires du premier quadrant, nous voyons que le flux qu'elles embrassent va en diminuant. Donc la force électromotrice engendrée est positive. Sa direction est indiquée par les flèches.

Dans le deuxième quadrant, le flux va en augmentant, la force électromotrice est négative.

Dans le troisième quadrant, le flux diminue, donc la force électromotrice est positive, c'est-à-dire, en ayant soin de nous tourner dans la direction du champ et appliquant la règle de Maxwell, de même sens que dans le quadrant précédent, tandis que dans le quatrième quadrant, elle est orientée comme dans le premier.

En résumé, pendant la rotation de l'induit, ses spires se partagent en deux groupes égaux, symétriques par rapport à la droite perpendiculaire à la ligne des pôles appelée *ligne neutre théorique*, et sièges de forces électromotrices égales et de directions opposées.

Il s'agit maintenant de les utiliser pour la production d'un courant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Collecteur et balais. A cette fin, chaque spire ou chaque groupe de spires, en supposant celles-ci partagées en un certain nombre de groupes égaux, dénommés *sections*, est connecté à une lame d'un collecteur constitué par des lames en cuivre (fig. 26), isolées l'une de l'autre, le plus souvent au moyen de mica, et affectant la forme d'un cylindre concentrique à l'axe de rotation. L'ensemble des lames est fortement coincé sur l'axe au moyen des encoches A et B que présentent les lames et de bagues de serrage isolées au mica.

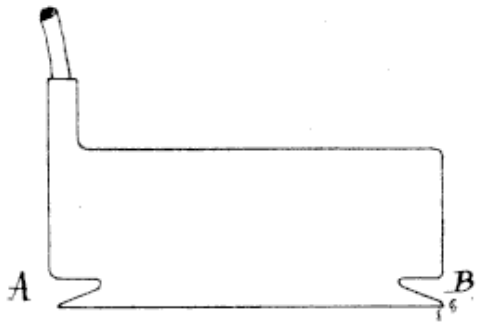


Fig. 26.

En supposant que deux balais en fils, lames ou toiles de cuivre ou en charbon, reliés à un circuit extérieur et diamétralement opposés, appuient sur le collecteur suivant la ligne neutre, nous voyons que les deux moitiés de l'induit, sièges de deux forces électromotrices égales placées en opposition, pourront envoyer leur courant dans le circuit par l'intermédiaire des balais. Le balai supérieur, dans les conditions de la figure, sera négatif, parce que c'est par lui que le courant entrera dans l'induit; l'autre sera positif, parce que le courant en sortira. Si l'induit tournait en sens inverse, ce serait le contraire; le balai supérieur deviendrait + et l'autre —.

Pour éviter des interruptions du circuit, la surface frottante des balais doit être plus large que la séparation isolante de deux lames consécutives du collecteur. Il en résulte que les diverses spires de l'induit sont successivement mises *en court-circuit* par les balais.

Si le nombre des lames du collecteur est suffisamment grand, au moment où une spire échappe au balai supérieur, une autre entre sous le balai inférieur, de sorte que, le nombre de sections induites restant le même de part et d'autre, la force électromotrice de la machine demeure pratiquement constante.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Diagramme des potentiels au collecteur. Procédé Mordey. — On voit immédiatement que le potentiel doit croître symétriquement de lame en lame du collecteur, de part et d'autre du balai négatif, jusqu'au balai positif.

Si, suivant le procédé dû à Mordey, le premier est mis en connexion avec un voltmètre dont la seconde borne communique avec un petit balai auxiliaire auquel on fait successivement parcourir toutes les touches du collecteur en partant du balai négatif, et que l'on porte des longueurs proportionnelles aux voltages lus, sur le prolongement des rayons correspondant aux touches, on obtiendra le diagramme polaire, figure 27, qui, par développement de la circonférence extérieure du collecteur suivant une droite, se transforme comme l'indique la figure 28.

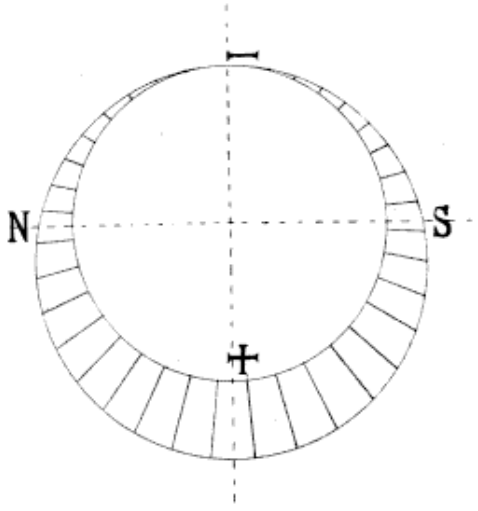


FIG. 27.

L'élément de force électromotrice fourni par chaque section de l'induit, est donné par la différence entre les ordonnées relatives aux deux lames consécutives du collecteur, reliées aux extrémités de la section considérée. Cette différence est maximum aux deux points d'inflexion de la courbe, qui correspondent aux bobines traversant la ligne des pôles. C'est là, en effet, que la variation du flux embrassé par les spires est la plus grande, ou que le nombre de lignes de force coupées par unité de temps est le plus considérable.

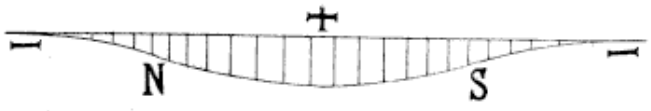


FIG. 28.

Aux extrémités de la ligne neutre, où la courbe présente respectivement un maximum et un minimum, l'accroissement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'ordonnée est nul. La mise en court-circuit des spires situées aux environs de la ligne neutre n'a donc aucune influence au point de vue de la valeur de la force électromotrice fournie par la machine, tout au moins *à circuit ouvert*.

On peut utilement employer la méthode de M. Mordey pour vérifier la symétrie du champ magnétique dans lequel se meut l'induit. Un défaut organique ou d'homogénéité est immédiatement accusé par une déformation de la courbe des potentiels.

Remarque I. — Si l'on considère une spire en particulier, on voit que, vis-à-vis d'un pôle, la force électromotrice engendrée est maximum ; elle est nulle dans la position rectangulaire suivante ; elle change de sens et acquiert la même valeur absolue que précédemment en face du pôle suivant, pour revenir à zéro 90° plus loin. La spire supposée seule et fermée sur elle-même, serait parcourue par un courant alternatif, présentant une oscillation complète par tour de l'induit ; la vitesse angulaire avec laquelle varierait sa force électromotrice serait égale à celle de l'induit ; la fréquence du courant correspondrait au nombre de tours par seconde de l'induit.

II. — En appelant T la durée d'un tour de l'induit, la force électromotrice continue recueillie aux balais est donc, de part et d'autre de ceux-ci, égale à la somme de $\frac{n}{2}$ valeurs prises aux temps successifs $\frac{T}{n}$ des forces électromotrices alternatives, successivement engendrées dans une spire, pendant chaque moitié d'une rotation complète de l'induit.

III. — Si nous appliquons à l'ensemble : inducteurs, balais, induit, une vitesse angulaire égale et contraire à celle de ce dernier, rien ne sera changé au point de vue des phénomènes d'induction : l'induit restera fixe dans l'espace, tandis que les inducteurs, leur flux magnétique et les balais tourneront en sens inverse, avec la vitesse angulaire primitive. Donc, *on peut obtenir une force électromotrice continue d'un enroulement in-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duit fixe, que traverse avec une vitesse uniforme un champ constant, à condition de munir l'enroulement d'un collecteur, sur lequel des balais se déplacent dans le même sens et avec la même vitesse que le champ.

Suppression des étincelles sous les balais. — En fermant le circuit extérieur compris entre les balais, l'induit se trouve subdivisé en deux moitiés parcourues par des courants égaux et inverses. Si les balais se trouvent exactement sur la ligne neutre, ou en deçà par rapport au sens de la rotation de l'induit, leurs extrémités frottant sur le collecteur vont être le siège d'étincelles extrêmement nuisibles pour leur bonne conservation.

Afin de rendre plus claires les explications qui vont suivre, nous omettrons le collecteur, en supposant le courant capté par les balais frottant directement sur les fils à la partie extérieure de l'anneau, dispositif qui a d'ailleurs été réalisé jadis dans certaines machines, de la maison Siemens notamment.

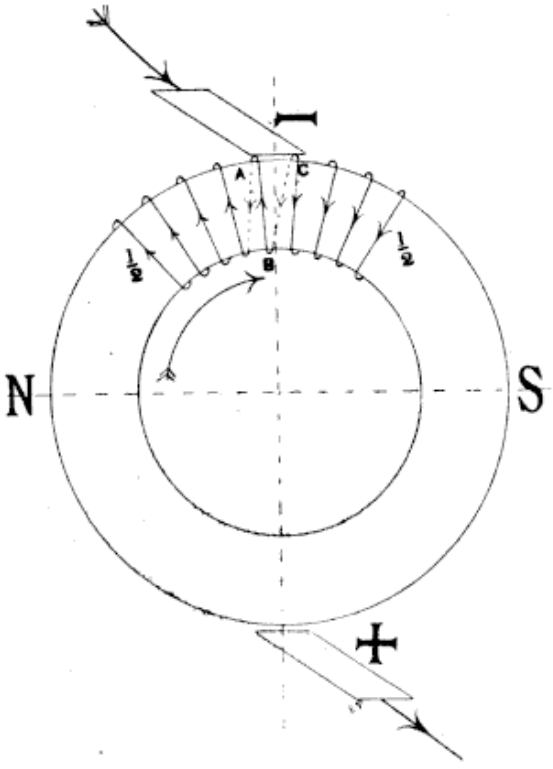


Fig. 29.

Considérons donc une spire A, B, C (fig. 29), en ce moment mise en court-circuit et dans laquelle le courant va, par conséquent, s'annuler. Un instant après, elle sera parcourue par un courant de sens inverse. Ce renversement du courant est extrêmement rapide. Supposons que les balais aient la largeur d'une touche; que la séparation isolante des touches soit d'épaisseur négligeable. Si l'induit fait 1000 tours par minute

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et s'il existe 100 touches au collecteur, la durée du court-circuit est d'environ

$$T_1 = \frac{60}{1000 \times 100} = \frac{1}{1667} \text{ de seconde.}$$

La spire possédant un coefficient de *selfinduction* $\mathfrak{L}$ et étant, pendant le court-circuit, parcourue par un courant décroissant, va, en vertu de la formule générale $e_s = -\mathfrak{L}\frac{di}{dt}$, se trouver le siège d'une force électromotrice d'induction $+\mathfrak{L}\frac{di}{dt}$, puisque di est négatif, c'est-à-dire le siège d'une force électromotrice dite aussi *tension de réactance*, de même sens que le courant finissant, donc de sens inverse à celui qui va devoir la traverser.

Il en résulte qu'au moment où la partie C de la spire, emportée par le mouvement de rotation de l'induit, quitte le balai (fig. 30), le courant d'intensité $\frac{I}{2}$ passant de ce balai vers la moitié droite de l'induit, rencontrant une force électromotrice inverse dans le fil ABC, se continue dans l'air sous forme d'étincelle jaillissant entre C et le balai.

Décalage et réglage des balais. — Que faut-il faire pour empêcher la production de ce phénomène ? Simplement avancer les balais dans le sens de la rotation de l'induit, jusqu'à amener la spire en commutation dans la seconde moitié du champ, dans la position voulue pour que la force électromotrice inverse qui y est induite soit telle, que non seulement elle annihile celle donnant naissance à l'extra-courant, mais encore qu'elle développe dans la spire le

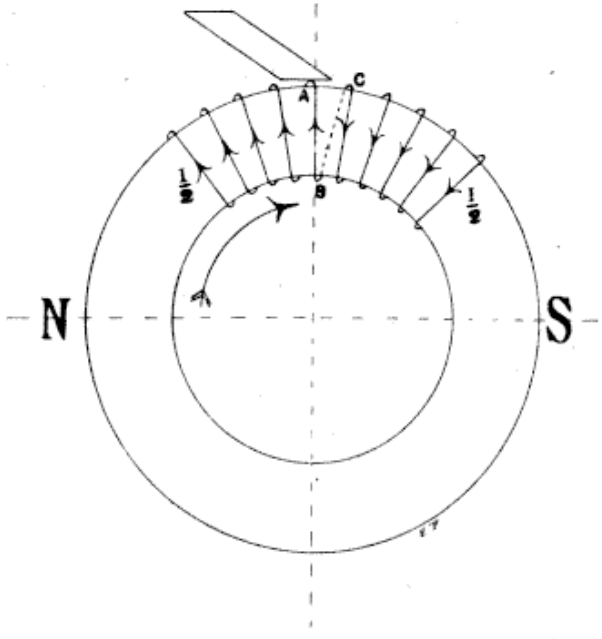


FIG. 30.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courant $\frac{I}{2}$ avec le sens qu'il a dans la seconde moitié de l'induit. Ce courant ayant le sens et l'intensité de celui passant dans la seconde moitié de l'induit, il n'y aura plus production d'étincelles au moment où C quittera le balai, la différence de potentiel entre A et C, réduite à la simple chute ohmique $\frac{R}{n}\frac{I}{2}$ (R résistance totale de l'enroulement induit, n nombre de spires), étant devenue très faible.

Le déplacement simultané des deux balais s'obtient aisément. Ils sont, à cet effet, fixés sur des bras faisant corps avec un collier isolant, tournant sur le palier adjacent au collecteur. Le collier peut être déplacé au moyen d'une poignée, ou d'un volant dans les grandes machines, et on peut le caler définitivement au moyen d'une vis, quand la position convenable est obtenue.

La figure 31 montre la réalisation d'un porte-balais. Le bras A,

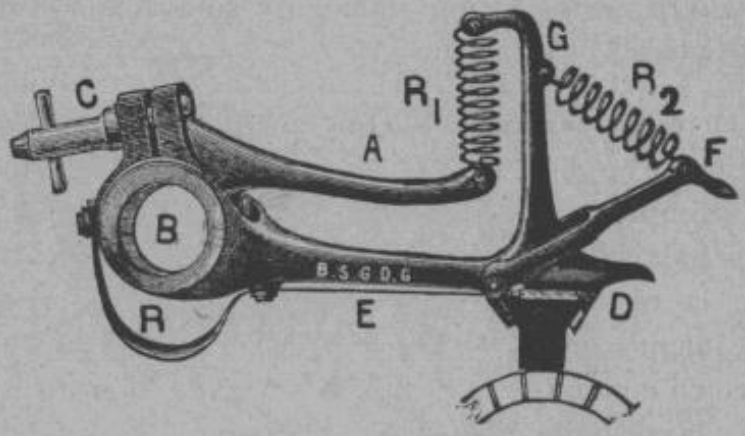


Fig. 31.

fixé et calé sur le palier au moyen de la vis C, appuie le charbon contre le collecteur par l'intermédiaire du ressort R_1. Le charbon est, d'autre part, calé dans son logement par le levier F qu'actionne le ressort R_2.

Les balais doivent presser sur le collecteur de manière à assurer un bon contact. Dans les machines fixes, cette pression est d'environ 110 à 120 gr par cm^2; dans les moteurs de traction, soumis à des chocs et des ressauts violents, elle peut aller jusqu'à 300 gr.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsque les balais sont métalliques, on les incline dans le sens de la rotation de l'induit ; s'ils sont en charbon et non perpendiculaires au collecteur, leur inclinaison doit être en sens inverse de la rotation, pour assurer une bonne surface de contact et réduire les trépidations. Généralement cependant, les balais en charbon se fixent perpendiculairement au collecteur, ainsi que le montre la figure 31.

Influence de la selfinduction des sections. — Plus la *selfinduction* d'une section sera importante, plus la tension de réactance $-\mathfrak{L}\frac{di}{dt} = +\frac{\mathfrak{L}\,I}{T}$ qui en résulte sera grande, et plus il faudra avancer les balais pour trouver le point de bonne commutation où il n'y a plus d'étincelles.

Le coefficient de selfinduction dépend du nombre de spires et de l'état du noyau en fer de la bobine (T. I, p. 211). Plus ce noyau est saturé, moins est grande la perméabilité et, par conséquent, plus le coefficient de selfinduction est réduit. Il y a donc avantage à employer des noyaux saturés et des sections présentant de faibles nombres de spires.

On a constaté par expérience que, si les proportions générales des dynamos sont bien choisies, de bons résultats sont obtenus avec une tension de réactance ne dépassant pas deux volts. Cette tension peut augmenter avec la puissance pour les machines à faible vitesse, mais dans ce cas, il ne faut pas aller au-delà de 5 volts, même pour des puissances dépassant considérablement 1000 kilowatts (1).

Réaction d'induit. — Nous allons maintenant étudier quelle influence le décalage des balais exerce sur le fonctionnement général de la machine.

Soient A B (fig. 32) la droite de commutation, A' B' la droite symétrique par rapport à la ligne neutre. Ces droites divisent les spires en deux groupes bien distincts :

(1) HOBART et ACHARD. *Génératrices électriques à courant continu*, p. 103. Dunod, Paris, 1908.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° Celles comprises dans les angles A O A′ et B O B′ qui développent des champs magnétiques en opposition avec le champ inducteur. Ce sont des *spires antagonistes*, dont l'effet est de réduire le champ inducteur, donc de diminuer la force électromotrice développée par la machine ;

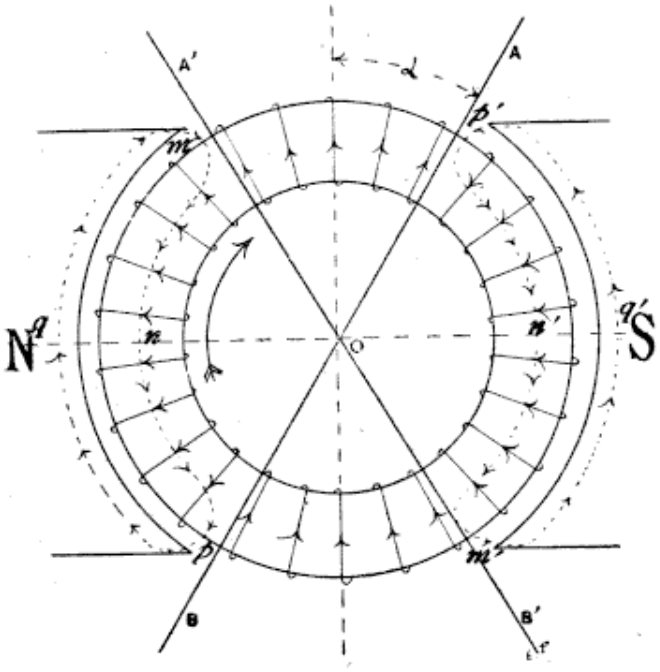


Fig. 32.

2° Les spires comprises dans les angles A′O B, A O B′, qui n'exercent aucun effet réducteur sur le champ principal engendré par les inducteurs. Mais elles développent des champs *transversaux*, dont les lignes de force suivent les trajets $m\,n\,p\,q$, $p'\,n'\,m'\,q'$, indiqués en pointillé. En m, de même qu'en m', le champ transversal s'ajoute au champ inducteur; en p et p', il s'en retranche, et la distribution du champ magnétique dans lequel se meut l'induit se trouve tout autre que ce qu'elle était à circuit ouvert. Le champ est, par *cette réaction de l'induit*, devenu asymétrique (fig. 33). Il est renforcé sous les *cornes polaires de sortie* m, m' et affaibli sous les *cornes d'entrée* p, p'.

Il en résulte que l'on doit avancer davantage les balais, pour placer la spire commutée dans un champ suffisamment dense. D'autre part, le parcours des lignes de force se trouve allongé, ce qui majore la réluctance de leur circuit et affaiblit d'autant l'effet des inducteurs.

Remarquons que, pour un décalage nul des balais, les champs transversaux atteignent leur valeur maximum. Au fur et à mesure que le décalage s'accentue, le nombre des spires transver-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sales diminue, tandis que celui des spires antagonistes augmente.

La position de calage des balais correspondant à la disparition des étincelles au collecteur se règle par tâtonnement. L'angle de calage nécessaire augmente naturellement, à mesure que le courant débité devient plus intense, puisque la réaction d'induit s'amplifie avec lui, di devenant plus considérable pendant le même temps dt.

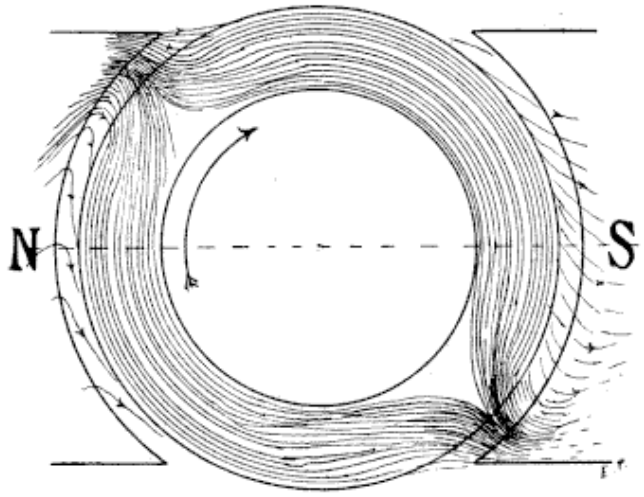


FIG. 33.

La condition de commutation sans étincelle est donc que le champ, sous les cornes polaires d'entrée, ne soit pas si affaibli par la réaction d'induit que l'on ne puisse trouver, dans cette région, un flux assez fort pour produire dans la bobine mise en court-circuit, le renversement de force électromotrice nécessaire.

Nous n'avons, dans ce qui précède, considéré que ce qui se passe au balai négatif. Il en est évidemment de même au balai positif, mais en sens inverse; les conclusions sont identiques.

Calcul de la force magnétomotrice à appliquer aux inducteurs pour compenser la réaction d'induit. — Appelons $\Sigma\mathfrak{R}$ la reluctance du circuit magnétique de la dynamo, $4\pi m i$ la force magnétomotrice développée par ses inducteurs et $\mathfrak{N}$ le flux total émis par l'inducteur à circuit ouvert

$$\mathfrak{N} = \frac{4\pi m i}{\Sigma\mathfrak{R}}.$$

Lorsque la machine débite, la réaction d'induit va non seulement modifier la disposition du flux traversant l'induit, mais le réduire, et nous devrons compenser cette réduction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Soient n le nombre total des spires de l'induit et α l'angle de décalage. Le nombre de spires antagonistes est, dans chaque moitié de l'induit,

$$\frac{n}{2} \cdot \frac{2\alpha}{\pi} = \frac{n\alpha}{\pi}.$$

Il en ressort une force contre magnétomotrice

$$4\pi \frac{n\alpha}{\pi} \frac{I}{2}$$

appliquée à chaque demi-section du circuit magnétique, soit la même force magnétomotrice, si on la reporte sur le circuit total, aux inducteurs par exemple. Il en résulte que la force magnétomotrice résultante appliquée au circuit total est

$$\mathcal{F}' = 4\pi \left(mi - \frac{n\alpha I}{2\pi} \right).$$

Le flux qui en résulte a pour valeur :

$$\mathfrak{N}' = \frac{\mathcal{F}'}{\Sigma \mathcal{R}},$$

$\Sigma \mathcal{R}$ représentant la somme des résistances magnétiques du circuit suivi par le flux.

Pour obtenir le même flux $\mathfrak{N}$ qu'à circuit ouvert, il sera donc nécessaire de majorer la force magnétomotrice des inducteurs, soit en enroulant plus de fil sur ceux-ci, soit en renforçant le courant qui les traverse, soit en augmentant les deux. Mais, quoi que l'on fasse, cette modification se traduira par une dépense supplémentaire. La réaction d'induit a donc des conséquences nuisibles; aussi convient-il de la réduire le plus possible. Nous étudierons dans la suite les moyens qu'on utilise à cet effet.

Diverses pertes dans l'induit. — **1° Courants de Foucault dans le noyau et dans le fil induit.** — Soumis aux mêmes influences inductrices que le fil induit, le noyau est le siège de forces électromotrices de même sens que celles engendrées dans celui-ci, ce qui, si l'on n'y mettait obstacle, entraînerait un échauffement exagéré, ayant pour corollaire une perte sensible d'énergie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour y remédier, on subdivise le noyau autant que possible, perpendiculairement au sens de la force électromotrice induite. Gramme a employé pour ses anneaux un rouleau en fil de fer verni. Mais cette disposition augmente la réluctance, vu l'intervalle non magnétique compris entre les fils, que doit traverser le flux à l'entrée et à la sortie du faisceau ; aussi utilise-t-on généralement des disques en fer, empilés dans le sens de l'axe de rotation et séparés par du papier ou un vernis isolant. De la sorte, les lignes de force restent dans le fer pendant tout leur trajet à travers le noyau.

Les conducteurs induits sont eux-mêmes le siège de courants de Foucault. Leur arête antérieure pénètre, en effet, la première dans le champ magnétique ; l'arête postérieure y entre ensuite et sort la dernière. Des forces électromotrices de mêmes sens et inégales y sont induites, d'où résulte une force électromotrice résultante tendant à faire parcourir localement le conducteur, particulièrement dans les arêtes, par un courant qui peut être très intense, à cause de la faible résistance du circuit dans lequel il se propage.

On évite cet écueil, en composant les conducteurs induits de faisceaux de fils isolés les uns des autres et tordus, de manière que la force électromotrice moyenne soit la même dans chacun de ces fils. On peut aussi se contenter de les constituer au moyen de fils de cuivre nus légèrement tordus. La résistance de leurs contacts est assez grande, en effet, pour s'opposer au passage d'un courant intense, vu la faiblesse des différences de potentiel mises en jeu.

Dans la construction actuelle des induits, on remédie à ce défaut, en logeant les conducteurs dans des rainures ménagées dans le noyau magnétique qui les supporte (induits dentés).

L'intensité des courants de Foucault est sensiblement proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine en vertu de la loi de l'induction. La chaleur qu'ils produisent i^2r croît donc comme le carré de cette vitesse.

Dans les bonnes machines de plus de 50 kw, on estime que la perte par courants de Foucault est de 1,5 % de leur puissance totale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Hystérèse. — Il se développe, dans le fer du noyau, par suite de l'hystérèse, une quantité de chaleur du même ordre que celle produite par les courants de Foucault. Considérons un tronçon élémentaire ABCD (fig. 34) du noyau, situé dans le premier quadrant sur la ligne neutre théorique et limité par deux plans infiniment rapprochés passant par le centre. Dans la position considérée, ce tronçon se trouve le siège d'une induction maximum $\mathfrak{B}_m$ et le flux le traverse de gauche à droite, de AD vers BC; 180° plus loin, il est soumis à la même induction, mais le flux le traverse en sens inverse, de BC vers AD ; enfin, un demi-tour plus loin, il se retrouve dans les mêmes conditions qu'en premier lieu, ayant ainsi parcouru un cycle magnétique complet. C'est ce qu'on appelle l'hystérèse tournante. Ce raisonnement peut s'appliquer à tous les tronçons élémentaires en lesquels se décompose le noyau de l'induit, de sorte que le volume entier de celui-ci parcourt un cycle magnétique complet pendant une révolution. Nous avons vu, (T. I, p. 152), comment on peut calculer, par la formule de Steinmetz, l'énergie perdue en chaleur par ce processus.

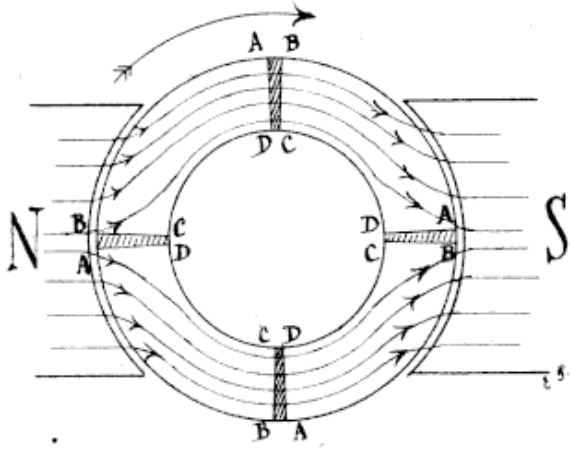


FIG. 34.

3° Perte par effet Joule dans l'enroulement. — Si n est le nombre de spires enroulées sur l'anneau et R leur résistance totale, la résistance comprise entre les balais sera (résistance combinée de deux dérivations de $\frac{R}{2}$) :

$$R_e = \frac{1}{\sum \frac{1}{r}} = \frac{1}{2 \cdot \frac{1}{\frac{R}{2}}} = \frac{1}{2 \cdot \frac{2}{R}} = \frac{R}{4} .$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si I est le courant total débité par la machine, la perte par effet Joule dans l'induit sera la somme des pertes dans les deux moitiés de l'induit, soit

$$\frac{R}{2} \cdot \frac{I^2}{4} + \frac{R}{2} \cdot \frac{I^2}{4} = \frac{R}{4} I^2 = R_e I^2.$$

Donc, la puissance dépensée en chaleur dans l'induit, est exprimée par le produit de la résistance *comprise entre les balais*, par le carré de l'intensité du courant total qui les traverse.

Exemple. — La résistance totale des spires d'un anneau bipolaire est de 1,12 ohm. L'anneau débite 25 ampères, quelle est la perte par effet Joule ?

$$\frac{1,12}{4} \cdot 25^2 = 175 \text{ watts.}$$

Dans la pratique, on classe souvent les pertes d'énergie se produisant dans les dynamos en deux catégories : celles par effet Joule, dites aussi *dans le cuivre* et celles par courants de Foucault et hystérèse, dites aussi *dans le fer*.

Enroulements divers. — Le dispositif que nous venons de voir constitue l'enroulement Gramme bipolaire classique. Il présente un certain nombre de variantes. On peut enrouler, non pas une couche de fil, mais deux superposées. Toutefois, cette disposition est moins bonne au point de vue du refroidissement de l'induit. Dans le bobinage Wodicka, deux spires diamétralement opposées sont réunies en série. Ce dispositif a pour but de parer aux inégalités que pourraient présenter entre elles les deux moitiés du champ, par suite de différence de perméabilité, dispersion inégale, etc.

Induits multipolaires à anneau en quantité. — Prenons comme exemple la machine tétrapolaire (fig. 35), dans laquelle nous rencontrons 4 pôles successivement de noms contraires, symétriquement distribués sur la périphérie de l'anneau. Les champs se disposent comme l'indique la figure.

Appliquons la règle de Maxwell. Nous voyons que les forces

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électromotrices se développent dans les spires successives suivant la direction des flèches. L'induit est subdivisé en quatre parties, égales par raison de symétrie et placées en opposition.

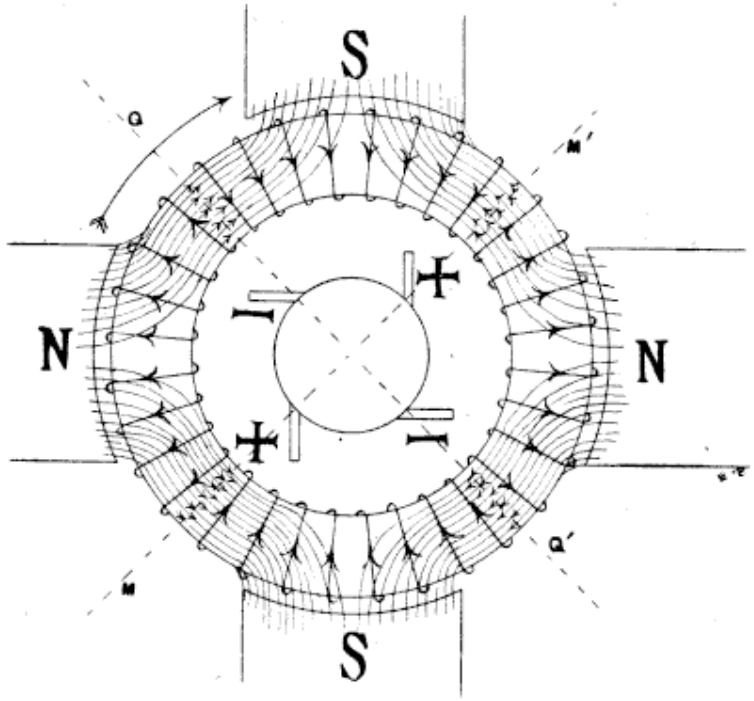


Fig. 35.

Les spires sont encore raccordées à un collecteur et, pour capter les courants qui tendent à se produire, il est aisé de voir qu'il faudra 4 balais placés suivant les droites de maximum et minimum de potentiel M M'. Q Q'. En outre, les deux balais + devront être réunis entre eux, ainsi que les deux balais —.

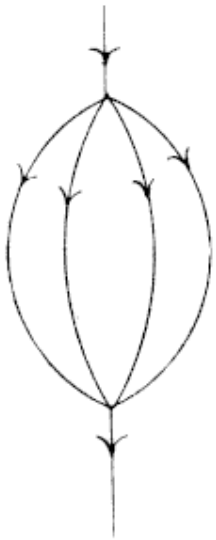


Fig. 36.

En somme, cet induit tétrapolaire correspond exactement à l'assemblage de deux induits bipolaires réunis en quantité. Si n est le nombre total de spires de l'anneau et R leur résistance totale, nous aurons 4 fois $\frac{n}{4}$ spires de résistance $\frac{R}{4}$ réunies en quantité (fig. 36). Puisque les 4 résistances sont mises

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en dérivation, la résistance combinée de l'ensemble n'est que :

$$\frac{1}{\sum \frac{1}{r}} = \frac{1}{4 \cdot \frac{1}{\frac{R}{4}}} = \frac{R}{16}.$$

Reprenons l'exemple étudié précédemment. Supposons que ce soit le même anneau, tournant avec la même vitesse, que nous enveloppons de 4 pôles égaux à ceux de la machine bipolaire. Au lieu de $\frac{n}{2}$ spires en tension, nous n'en avons plus que $\frac{n}{4}$. Mais comme la traversée du champ se fait en deux fois moins de temps, la force électromotrice de la machine reste la même.

Si donc l'induit débite le même courant que précédemment, la chaleur qu'il dégagera par effet Joule ne sera plus que $\frac{R}{16} I^2$ au lieu de $\frac{R}{4} I^2$. Elle s'élèvera seulement au $\frac{1}{4}$ de ce qu'elle était dans la bipolaire, et nous aurons, dans ces conditions, amélioré le rendement de notre machine.

Mais nous pouvons lui faire produire davantage. Le courant se subdivisant entre 4 circuits au lieu de 2, pourra sans inconvénient être doublé en maintenant partout la même densité de courant et l'énergie disponible sera doublée aussi. Avec 6 pôles, elle serait triplée et ainsi de suite. Ceci montre comment on est amené aux dynamos multipolaires, quand on aborde les grandes puissances et qu'il faut réduire le plus possible l'encombrement. On y est d'ailleurs amené également par la nécessité de loger sur l'induit de très gros fils, s'il s'agit de dynamos à grand débit, ou de très nombreux fils si l'on doit produire de hauts voltages.

Comme dans la machine bipolaire, la réaction d'induit oblige d'avancer les balais dans le sens de la rotation.

Ainsi disposée, la machine tétrapolaire exige 4 balais. Avec 6 pôles il en faudrait 6, calés à 60° l'un de l'autre ; d'une manière générale avec $2p$ pôles, il faut $2p$ balais calés à $\frac{360°}{2p}$. Au début de la construction des dynamos on a cherché à éviter cette multiplicité des balais.

Dispositif Mordey. Dans le dispositif Mordey (fig. 37), on

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

relie invariablement les lames du collecteur symétriquement placées par rapport aux pôles de même nom. Il n'est dès lors plus nécessaire que de deux balais fixés : à 90° si la machine est tétrapolaire ; à 60° si elle est hexapolaire, etc. Toutes ces liaisons constituent le connecteur (fig. 37).

Le dispositif Mordey présente les inconvénients d'être compliqué et de donner lieu à une perte de chaleur par effet Joule

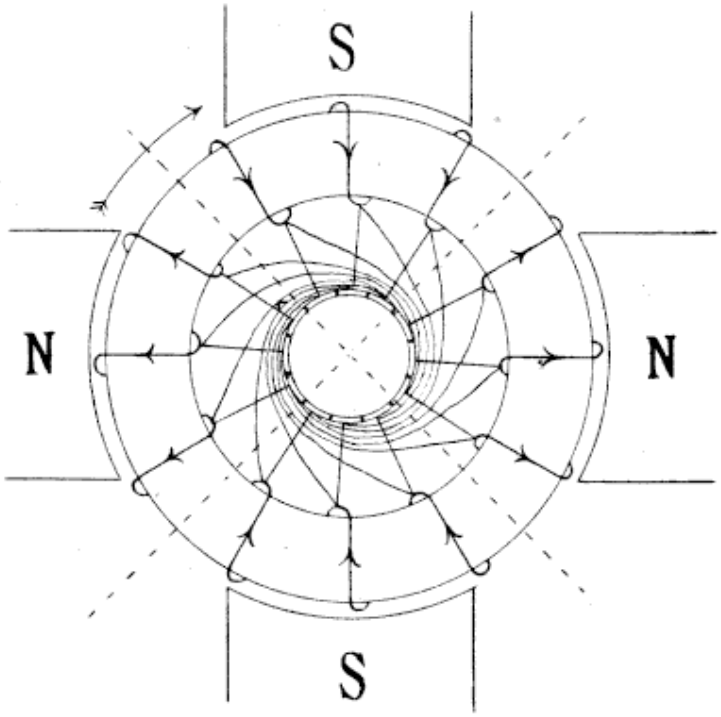


Fig. 37.

dans les fils de connexion. Enfin, des conducteurs à potentiels très différents s'y croisent, ce qui expose à des courts-circuits.

Balais multiples. Dans les grandes dynamos enroulées en quantité, on est amené à multiplier le nombre des balais, pour ne pas dépasser dans ceux-ci une densité de courant trop élevée qui les échaufferait d'une manière exagérée. On fixe ces balais côte à côte, par deux, trois, quatre et même davantage, portant sur les mêmes lames du collecteur, ce qui permet le remplacement, le nettoyage ou le réglage en marche d'un quelconque d'entre eux, et l'on rencontre autant de lignes de balais que de pôles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Connexions équipotentielles. Avec les enroulements en quantité, il est nécessaire que tous les flux absorbés par l'induit aient la même valeur et que l'induit soit bien centré, sinon les forces électromotrices des groupes de spires concourantes ne sont pas égales. Il en résulte des courants de circulation entre les divers circuits dérivés par l'intermédiaire des balais (fig. 38) dont le fonctionnement peut devenir défectueux.

On y remédie en réunissant, par des anneaux conducteurs isolés, des points de l'enroulement qui sont toujours au même potentiel. Dès lors, les courants de circulation ne passant plus par les balais, le fonctionnement de ceux-ci se trouve amélioré. On remarquera que, dans la machine tétrapolaire par exemple (fig. 38), le courant local traversant l'induit résulte de la différence de quatre forces électromotrices égales deux à deux, mais dont une couple peut différer de l'autre.

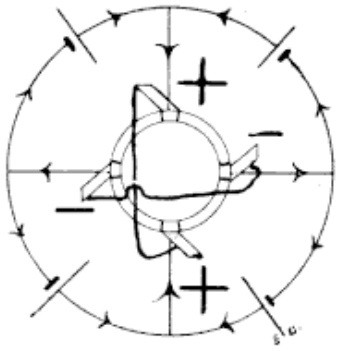


Fig. 38.

Les connexions équipotentielles ne sont donc rien autre que les connexions Mordey, mais établies sans supprimer aucune paire de balais.

Induits multipolaires en anneau en tension. — On évite également et d'une manière complète l'effet de la dissymétrie des flux absorbés par l'induit, tout en atteignant plus aisément les hauts voltages, en adoptant un enroulement dans lequel les bobines sont réunies en tension, suivant deux séries couplées en parallèle, comme dans les induits bipolaires.

Appelons $2p$ le nombre des pôles. Partant d'une bobine placée sur un axe neutre, on passe dans les p bobines semblablement situées, pour aboutir à la bobine suivante ou précédente, se trouvant par exemple sous l'influence d'un pôle nord ; on raccorde encore les p bobines semblablement situées sous les pôles nords suivants et ainsi de suite, en avançant d'une bobine par tour. Il est évident que, dans ces conditions, en allant jusqu'au bout de l'enroulement, on aura connecté une série de bobines, toutes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

influencées par les pôles nords, pour rencontrer ensuite une série égale (par raison de symétrie) de bobines influencées par des pôles suds et l'on trouvera, comme dans l'induit bipolaire, l'ensemble des bobines partagé en deux séries égales, sièges de forces électromotrices égales et opposées. On n'aura que deux circuits dérivés entre ces bobines. Ceux-ci, au nombre de deux, se trouvent d'ailleurs sur deux lignes neutres consécutives, le choix des lignes neutres étant indifférent.

Si n est le nombre de bobines, D le diamètre extérieur de l'induit, la longueur périphérique d'induit correspondant à une bobine est

$$l = \frac{\pi D}{n}.$$

D'après le mode de jonction adopté, il est évident que l'on aura, en appelant y le nombre de bobines sautées chaque fois pour effectuer un raccord

$$py\,l = n\,l \pm l$$

ou

$$y = \frac{n \pm 1}{p}.$$

Le signe + correspond au cas où la longueur yl est plus grande que la longueur séparant les axes de deux pôles consécutifs, dite *distance polaire* ; le signe — au cas où elle est plus petite.

Si par exemple $n = 25$ et s'il s'agit d'une machine tétrapolaire, $p = 2$. On tire de la formule précédente : $y = 13$ ou 12. Si $n = 7$, $y = 4$ ou 3. Dessinons un tel enroulement ne comportant que 7 spires et avec $y = 4$. Le nombre de 7 spires est très faible; en pratique il ne se rencontre pas; mais il nous permettra de suivre aisément l'enroulement d'un bout à l'autre.

Divisons (fig. 39) la circonférence extérieure en 7 parties égales; traçons les 7 spires en indiquant le sens des forces électromotrices développées dans la position qu'elles occupent. Raccordons ensuite la spire 1 à la spire $1 + 4 = 5$, la spire 5 à la spire $5 + 4 = 9 - 7 = 2$; la spire 2 à $2 + 4 = 6$; la spire 6 à $6 + 4 = 10 - 7 = 3$, etc en établissant chaque fois un raccord vers le collecteur. Nous voyons que l'induit se trouve effectivement subdivisé en deux séries montées en dérivation

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'une par rapport à l'autre et comprenant, la première les spires 1, 5, 2; la seconde les spires 4, 7, 3, 6 dont la dernière, sensiblement sur une ligne neutre, ne développe pas de force électromotrice.

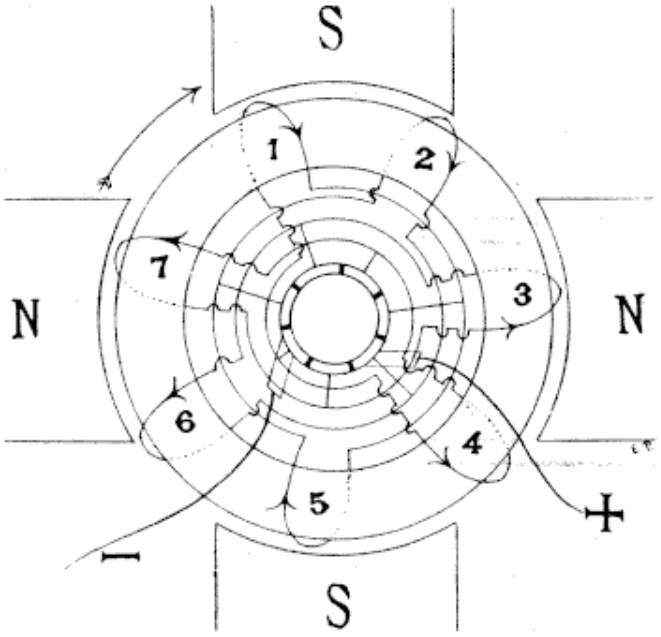


Fig. 39.

Les deux balais sont calés à angle droit. Par raison de symétrie, quand l'un touche le milieu d'une lame, l'autre en touche deux, c'est-à-dire met deux spires en court-circuit. Mais, à condition que le nombre de spires soit suffisamment élevé, la différence d'une spire passant d'ailleurs aux environs de la ligne neutre, entre les enroulements situés de part et d'autre des balais, n'a pas d'importance pratique.

Induits bipolaires en tambour. — Si, au lieu de la règle de Maxwell, on applique aux conducteurs d'une spire la règle de Faraday, on constate aisément que, seuls, les conducteurs externes (fig. 40) jouent un rôle utile au point de vue de la production de la force électromotrice. Le flux entre en effet dans le noyau par sa surface extérieure. Il en sort de même, et une très faible partie traverse l'espace d'air intérieur de l'induit. Les deux conducteurs, *a* extérieur et *b* intérieur de la

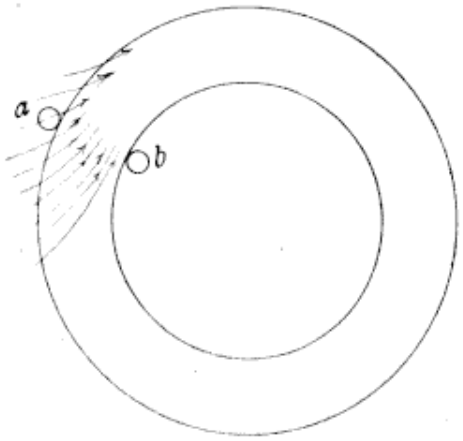


Fig. 40.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

spire (fig. 41), sont donc le siège de forces électromotrices de même sens, venant en déduction l'une de l'autre dans la boucle. Les conducteurs rayonnant *c* et *d* ne sont le siège d'aucune force électromotrice, vu qu'ils ne coupent pas de lignes de force.

Il résulte des considérations précédentes que le conducteur *b* est doublement nuisible en raison 1°, de la force contre-électromotrice qu'il développe et 2°, de sa résistance provoquant une perte d'énergie par effet Joule.

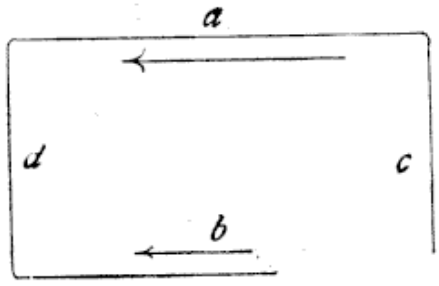


Fig. 41.

C'est pour éviter ces inconvénients que l'on a imaginé l'enroulement en tambour constitué dans le principe comme suit : le noyau, claveté sur l'axe, a la forme d'un cylindre allongé composé de disques en fer isolés, enfilés sur l'arbre de la machine et assujettis sur celui-ci. Il se termine par des disques en matière isolante portant en saillie des expansions destinées à classer les fils. Ceux-ci, enroulés suivant les génératrices du cylindre, se raccordent à un collecteur du même genre que celui de l'anneau Gramme. Prenons le conducteur *a* (fig. 42) raccordé à la lame A du collecteur. Il passe à l'extrémité droite du cylindre, de manière à suivre la génératrice diamétralement opposée et à revenir en *b*. Le tambour tourne entre les deux expansions polaires. Donc, lorsque *a* coupe le champ dans un sens, *b* le coupe en sens contraire, c'est-à-dire que les forces électromotrices développées sont de sens inverses et s'ajoutent dans la spire. Raccordons *b* à la lame suivante B du collecteur, ou enroulons plusieurs spires avant de le raccorder. De là, nous partirons avec une nouvelle spire ou un nouveau groupe de spires, et ainsi de suite. Il est clair que le tambour sera partiellement recouvert

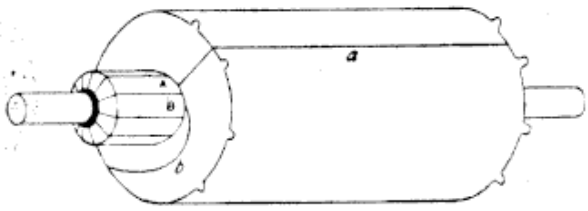


Fig. 42.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de fil sur toute sa circonférence, alors que la moitié seulement des lames du collecteur seront raccordées, celles-ci étant en nombre égal à celui des spires. Pour relier la seconde moitié des lames du collecteur, on posera une nouvelle couche de fil, soit superposée à la première, soit mieux adjacente, si l'on a eu soin de ménager à côté de chaque conducteur un espace disponible.

Il est facile de voir que, pour un même volume, le nombre de *spires* d'un tambour est la moitié de celui d'un anneau, de mêmes dimensions, soumis à la même induction et donnant la même force électromotrice.

Les fils des bases du tambour contournent l'arbre et se superposent en formant deux calottes dites *chignons* de l'induit, que l'on évite dans les fortes machines, en prolongeant les conducteurs longitudinaux et en les raccordant au moyen de lames courbes disposées dans les plans parallèles aux faces du tambour et appelées vols d'oiseaux à cause de leur forme. Il est nécessaire d'enrouler, autour de la partie cylindrique, des frettes formées de fil d'acier ou de bronze, afin d'empêcher le soulèvement des conducteurs par la force centrifuge.

A titre d'exemple, décrivons l'enroulement d'un tambour composé de 7 spires avec 7 lames au collecteur (fig. 43). Du fil 1, raccordé à la lame 1 du collecteur qui se trouve vis-à-vis, on passe au fil diamétral $8 = 1 + 7$, d'où une connexion courbe raccorde ce dernier à la deuxième lame du collecteur. De là une connexion droite conduit au fil 3 continué diamétralement par le fil $3 + 7 = 10$; nouvelle connexion courbe jus-

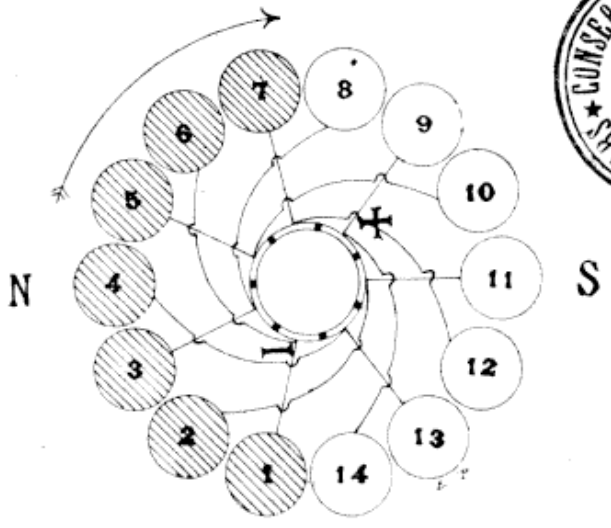


FIG. 43.

CONSERVATOIRE Nal DES ARTS ET METIERS Bibliothèque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qu'à la troisième lame, connexion sur 5, 12, 7 et ainsi de suite. Quand on est arrivé à 7, l'induit est complètement embrassé par le fil, tandis que la moitié seulement des lames du collecteur sont raccordées. On continue donc par la seconde couche, ici adjacente à la première. L'induit vient se fermer par une connexion courbe, à la connexion droite de départ de la lame 1.

Les sections hachurées sont celles où le courant va du lecteur au papier.

Remarque I. En nous reportant à la figure 42, nous verrons aisément que les spires du tambour sont, en somme, constituées par de véritables *cadres*, dont l'axe de figure coïncide avec l'axe du noyau cylindrique de l'induit, symétriquement distribués sur celui-ci et raccordés les uns aux autres ainsi qu'au collecteur, sur un de leurs côtés latéraux. Nous conviendrons d'appeler *entrée* d'un cadre le conducteur *a* (fig. 42) d'*aller*, et *sortie*, le conducteur *b* de *retour* de la spire.

Remarque II. Supposons donc l'enroulement de l'induit constitué par un certain nombre de cadres embrassant uniformément le noyau. *On ne pourra relier la sortie d'un cadre à l'entrée du cadre adjacent* (fig. 44) et ainsi de suite, car dans l'enroulement ainsi formé, les forces électromotrices dans les spires successives s'additionneraient constamment. On sera donc forcé de sauter chaque fois un cadre et ainsi, le cadre *suivant* dans l'enroulement, sera celui situé deux conducteurs plus loin que l'entrée du cadre considéré.

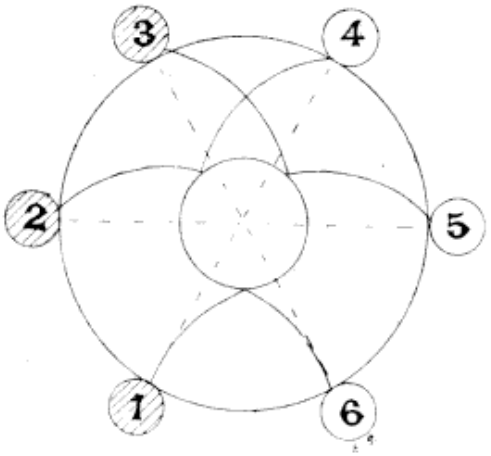


Fig. 44.

En outre, si le nombre de cadres était pair, l'induit viendrait se fermer prématurément au bout du premier cadre (bout diamétralement opposé au premier conducteur et de numéro

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

impair). Donc *le nombre de cadres devra être impair, ou le nombre des conducteurs double d'un nombre impair.*

Enroulements imbriqués ou bouclés. — Dans l'enroulement de la figure 43, partant du premier conducteur, on atteint le conducteur conjugué de ce cadre par un raccordement sur la face arrière, en parcourant une distance périphérique égale à 7 fois la distance l séparant deux conducteurs successifs. C'est ce que l'on appelle le *pas arrière*. Désignons-le par y_2, et soit n le nombre des conducteurs séparés l'un de l'autre de l. Dans le cas particulier considéré,

$$y_2 l = \frac{n}{2} l \text{ ou } y_2 = \frac{n}{2} \qquad (1)$$

d'axe en axe.

Si le raccordement n'atteignait pas le diamètre, on aurait

$$y_2 l = \left(\frac{n}{2} - a\right) l \text{ ou } y_2 = \frac{n}{2} - a \qquad (2)$$

Continuant à tourner dans le même sens autour de l'induit, on raccorde sur sa face avant, la sortie du premier cadre à l'entrée du suivant, située deux conducteurs plus loin que l'entrée du premier, au moyen d'une connexion dont la longueur dite *pas avant* (côté du collecteur)

$$y_1 l = \left(\frac{n}{2} + 2\right) l. \text{ On en tire } y_1 = \frac{n}{2} + 2 \qquad (3)$$

et d'une manière générale

$$y_1 = a + \frac{n}{2} + 2 \qquad (4)$$

En additionnant les relations (1) et (3), (2) et (4) on obtient la formule de ce genre d'enroulement

$$y_1 + y_2 = n + 2 \qquad (5)$$

ou

$$n = y_1 + y_2 - 2 \qquad (6)$$

Développons sur un plan la surface de l'induit en hachurant les 7 conducteurs situés en face du pôle nord, qui traversent un champ magnétique dirigé de l'extérieur vers eux. Indiquons par des flèches les directions des forces électromotrices. La

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

barre 1 est raccordée à la barre $1 + 7 = 8$ par une connexion arrière; la barre 8 à la barre $8 + 9 = 17 - 14 = 3$ par une connexion avant, avec liaison vers une lame du collecteur et ainsi de suite. Nous voyons que les divers cadres empiètent régulièrement l'un sur l'autre, formant ce que l'on appelle un enroulement *imbriqué*. L'enroulement imbriqué est donc obtenu quand *on relie la fin d'un cadre au commencement du suivant.*

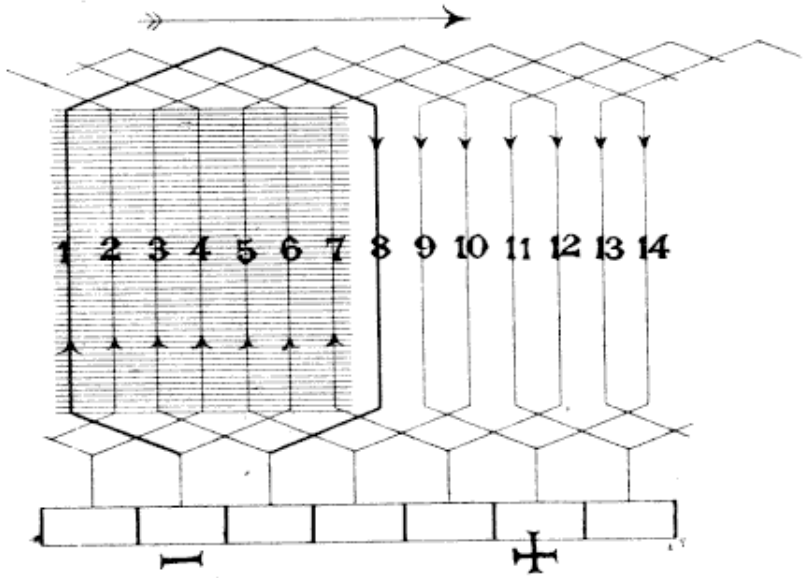


FIG. 45.

Cherchons à quelles conditions numériques les nombres n, y_1 et y_2 doivent satisfaire. *n est toujours pair*, puisque l'induit est constitué par un nombre entier de cadres possédant chacun un nombre pair de conducteurs, et nécessairement *double d'un nombre impair* comme nous l'avons vu.

L'équation (6) $n = y_1 + y_2 - 2$ ou $n + 2 = y_1 + y_2$ montre que la somme $y_1 + y_2$ doit nécessairement être paire, c'est-à-dire que y_1 et y_2 doivent être ou tous deux pairs ou tous deux impairs. S'ils étaient pairs, en partant de la barre 1, on ne trouverait jamais que des nombres impairs, car en ajoutant des nombres pairs à un nombre impair, les sommes successives sont toutes impaires et l'induit se fermerait, sans qu'on ait utilisé aucune

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

barre d'ordre pair. Par conséquent y_1 *et* y_2 *doivent être tous deux impairs.*

Enfin de la même équation (6), nous tirons

$$\frac{n}{2} + 1 = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

ce qui montre que

$$\frac{y_1 + y_2}{2} \text{ et } \frac{n}{2}$$

sont nécessairement premières entre elles.

Les conditions sont donc : *n pair, double d'un nombre impair,* y_1 *et* y_2 *impairs,* $\frac{y_1 + y_2}{2}$ *première avec* $\frac{n}{2}$.

Enroulement ondulé. Si la fin d'un cadre est reliée à

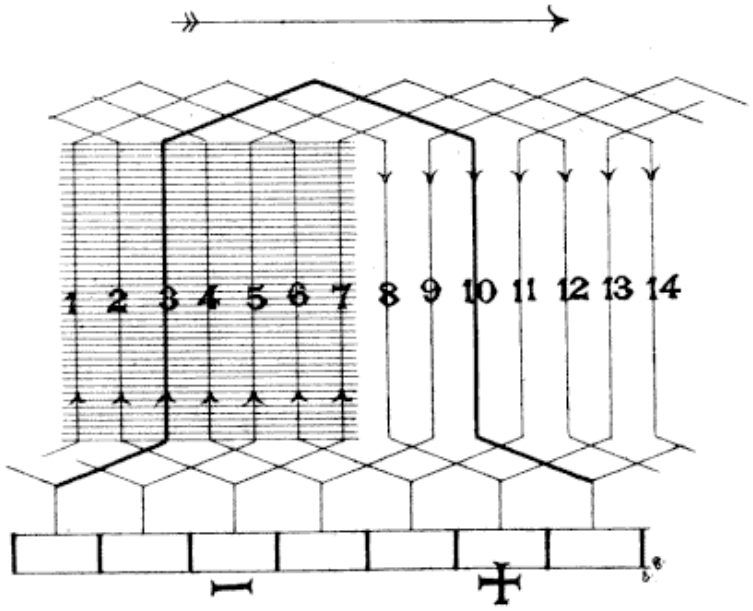


Fig. 46.

l'origine du précédent (situé deux conducteurs en avant), c'est-à-dire si

$$y_1 = \frac{n}{2} - 2$$

ou

$$y_1 = a + \frac{n}{2} - 2$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

y_2 étant encore égal à $\frac{n}{2}$ ou $\frac{n}{2} - a$, on aura pour la formule de ce genre d'enroulement

$$y_1 + y_2 = n - 2 \qquad (7) \quad \text{ou } n = y_1 + y_2 + 2 \qquad (8)$$

L'enroulement *ondulé* (fig. 46 obtenue d'une façon analogue à la figure précédente) *est donc réalisé quand on relie la fin d'un cadre à l'origine du précédent.*

Remarque. En raisonnant comme précédemment, on trouverait que les nombres n, y_1, y_2, $\frac{y_1 + y_2}{2}$ et $\frac{n}{2}$ doivent, dans les enroulements ondulés, satisfaire aux mêmes conditions que dans les enroulements imbriqués.

Répartition du potentiel au collecteur et dans les conducteurs voisins. — Si nous partons de la lame inférieure du collecteur en suivant la connexion rectiligne, fig. 43, puis la section hachurée, nous constatons que le potentiel s'élève. Si nous partons de la même lame par la connexion courbe, nous trouvons une force électromotrice orientée de la même manière et qui va également en augmentant. Les deux courants divergents qui partent de la lame du dessous (balai négatif), se rejoignent aux lames supérieures (balai positif), et nous voyons que la répartition du potentiel est analogue à celle que l'on rencontre dans le collecteur de l'anneau. Elle n'est pas *identique*, parce que les conducteurs raccordés n'étant pas successifs comme dans l'anneau, les variations de forces électromotrices y sont plus accentuées.

Au point de vue des fils eux-mêmes, nous trouvons une différence désavantageuse vis-à-vis de l'anneau. Dans celui-ci, le potentiel croît régulièrement de spire à spire ou, ce qui revient au même, de fil à fil. Ici, deux conducteurs voisins peuvent être soumis à des différences de potentiel très grandes, ce qui augmente les chances de court-circuit. C'est le cas pour les fils 1 et 14. Il en est de même pour les fils 7 et 6, entre lesquels existe toute la différence de potentiel que la machine est susceptible de donner, le balai positif mettant en court-circuit, par raison de symétrie, les lames du collecteur raccordées aux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conducteurs 7 et 8 On remarquera que, par suite de la rotation de l'induit, toutes les paires de conducteurs se trouvent successivement dans ce cas deux fois par tour.

Ceci est surtout précaire en cas de rupture brusque du circuit, vu les grandes forces électromotrices qui peuvent y être engendrées par les réactions de *selfinduction*.

Décalage des balais. — De même qu'avec l'anneau et pour les mêmes raisons, les balais doivent être avancés dans le sens du mouvement.

Calage des balais perpendiculairement à la ligne neutre. — Nous venons de voir que pour ramener les deux extrémités d'un cadre suivant deux lames adjacentes du collecteur, on est obligé d'établir un raccord suivant un diamètre. On rend parfois les jonctions symétriques par rapport aux cadres consécutifs en les rattachant à des lames situées à égale distance de ceux-ci.

C'est ce qui se trouve réalisé dans l'enroulement Edison représenté figure 47.

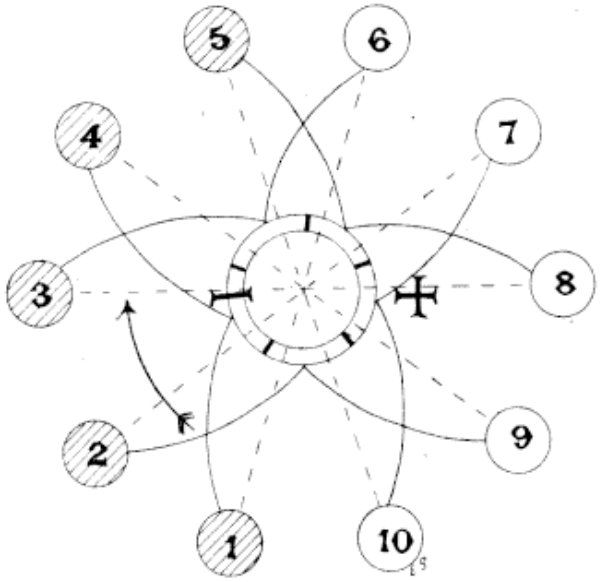


FIG. 47.

Il correspond, en somme, à l'enroulement précédent, dont on aurait fait tourner de 90° le collecteur. Il en résulte que les balais devront être calés à 90° de la position qu'ils occupaient précédemment, c'est-à-dire perpendiculairement à la ligne neutre ou suivant la ligne des pôles.

Spires raccordées suivant les cordes. — Au lieu de réunir les fils induits par des conducteurs diamétraux, il est possible de les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

joindre par des cordes, à condition que l'arc sous-tendu soit plus grand que celui des pièces polaires, afin d'éviter que les spires ne soient le siège de forces électromotrices de mêmes sens dans les deux conducteurs opposés, donc de sens contraires dans les spires et venant par conséquent en déduction l'une de l'autre.

Réaction d'induit. — Par suite du décalage des balais, les conducteurs se partagent, comme dans l'anneau, en deux groupes : d'une part, ceux dont l'action est antagoniste, compris dans le double de l'angle de calage des balais; d'autre part, ceux dont l'effet magnétique est de déformer le champ, sans agir sur son intensité.

On peut aisément s'en rendre compte. Considérons un induit de 7 cadres, fig. 48, et supposons les balais décalés suivant la ligne AB. Menons la droite symétrique A'B' et hachurons, comme précédemment, les conducteurs dans lesquels le courant va du lecteur vers le papier ; ils sont tous situés à gauche de AB, comme nous savons.

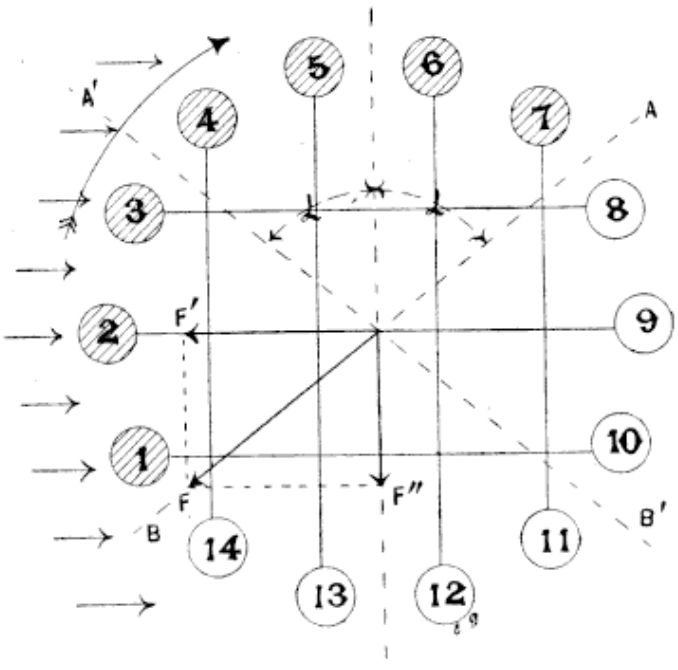


FIG. 48.

Cela fait, quel que soit le mode de raccordement que nous adoptions pour réunir vers l'avant et vers l'arrière les conducteurs actifs, si, par cette opération, nous ne changeons pas la direction et l'intensité des courants qui les traversent, leur effet magnétique sur le noyau n'est pas modifié.

Supposons donc que nous raccordions à chaque instant sur les faces du tambour les conducteurs 4, 5, 6 et 7 avec 14, 13, 12 et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

11; les conducteurs 1, 2, 3 avec 10, 9, 8. Nous formons deux groupes : le premier dont les spires sont antagonistes, puisqu'elles tendent à envoyer un flux opposé au flux inducteur, tandis que les autres développent un flux à angle droit, tendant simplement à déformer le flux inducteur.

Comme on peut aussi supposer les conducteurs 1, 2, 3, ... 7 raccordés à 14, 13, 12, ... 8. on remarque que l'effet magnétique de l'induit consiste à développer un flux F *suivant la ligne des balais*. Ce flux peut se décomposer en deux autres : l'un F' dirigé à l'encontre du flux inducteur, c'est le flux antagoniste; l'autre F'' dirigé à angle droit, c'est le flux transversal.

Induits multipolaires en tambour enroulés en quantité. — ENROULEMENTS ONDULÉS. — Prenons comme exemple un induit tétrapolaire de 16 barres. Traçons (fig.49) 16 droites parallèles équidistantes, qui représenteront, comme précédemment, les conducteurs couchés suivant les génératrices de l'induit, dont la

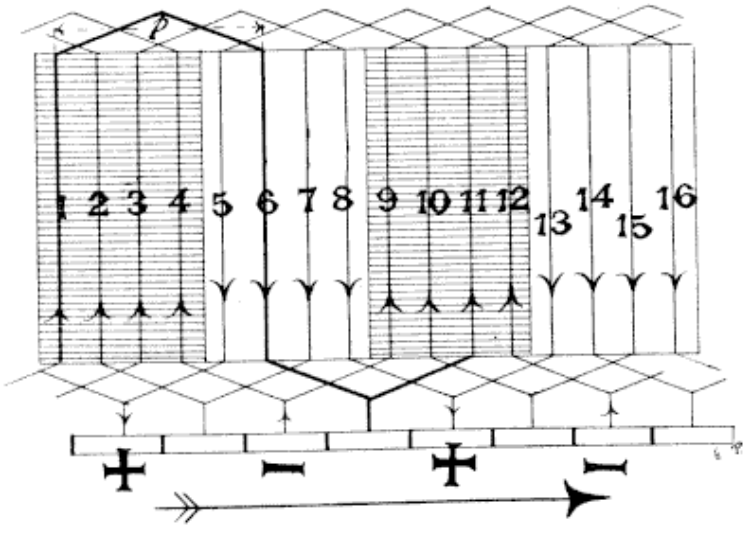


FIG. 49.

surface extérieure est supposée développée dans un plan. Numérotons-les et admettons que les quatre premières et les barres 9 à 12 soient en face d'un pôle nord envoyant son flux du lecteur vers le papier. Hachurons-les pour les distinguer et supposons que l'induit se déplace de la gauche vers la droite. Traçons sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les conducteurs les flèches indiquant le sens des forces électromotrices développées par la translation de l'induit.

Raccordons la barre 1 par la partie supérieure avec la barre $1 + 5 = 6$ pour former le premier cadre. La longueur 5 constituera le *pas arrière* de l'enroulement. Relions maintenant par le bas la barre 6 avec la barre $6 + 5 = 11$, pour aller rejoindre la spire suivante, en ayant soin de raccorder cette jonction à une lame du collecteur. La nouvelle longueur 5 représente le *pas avant* de l'enroulement.

Partons de nouveau du dessus de la barre 11 pour rejoindre la barre 16, puis par le dessous de 16 à 5, en nous raccordant au collecteur et ainsi de suite, pour revenir à la barre de départ 1 par une connexion inférieure. Nous avons réalisé un *enroulement ondulé à pas égaux*. Chaque raccordement inférieur est connecté à une lame du collecteur.

La position des balais, deux positifs et deux négatifs, se délimite aisément par les barres vers lesquelles les courants convergent, ou desquelles ils divergent.

On serait arrivé à un enroulement tout à fait analogue, en adoptant le pas 3 (fig. 50).

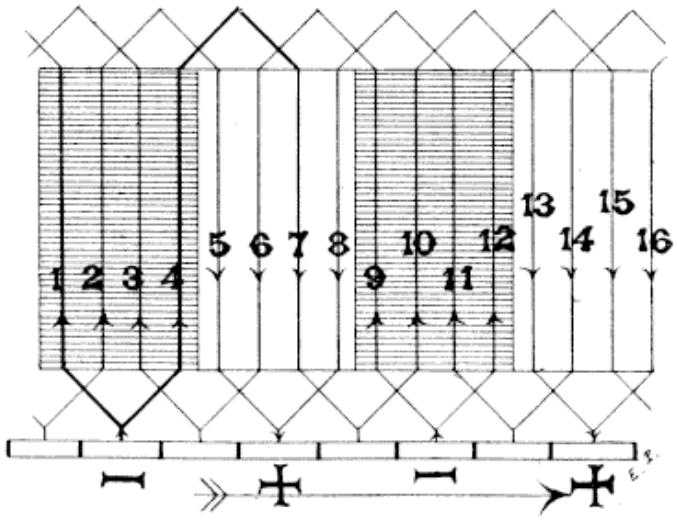


FIG. 50.

En allant des balais — aux balais +, on voit que les quatre quarts de l'induit se trouvent réunis en quantité. Chaque quart

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constitue un tout complet et en quelque sorte un enroulement indépendant.

Le pas ne peut être quelconque ; pour ne point retomber sur la même barre, avant d'avoir utilisé tous les conducteurs, il faut nécessairement qu'il soit *un nombre premier* avec celui des conducteurs.

Supposons, en effet, que le pas soit 4 avec $n = 16$. En partant de la barre 1, après 4 raccordements, nous reviendrions à la barre $1 + 4 \times 4 = 17 - 16 = 1$. D'une façon générale, si y et n avaient un facteur commun a, de manière que $y = ab$ et $n = ac$, après le passage par $n/a = c$ barres, nous retomberions sur la barre $1 + cy = 1 + cab = 1 + nb$, c'est-à-dire sur la première barre, et l'induit fermé ne comprendrait que c barres au lieu de n.

Ecrivons la valeur du pas en fonction du nombre de conducteurs et pôles $2p$. Nous avons

$$y = \frac{n}{2p} \pm 1 \quad \text{ou} \quad n = 2p\,(y \mp 1) \qquad (1) \text{ et } (2)$$

avec la condition que y soit *premier avec* n. n étant toujours pair, y sera nécessairement impair. Le signe négatif correspond au cas où le pas est plus grand que la distance polaire. Telle est la formule nous donnant, dans le cas particulier considéré, le nombre de barres d'un enroulement multipolaire ondulé à tambour, en quantité, à pas égaux, dès que nous connaissons le nombre de pôles et le pas, ou le pas connaissant les nombres de barres et de pôles.

Donnons à $2p$ les valeurs successives 4, 6, 8, ... et à y celles de la suite des nombres impairs, nous pourrons dresser le tableau :

$2p =$	4		6		8	
y	$y > \frac{n}{2p}$	$y < \frac{n}{2p}$	$y > \frac{n}{2p}$	$y < \frac{n}{2p}$	$y > \frac{n}{2p}$	$y < \frac{n}{2p}$
1	0	8	0	12	0	16
3	8	16	12	24	16	32
5	16	24	24	36	32	48
7	24	32	36	48	48	64
9	32	40	48	60	64	80
11	40	48	60	72	80	96
13	48	56	72	84	96	112

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

y devant être premier avec n, il y a lieu d'écarter du tableau les nombres de conducteurs qui ne satisfont pas à cette condition. C'est le cas pour les nombres 12, 24, 48, 60 avec les pas 3 et 9 dans les machines hexapolaires.

La fig. 49 relative à une machine tétrapolaire, $2p = 4$, répond au pas 5 avec $y > \frac{n}{2p}$; la fig. 50 répond au pas 3 avec $y < \frac{n}{2p}$.

Le nombre de conducteurs est bien 16 dans les deux cas, comme l'indique le tableau.

Les formules précédentes peuvent être établies en fonction de l'avance périphérique y' d'un cadre par rapport au suivant, ou encore de la distance séparant les côtés homologues de deux cadres consécutifs, ou leurs axes, qui constitue le *pas résultant* $y' = 2y$. En remplaçant y par sa valeur $y'/2$ dans l'équation (2) il vient

$$n = 2p\left(\frac{y'}{2} \mp 1\right) \qquad (3)$$

Au lieu d'être égaux, les pas peuvent différer l'un de l'autre. En partant de la première barre, on avance de y_2 puis de y_1. Il est aisé de voir que la formule (3) rendra compte de ce cas, en remplaçant y' par $y_1 + y_2$, ce qui donne :

$$n = 2p\left(\frac{y_1 + y_2}{2} \mp 1\right) \qquad (4)$$

Formule générale des enroulements ondulés en tambour. — Il est évident que l'on peut toujours écrire

$$y = \frac{n \pm m}{2p}$$

m étant un nombre entier, d'où

$$n = 2py \mp m \qquad (5)$$

Le signe — correspond au cas où le pas est plus grand que la distance polaire ; le signe + au cas où il est plus petit. n étant pair, $2py$ aussi, il faut que m le soit également. Nous rendrons cette condition explicite en posant $m = 2c$, ce qui nous donnera

$$n = 2py \mp 2c \qquad (6)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le cas des pas inégaux, $2y = y_1 + y_2$. Remplaçons dans (6), nous obtiendrons la formule générale des enroulements ondulés en tambour

$$n = p\,(y_1 + y_2) \mp 2\,c \qquad (7)$$

Il est facile de démontrer que le terme $2\,c$ représente précisément le nombre de circuits dérivés. Multiplions tous les termes par l, distance de deux barreaux consécutifs

$$n\,l = p\,(y_1 + y_2)\,l \mp 2\,c\,l$$

Cette relation indique que, quand on a fait $2\,p$ pas, on a reculé ou avancé sur la périphérie de l'induit de $2\,c$ barres, par rapport au point de départ. Or, deux balais consécutifs (de polarité inverse, un balai sur chaque ligne neutre) sont séparés par $\frac{n}{2\,p}$ barres. Chaque fois que l'on a parcouru $2\,p$ barres, on a donc avancé ou reculé de $2\,c$ barres ; pour arriver au balai de polarité inverse, il faudra donc parcourir autant de fois $2\,p$ barres que $2\,c$ sont contenus de fois en $\frac{n}{2\,p}$, soit $\frac{n}{4\,c\,p}$. On a alors utilisé $\frac{n}{4\,c\,p} \times 2\,p = \frac{n}{2\,c}$ barres et l'on a formé *un circuit dérivé*. Puisque l'induit comporte n barres, la machine présentera autant de circuits dérivés que n contient de fois $\frac{n}{2c}$, c'est-à-dire $2\,c$ circuits dérivés.

Quand $m = 1$ ou $2\,c = 2\,p$ (c'est le cas des enroulements en quantité que nous venons d'étudier), il existe autant de circuits dérivés que de pôles.

Remarque. Les conditions n pair, y_1 et y_2 impairs, et $\frac{y_1 + y_2}{2}$ première avec $n/2$, ayant été obtenues abstraction faite du nombre de pôles, doivent également être réalisées dans les machines multipolaires.

On peut d'ailleurs les retrouver aisément, $y = \frac{y_1 + y_2}{2}$. y, avons-nous vu précédemment, doit être impair et premier avec n. Mais n est divisible par 2. Donc y doit être premier avec $\frac{n}{2}$ et par conséquent $\frac{y_1 + y_2}{2}$ première avec $\frac{n}{2}$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'équation (7) montre que la somme $y_1 + y_2$ doit être paire. Donc y_1 et y_2 sont tous deux pairs ou tous deux impairs. S'ils étaient pairs, en partant de la barre 1 on ne trouverait jamais que des nombres impairs et l'on n'utiliserait pas les barres des numéros pairs. Donc ils sont tous deux impairs.

Enroulements imbriqués. — Au lieu de marcher toujours dans le même sens, on peut employer deux pas inégaux, portés successivement dans un sens et dans l'autre. On obtient alors un enroulement imbriqué.

Reprenons nos 16 barres. Raccordons par le dessus (fig. 51) la barre 1 à $1 + 5 = 6$, puis par le dessous la barre 6 à $6 - 3 = 3$, ensuite par le dessus 3 à $3 + 5 = 8$, par le dessous 8 à $8 - 3 = 5$, et ainsi de suite. Nous obtenons une disposition qui, électriquement, est semblable à celles des figures précédentes, sauf que chaque circuit dérivé ne projette plus ses barres que dans un seul flux magnétique sortant des inducteurs et non dans tous. En d'autres termes, nous aurons ici exclusivement affaire à des enroulements en quantité.

La différence $y_1 - y_2$ des pas étant forcément paire, puisque y_1 et y_2 doivent être impairs, on peut poser $y_1 - y_2 = 2c$. En pratique, on fait toujours $2c = 2$ dans les enroulements imbriqués. Comme l'expression $\frac{y_1 + y_2}{2}$ y devient $\frac{y_1 - y_2}{2} = \frac{2}{2}$ elle se réduit à l'unité et est par suite toujours première avec $n/2$.

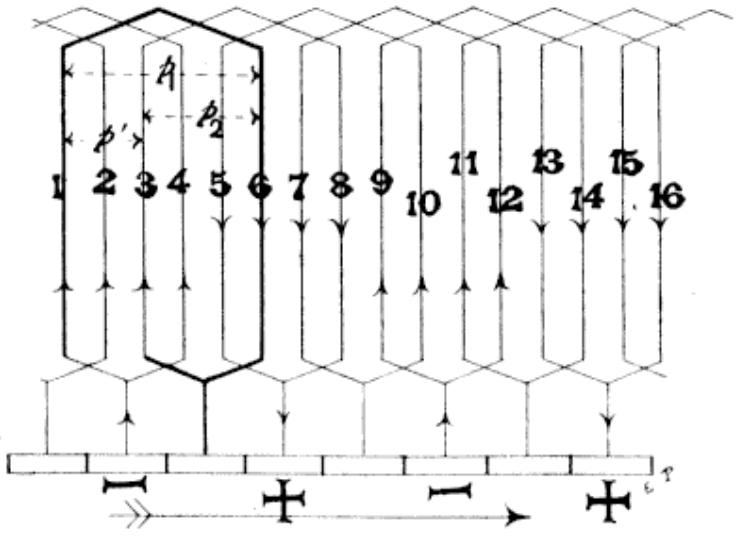


FIG 51.

Il suffit donc, dans les enroulements imbriqués, de prendre deux pas impairs ayant deux comme différence, pour être certain que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'enroulement se fermera après utilisation de tous les conducteurs. Par conséquent les enroulements imbriqués multipolaires n'ont pas de formule.

Tambours multipolaires en série. — Dans ceux-ci, il faut arriver à obtenir deux séries égales de barres, sièges de forces électromotrices égales et contraires.

Soient $2p$ le nombre des pôles distants d'axe en axe de L répartis sur la périphérie de l'induit; l la distance séparant les conducteurs au nombre de n. On aura

$$2p\ \mathrm{L} = nl. \qquad (8)$$

Supposons que le conducteur d'aller d'une boucle situé en face du milieu d'un pôle nord, tel que AB (fig. 52), soit conjugué avec un conducteur de retour CD situé d en avant du centre du pôle contraire consécutif (cas de la figure), ou d en arrière, puis réuni au conducteur d'aller A_1B_1 en avant ou en arrière de $2d$ du centre polaire suivant et ainsi de suite. En appelant y le pas,

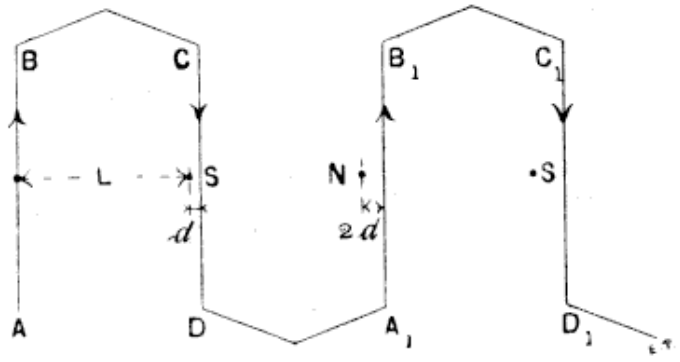


FIG. 52.

$$yl = \mathrm{L} \pm d. \qquad (9)$$

Le conducteur d'aller AB du premier cadre, se trouve sous l'influence d'un pôle nord, son conducteur de retour CD est placé sous un pôle sud; le conducteur d'aller A_1B_1 du cadre suivant est influencé par un pôle N, son conducteur de retour C_1D_1 par un pôle S, etc... Dans ces conditions, les forces électromotrices engendrées sont alternativement de sens inverse et s'additionnent dans l'enroulement. Si les choses se continuaient ainsi jusqu'à la fermeture de l'enroulement en A, l'induit serait en court-circuit. Pour qu'il soit partagé en deux séries égales de barres, sièges de forces électromotrices égales et opposées, il

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

faut qu'après avoir parcouru la moitié de l'enroulement, nous soyons arrivés à un conducteur dans lequel l'ordre de succession que nous venons de constater est inverse, c'est-à-dire, soit à un conducteur d'aller placé non plus devant un pôle nord (voir fig. 52), mais devant un pôle sud, soit à un conducteur de retour placé non plus devant un pôle sud, mais devant un pôle nord. En d'autres termes, après passage par $n/2$ conducteurs, nous devons trouver que le conducteur $n/2 + 1$ doit avoir suffisamment avancé ou reculé pour que le pôle qui l'influence ait changé de signe, c'est-à-dire que le conducteur $n/2 + 1$ doit avoir reculé ou avancé d'une distance polaire. Cette condition s'exprime par :

$$\frac{n}{2} d = \mathrm{L}. \qquad (10)$$

Eliminons maintenant l et L entre les 3 équations, nous obtenons

$$n = 2yp \mp 2, \qquad (11)$$

le signe — se rapportant encore au cas où le pas est plus grand que la distance des pôles. *y est toujours un nombre impair ;* s'il était pair, il ne pourrait être premier avec n, lequel est toujours pair.

Appliquons cette formule à un induit tétrapolaire avec $y = 3$ et pas plus petit que la distance polaire. Le nombre de conducteurs sera

$$n = 3 . 4 + 2 = 14.$$

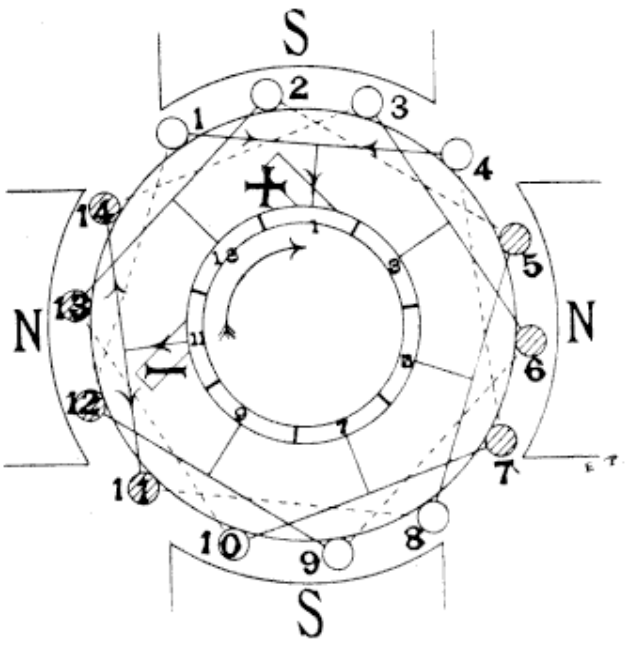


FIG. 53.

Divisons la circonférence de l'induit en 14 parties égales (fig. 53) que nous numérotons 1, 2, 3, ... 14. Dessinons les pôles N, S, N, S ; représentons par un cercle hachuré les conducteurs dans lesquels le courant va dans le sens du lecteur au papier, les autres par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un cercle blanc. Raccordons maintenant par une connexion avant (en trait plein) les barres 1 et $1 + 3 = 4$ et relions-la, en passant, à la lame 1 du collecteur; raccordons par une connexion arrière (en trait pointillé) 4 à $4 + 3 = 7$, puis par une connexion avant 7 à $7 + 3 = 10$ et joignons au collecteur, lame numérotée 7, et ainsi de suite. Nous aurons encore deux balais calés à angle droit; le nombre de lames du collecteur sera, comme toujours, la moitié de celui des barres.

En donnant à p les valeurs successives de la suite des nombres impairs, on pourra dresser le tableau suivant :

$2p =$	4		6		8	
y	$y > \frac{n}{2p}$	$y < \frac{n}{2p}$	$y > \frac{n}{2p}$	$y < \frac{n}{2p}$	$y > \frac{n}{2p}$	$y < \frac{n}{2p}$
1	2	6	4	8	6	10
3	10	14	16	20	22	26
5	18	22	28	32	38	42
7	26	30	40	44	54	58
9	34	38	52	56	70	74
11	42	46	64	68	86	90
13	50	54	76	80	102	106

La formule (11) est générale pour le montage série. Elle couvrira le cas des pas inégaux, en remplaçant $2y$ par $y_1 + y_2$.

$$n = (y_1 + y_2)\, p \mp 2. \qquad (12)$$

En donnant aux lettres y_1, y_2 et p des séries successives de valeurs, impaires pour les deux premières et la suite des nombres pour la dernière, on dresserait aisément des tableaux analogues aux précédents.

On voit que la formule (12) des enroulements en série se déduit de la formule générale (7) précédemment établie en posant $2c = 2$.

Une disposition qui se rencontre fréquemment consiste à faire $y_2 = y_1 + 2$. On a alors

$$n = (2y_1 + 2)\, p \mp 2 = 2\,(y_1 + 1)\, p \mp 2. \qquad (13)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Application aux induits bipolaires. — Pour rencontrer le cas des induits bipolaires, il suffira de poser $p = 1$ dans la formule (12) qui devient alors

$$n = y_1 + y_2 \mp 2 \qquad (14)$$

et nous retombons bien sur les formules directement établies précédemment.

Le signe négatif correspond au cas où la somme des pas dépasse la circonférence polaire, ce qui donne un induit imbriqué, fig. 45, p. 58 ; le signe positif au cas où la somme des pas n'atteint pas la longueur de la circonférence polaire, induit ondulé, fig. 46, p. 59.

Décalage des balais. — De même qu'avec l'anneau, et pour les mêmes raisons, les balais doivent être avancés dans le sens du mouvement.

Formule des anneaux en série — La formule (11) peut être utilisée pour le cas des induits à anneaux enroulés en série, en considérant qu'avec un nombre pair n de barres on ne peut obtenir qu'un nombre moitié moindre de spires de l'anneau. Le nombre de spires de celui-ci est donc

$$n' = yp \mp 1$$

Nous retombons bien sur la formule établie directement.

Pour les mêmes raisons que précédemment, y devra être premier avec n'.

Enroulements séries-parallèles. — Jusqu'ici nous n'avons envisagé que les enroulements en parallèle, présentant autant de circuits dérivés que de pôles ou ceux en série qui n'en possèdent que 2. L'enroulement peut comporter un nombre de circuits différent de ces deux quantités et l'on obtient ainsi les enroulements séries-parallèles.

Leur formule s'obtient en donnant dans la formule générale (7)

$$n = p\,(y_1 + y_2) \mp 2c$$

au terme $2c$ une valeur autre que 2 (série) ou $2p$ (parallèle).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par exemple, dans les dynamos destinées à la galvanoplastie, qui doivent débiter une énorme intensité (plusieurs centaines d'ampères) sous un très faible voltage (4, 6, 8 volts), il est souvent avantageux d'établir un nombre de circuits beaucoup plus grand que $2p$, pour éviter l'emploi de conducteurs par trop massifs.

Enroulements multiples. — Enfin, quand un induit porte plusieurs bobinages indépendants, on a affaire à des enroulements multiples. Les collecteurs peuvent d'ailleurs être séparés ou non.

Emploi de plusieurs conducteurs par encoche et de conducteurs multiples. — Jusqu'ici nous n'avons envisagé que le cas où les conducteurs ne sont pas superposés sur l'induit et sont simples. Comme il est aisé d'enrouler des sections sur calibres pour en faire de véritables galettes plates de fil, ou cadres, on est amené à utiliser ceux-ci comme éléments de bobinage. On place alors un côté du cadre au fond d'une encoche, l'autre se trouvant au haut d'une autre encoche plus ou moins distante de la première.

Par exemple, on rencontre des moteurs de tramways, tétrapolaires en série, bobinés comme suit : le premier cadre a son côté gauche au fond de l'encoche 1 (fig. 54), l'autre côté au haut de l'encoche 9; il existe 29 encoches. Quelle est la formule de cet enroulement, étant donné que l'extrémité de la première bobine est raccordée au côté d'une bobine dont l'entrée occupe le fond de l'encoche 16 et ainsi de suite; toutes les bobines sont les mêmes ?

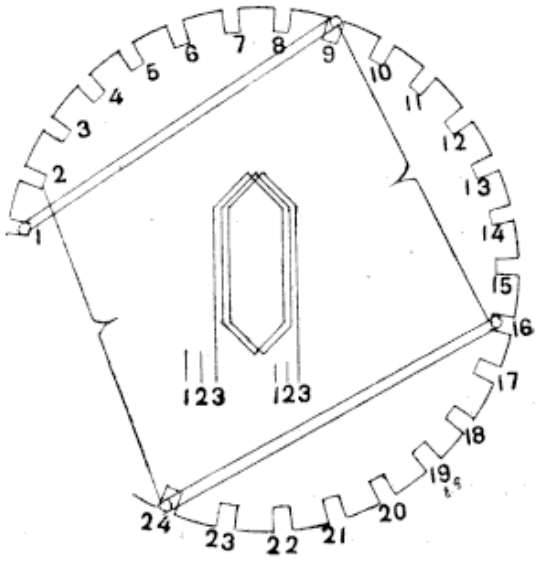


FIG. 54 et 55.

Cherchons le pas. Tous les conducteurs étant actifs font partie de l'enroulement, couronne supérieure aussi bien qu'inférieure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous devrons donc les compter successivement et dans le même ordre. Pour la facilité, on peut supposer la couronne supérieure décalée par rapport à l'inférieure et numéroter les conducteurs se présentant ainsi successivement. Dans ces conditions, on voit que le conducteur constituant le second côté du cadre est le 15e, en partant du premier côté. De même le côté inférieur du cadre suivant est le 15e, à partir du côté supérieur du premier cadre. Les pas sont égaux, valent 15 et dépassent la distance polaire. Nous appliquerons donc la formule $n = 2py - 2$, qui nous donnera 58 pour le nombre des conducteurs supposés uniques.

Mais chaque côté des cadres possède plusieurs conducteurs. Dans le type examiné, chaque cadre est, en réalité, formé de trois autres juxtaposés et chacun d'eux comporte 3 fils par côté (fig. 55). Le nombre total des fils devient ainsi $3 \times 3 \times 58 = 522$.

Si les galettes de fil étaient simples, comme il existe par galette une lame de collecteur, celui-ci comporterait $58/2 = 29$ lames. Mais il y a trois galettes superposées et distinctes par bobine et chacune d'elles est raccordée à des lames spéciales. Leur nombre total est ainsi de $29 \times 3 = 87$.

En somme, bien que les galettes soient rassemblées dans un même cadre, nous avons affaire ici à un enroulement triple.

Comparaison entre les enroulements ondulés et imbriqués. — Il résulte de ce qui précède, que les enroulements ondulés permettent d'obtenir tous les montages : parallèle, série, séries-parallèle. Leur principal avantage consiste en ce que tous leurs circuits dérivés possèdent le même nombre de barres dans les divers flux sortant des pôles, de manière que si l'un de ceux-ci est réduit par une cause quelconque, tous les circuits en sont également affectés et les forces électromotrices développées y restent égales.

Il n'en est pas de même dans les enroulements imbriqués, où chacun des circuits se trouvant sous l'influence d'un flux unique, peut développer une force électromotrice moindre et par suite être traversé par un courant très intense envoyé par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les autres circuits, d'où effet Joule important et réduction de l'effet utile de la machine.

Par contre, les enroulements imbriqués, agencés sous forme de galettes de fil moulées, permettent un démontage plus aisé de l'induit, quand celui-ci vient à être avarié, ce qui les fait souvent préférer aux premiers.

Induit en disque. — Comme le nom l'indique, cet induit affecte la forme d'un disque. Les conducteurs tournent dans un plan, de manière à couper successivement les lignes de force développées par des pôles situés de part et d'autre de l'armature. Le noyau en fer est supprimé et avec lui les courants de Foucault et l'hystérèse dont il est le siège, mais l'excitation doit être renforcée.

On est naturellement amené à multiplier le nombre des pôles, afin de ne pas arriver à de trop grandes vitesses de rotation pour la production d'une force électromotrice déterminée et les champs que parcourent les conducteurs sont alternativement de sens inverse.

Les induits à disque, qui présentent des difficultés d'assemblage et dont le rendement est moins élevé que celui des autres types, ne se construisent plus.

Constitution des noyaux induits : noyaux lisses et dentés. — Jusqu'ici nous avons supposé que les fils induits généralement recouverts d'une, de deux ou trois couches isolantes de coton, étaient enroulés *sur* le noyau induit, lequel est donc lisse. On peut aussi, et c'est maintenant le cas général pour les machines de grande et de moyenne puissances, découper de rainures la périphérie de l'induit ou même la percer de trous dans lesquels on loge les conducteurs, soigneusement isolés au mica, à la micanite ou au papier. Ces rainures et tunnels sont obtenus par la juxtaposition de tôles semblablement découpées à l'emporte-pièce et isolées l'une de l'autre au papier. Par cette disposition, on diminue l'*entrefer* ménagé pour laisser place à l'enroulement et assurer le jeu mécanique des pièces en mouvement.

Le rétrécissement de l'entrefer amoindrit la réluctance du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

circuit magnétique et permet de réduire la force magnétomotrice à développer par les inducteurs. En outre, l'armature devient plus robuste et l'effort d'arrachement, qui dans les induits lisses sollicite les conducteurs et tend à les faire glisser sur le noyau, est ici reporté sur la denture, beaucoup plus apte à y résister.

A côté de ces avantages, existent plusieurs inconvénients :

1° A cause de la réluctance élevée de l'intervalle compris entre les dents, les lignes de force se partagent en faisceaux sautant d'une dent à l'autre et brusquement rompus vers les cornes polaires de sortie, d'où production de courants de Foucault intenses dans ces dernières ;

2° Pertes hystérésiques supplémentaires dues au renforcement de l'induction dans les dents ;

3° Ronflement que font souvent entendre les machines soumises à ces changements périodiques d'état magnétique.

On remédie plus ou moins à ces inconvénients de diverses manières, qui font perdre une partie du terrain gagné. Par exemple, le développement des courants de Foucault est combattu en feuilletant les pièces polaires perpendiculairement à l'axe de l'induit ou en les alésant de manière à augmenter l'entrefer vers la sortie.

Quoi qu'il en soit, l'ensemble des avantages des induits dentés l'emporte sur les inconvénients, de sorte qu'ils sont les plus employés aujourd'hui dans les dynamos de moyenne et grande puissances.

Par contre les induits à trous ou tunnels, qui ont l'inconvénient d'offrir un passage peu réluctant à des lignes de force ne coupant pas les conducteurs, sont complètement abandonnés.

Tout ce que nous avons dit au sujet de la réaction d'induit pour les anneaux, est encore applicable ici, mais on peut, en outre, établir une expression algébrique simple exprimant la condition de bonne commutation.

Nous avons vu que, sous les cornes polaires d'entrée, le flux inducteur ne doit pas être trop affaibli par le flux transversal qui lui est opposé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Appelons s la surface de l'entrefer faisant face aux expansions polaires et l le double de la distance d'entrefer entre les dites expansions et le sommet des dents. β étant l'ouverture angulaire correspondant à une pièce polaire, le nombre de spires de l'induit situées en face et contribuant au développement du flux transversal (voir aussi fig. 48) est $\frac{n\beta}{2\pi}$. Ces spires sont parcourues par le courant I/2, d'où résulte une force magnétomotrice

$$\frac{4\pi\, n\beta \mathrm{I}}{2\pi \,.\, 2} = n\beta \mathrm{I}.$$

La principale résistance opposée à ce flux est celle de l'entrefer. Avec les induits dentés, les lignes de force se concentrent dans les dents, et l'on peut admettre que le flux transversal traverse deux fois l'entrefer en utilisant chaque fois la section $s/2$ de celui-ci.

Dans ces conditions le flux transversal est, en appelant $2c$ le nombre de circuits dérivés

$$\mathfrak{T}' = \frac{n\beta \mathrm{I}}{\frac{lc}{\frac{s}{2}}} = \frac{n\beta \mathrm{I}\, s}{2lc}$$

soit une induction, en unités C. G. S.

$$\mathfrak{B}' = \frac{\mathfrak{T}'}{\frac{s}{2}} = \frac{n\beta \mathrm{I}\, 10^{-1}}{lc}$$

Du côté des cornes polaires d'entrée, ce flux vient en déduction du flux inducteur lequel est, par unité de section

$$\frac{\mathfrak{T}}{s} = \mathcal{H}.$$

Pour qu'il y ait bonne commutation, il faut que l'on ait

$$\mathcal{H} > \frac{n\beta \mathrm{I}\, 10^{-1}}{lc}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On a trouvé empiriquement que l'intensité du champ sous la corne polaire d'entrée doit être $\geqslant$ 1500 pour les enroulements en tambour et $\geqslant$ 2500 pour ceux en anneau [1]. La majoration de ce dernier nombre est due à la selfinduction plus grande des sections commutées de l'anneau.

Comparaison des types d'induit : supériorité du tambour. — L'ANNEAU. L'anneau présente l'avantage d'être d'un démontage aisé, ce qui facilite la réparation des sections endommagées ; il permet d'atteindre avec sécurité de hauts voltages, le potentiel croissant régulièrement de spire à spire, ce qui réduit à quelques volts la différence de potentiel entre deux spires consécutives.

LE TAMBOUR. Par l'enroulement en tambour, on diminue les parties de fil inactives, donc la résistance et les dimensions de l'armature. Mais le tambour, pour les petites machines à induit lisse tout au moins, est plus difficile à enrouler et à consolider. La réparation d'une section endommagée exige souvent le déroulement complet de l'induit. On superpose sur ses bases des conducteurs à potentiels très différents, d'où un isolement plus précaire, particulièrement lorsque la rupture brusque d'un circuit provoque le développement de forces électromotrices élevées de *selfinduction*.

Par contre, la réaction d'induit du tambour est beaucoup moindre que celle de l'anneau. Si nous comparons, en effet, un tambour et un anneau travaillant dans les mêmes conditions, c'est-à-dire ayant même vitesse périphérique, même section de fer, même induction et développant la même force électromotrice, ce qui entraîne l'égalité des nombres de conducteurs périphériques, nous savons que l'anneau aura des sections présentant deux fois plus de *spires* que le tambour. La *selfinduction* d'une bobine étant proportionnelle au carré du nombre de spires, les sections de l'anneau auront de ce chef un effet inductif quatre fois plus grand que celles du tambour. Mais, comme les spires

(1) THOMAELEN. *Manuel d'électrotechnique*, p. 185. Béranger, Paris, 1909.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de l'anneau embrassent une section de fer deux fois plus petite que celles du tambour (en négligeant la place occupée par l'axe du tambour), il en résulte, en définitive, que le coefficient de *selfinduction* des sections d'un anneau sera environ deux fois plus grand que celui des éléments correspondants d'un tambour.

Le décalage des balais de ce dernier pourra être moindre ; sa réaction d'induit sera en conséquence plus faible et son rendement meilleur. Il y a là une cause de supériorité marquée pour le tambour, encore accentuée par le fait que la grandeur relative des parties inactives des conducteurs diminue avec l'augmentation des dimensions. Aussi le tambour est de plus en plus utilisé.

Éléments constitutifs d'un induit. — L'induit comporte l'axe, le collecteur, le croisillon, le noyau, les joues de serrage et l'enroulement.

L'arbre ou l'axe est en acier forgé au pilon ou à la presse hydraulique, soigneusement tourné, serré dans des tourillons dont le graissage est généralement assuré au moyen de bagues.

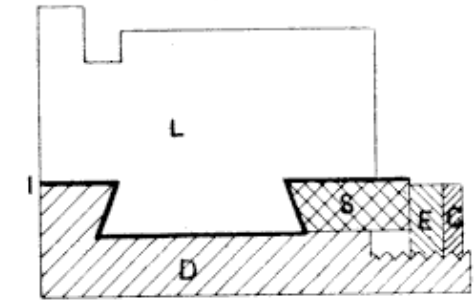


Fig. 56.

Le collecteur comprend un certain nombre de touches ou lames L (fig. 56) en bronze phosphoreux, isolées l'une de l'autre par du mica, de la micanite, amiante, presspahn (carton comprimé lustré), fixées dans une douille D par l'intermédiaire d'une partie isolante I en carton comprimé ou micanite et d'une bague conique S serrée par l'écrou E que fixe la cale C. On immobilise aussi la bague de serrage par une vis de pression. La douille est également fixée à l'arbre par vis.

Le croisillon C vient buter d'un côté contre un épaulement B (fig. 57) de l'axe ; il est immobilisé de l'autre par un écrou E et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

parfois un contre-écrou E'. Les clavettes A, A' servent à l'entraînement. Il porte les bras d'entraînement ainsi que les joues de serrage du noyau.

Les tôles du noyau doivent être entraînées par le croisillon sans glisser sur celui-ci, ce qu'on obtient par clavetage également. On facilite la dissipation de la chaleur développée dans les tôles par hystérésis et courants de Foucault et on allège ainsi la machine, en subdivisant les tôles en paquets séparés par des espaces vides où l'air peut circuler, appelés *canaux de ventilation*. L'isolation des tôles s'obtient, soit en collant à l'amidon du papier mince (0,02 mm) sur une face de chaque tôle, soit en étendant sur les deux faces du vernis isolant. Les tôles sont en fer doux de 0,5 mm d'épaisseur et l'on renforce celles des extrémités ou celles limitant les canaux de ventilation de 1 à 5 mm suivant les inductions et le nombre de cycles d'aimantation qu'elles subissent. On obtient de très bons résultats en employant comme matière première du ferro-silicium à environ 4 %. Les pertes hystérésiques sont alors considérablement réduites, ainsi que les courants de Foucault, ces derniers à cause de la résistance du ferro-silicium, plus grande que celle du fer doux.

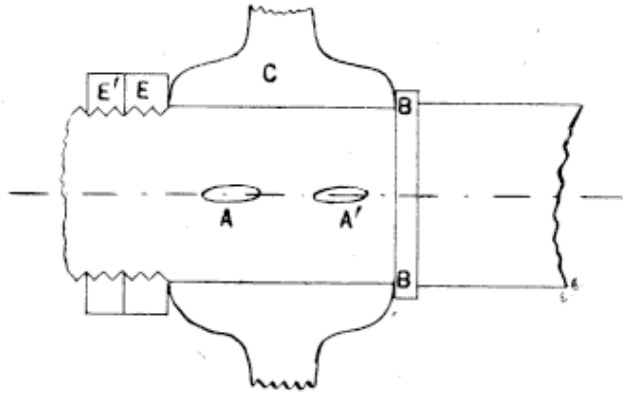


FIG. 57.

S'il s'agit d'induits lisses, l'invariabilité de la position des conducteurs, généralement isolés au coton, est assurée au moyen de coins d'entraînement. Ces coins, métalliques, s'introduisent dans des rainures radiales taillées en queue d'aronde à la périphérie de l'induit. La surface métallique de l'armature en contact avec les conducteurs est isolée de ceux-ci au moyen de papier ou de ganse imprégnée de vernis.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les induits rainurés, les conducteurs, isolés par du carton, de la micanite ou de la fibre vulcanisée, se fixent dans les entailles dont les parois latérales assurent leur entraînement. On interpose au-dessus d'eux une petite bande de fibre ou de bois mince solidement encastrée dans l'encoche.

Les frettes sont d'acier étamé ou de bronze. On les aménage souvent dans de petites rainures périphériques d'1 à 2 mm de profondeur sur 10 à 16 mm de largeur.

Dans les grandes armatures, on remplace souvent les fils par des bandes d'acier, aux extrémités desquelles on rive des agrafes à vis ou à clavettes.

Force électromotrice et puissance des machines à courant continu. — Soit (fig. 58) un induit bipolaire à anneau dans lequel le flux $\mathfrak{N}$ issu des pôles inducteurs se dérive à circuit ouvert en deux parties égales $\mathfrak{N}/2$.

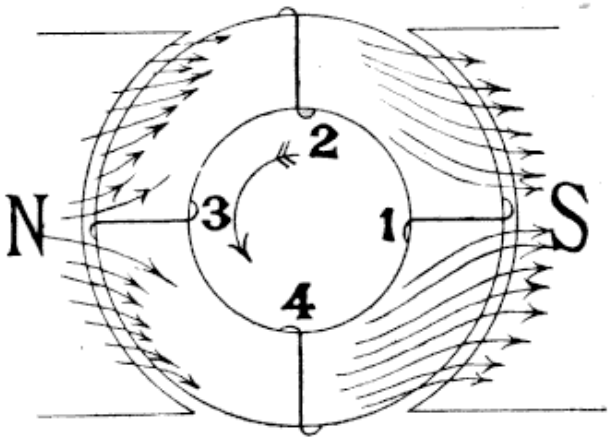


FIG. 58.

La spire située en **1** en face du pôle sud ne coupe aucune ligne de force. Quand elle est parvenue aux environs de la ligne neutre en **2**, elle a évidemment coupé le flux $\mathfrak{N}/2$ qu'elle embrasse. En **3**, elle est de nouveau parallèle aux lignes de force et en a donc encore coupé $\mathfrak{N}/2$. En **4**, elle embrasse le flux $\mathfrak{N}/2$ qu'elle a dû couper entièrement, enfin de **4** à **1**, elle coupe encore $\mathfrak{N}/2$ lignes de force. En un tour, la spire a conséquemment coupé $2\,\mathfrak{N}$ lignes de force. Ceci correspond à une paire de pôles.

Si T est la durée d'une révolution, la force électromotrice moyenne induite dans la spire traversant un champ bipolaire a pour expression, en vertu de la loi générale de l'induction,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$e = -\frac{d\mathfrak{N}}{dt} = \text{abstraction faite du signe } \frac{2\mathfrak{N}}{T} = 2\,N\,\mathfrak{N},$$

en appelant N le nombre de révolutions par seconde de l'induit. S'il y a n spires autour de l'anneau, comme $\frac{n}{2}$ sont en tension, la force électromotrice développée est

$$\frac{n}{2} \cdot 2\,N\,\mathfrak{N} = n\,N\,\mathfrak{N}.$$

On retiendra aisément cette formule : *La force électromotrice engendrée est égale au produit des trois* n.

Ceci est en unités C. G. S. En volts, nous avons $n\,N\,\mathfrak{N}\,10^{-8}$. Dans le cas d'un induit en tambour, nous obtenons encore la même quantité, n étant le nombre de conducteurs comptés sur la périphérie du tambour.

On obtient aussi la même formule pour un induit multipolaire en anneau, tambour ou disque enroulé *en quantité*, en désignant par $\mathfrak{N}$ le flux émanant de *l'un* des pôles inducteurs. (Dans le cas d'un disque, n est le nombre total de fils radiaux.) En effet, soient $2p$ pôles. Le flux coupé en un tour par une spire était dans le cas de la bipolaire $2\mathfrak{N}$; s'il y a $2p$ pôles, il devient $2p\,\mathfrak{N}$. Par seconde ou en N tours, c'est $2p\,N\,\mathfrak{N}$ et, puisqu'il y a $\frac{n}{2p}$ spires en tension, on a pour la force électromotrice $n\,N\,\mathfrak{N}$.

Quand l'induit multipolaire est enroulé en tension, nous avons encore pour le flux coupé en une seconde par une spire $2p\,N\,\mathfrak{N}$, mais ici $\frac{n}{2}$ spires sont en tension, de sorte que la force électromotrice est $n\,p\,N\,\mathfrak{N}$.

On voit aisément que la formule couvrant tous les cas sera

$$E = \frac{2\,n\,N\,\mathfrak{N}\,p}{D}\,10^{-8} \text{ volts},$$

D étant le nombre de circuits dérivés.

Nous avons supposé le circuit induit ne débitant pas de courant, c'est-à-dire nulle la réaction due au passage de ce dernier. Les résultats auxquels on arrive restent les mêmes en fonctionnement, $\mathfrak{N}$ étant toujours le flux *entrant ou sortant de chaque côté de l'induit en face de chaque pôle.*

En vertu de la règle de Faraday, le travail dû au déplacement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'un conducteur traversé par un courant I est égal au produit de l'intensité du courant par le nombre de lignes de force coupées. La *puissance* développée est représentée par le produit de l'intensité par le nombre de lignes de force coupées *en une seconde*.

D'après cela, en désignant par $\mathfrak{N}$ le flux se partageant dans un anneau bipolaire et $\frac{I}{2}$ le courant parcourant chaque moitié de l'enroulement, la puissance développée par chaque spire sera $2N\mathfrak{N}\frac{I}{2}$ et l'on obtiendra pour la puissance totale produite par les n spires de l'anneau, ou les n fils périphériques du tambour ou radiaux du disque,

$$2nN\mathfrak{N}\frac{I}{2} = EI\,10^{-8} \text{ watts},$$

I étant exprimé en ampères.

Puissance approximative des dynamos. — D'après M. Snell, entre 10 et 100 kw, on a :

$$P = 0{,}037\, l d^2 N \text{ watts pour l'anneau}$$
$$\text{et } P = 0{,}055\, l d^2 N \quad \text{» le tambour,}$$

l étant la longueur, et d le diamètre extérieur de l'induit exprimés en centimètres.

Inductions et vitesses admises. — Inductions : 10 000 à 18 000 gauss atteignant 24 000 gauss dans les dents des induits rainurés. Vitesses périphériques en mètres par seconde : tambour et anneau long 10 à 15 ; disque et anneau court 15 à 25.

Volume réel du fer. La partie fer de l'induit représente à peu près les 0,87 du volume du noyau avec un isolant au papier et un peu plus des 0,90 lorsque les tôles sont simplement vernies.

Dimensions relatives de l'induit. Par rapport au diamètre extérieur :

Diamètre intérieur. .	Anneau. . . .	0,6 à 0,8
	Tambour . . .	0,3 à 0,6
Longueur.	Anneau. . . .	0,5 à 1,5
	Tambour . . .	1,5 à 3.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Densité de courant. Dans les conducteurs de l'induit : 2 à 6 A par millimètre carré,

dans les balais en cuivre	0,23 à 0,27	ampères par mm²	de surface frottante.
» laiton	0,15 à 0,20	»	»
» charbon	0,04 à 0,07	»	»

Surface de refroidissement de l'induit par watt dépensé : 5 à 10 centimètres carrés.

Collecteur. Différence de potentiel entre deux touches successives suivant débit : 3 à 7 volts.

---

§ 2. — Circuit magnétique des dynamos. Divers modes d'excitation.

Les inducteurs comportent généralement des *noyaux* autour desquels s'enroule le fil parcouru par le courant magnétisant. Les noyaux sont réunis par une *culasse* et portent à leurs extrémités libres des épanouissements ou *pièces polaires* embrassant l'armature.

Le métal principalement employé aujourd'hui pour la fabrication de ces organes est l'*acier moulé*. On évite le plus possible les joints, source de résistance magnétique. Pour diminuer celle-ci, on alèsera soigneusement ceux que l'on est obligé d'admettre.

Machines magnéto-électriques. — Les aimants permanents ne sont guère utilisés que dans les appareils de petite taille réservés à certaines applications spéciales.

Le champ magnétique inducteur développé au moyen d'aimants permanents est en effet faible, ce qui conduirait à des machines trop volumineuses et par suite trop coûteuses et de mauvais rendement, s'il s'agissait d'établir des machines puissantes, la force électromotrice d'une dynamo étant proportionnelle à l'intensité de son champ magnétique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Excitation indépendante. — Le courant magnétisant les inducteurs peut être fourni, et c'est généralement le cas quand on a plusieurs machines semblables en fonctionnement simultané, par une dynamo spéciale dite *excitatrice*, dont le circuit est entièrement distinct de celui de l'induit, ou par une source quelconque d'électricité.

La force électromotrice développée

$$E = n\,N\,\mathfrak{N}\,10^{-8} \text{ volts}$$

serait constante à vitesse N constante, n'était la réaction de l'induit sur le champ inducteur qui réduit le flux $\mathfrak{N}$ au fur et à mesure que le courant débité par l'induit augmente.

Auto-excitation. Amorcement. — Généralement les machines industrielles sont excitées par tout ou partie du courant de leur induit. Voici comment se fait l'*amorçage* de la machine. Grâce au magnétisme que gardent les inducteurs une fois qu'ils ont été aimantés, un champ d'ailleurs fort faible traverse l'induit au repos. Dès que celui-ci se met à tourner, une faible force électromotrice est engendrée.

Si certaines conditions initiales que nous étudierons plus loin sont satisfaites, le courant passant dans les inducteurs développe un flux qui vient s'ajouter au champ rémanent coupé par l'induit et qui majore conséquemment la force électromotrice développée dans celui-ci. Cette majoration de la force électromotrice a pour effet, la résistance du circuit étant restée la même, d'augmenter l'intensité du courant inducteur et par suite celle du flux qui renforce derechef la force électromotrice et ainsi de suite. En quelques instants, la machine fournit son voltage normal ; elle est *amorcée*.

Lorsque les connexions des inducteurs ont été faites à rebours, le courant qu'on y envoie produit un flux inverse de celui que développe le champ rémanent. Celui-ci disparaît progressivement par un cycle inverse de celui que nous venons de décrire ; la machine ne s'amorce pas. Une simple permutation des fils d'entrée et de sortie du courant rétablit les choses dans l'ordre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Inducteurs en série. — Le système le plus simple consiste à faire passer tout le courant dans les inducteurs en disposant ceux-ci en *série* avec l'induit et le circuit extérieur (fig. 59). Les bobines inductrices doivent naturellement présenter la plus faible résistance possible, afin de diminuer les pertes par effet Joule; elles sont donc enroulées au moyen de gros fil.

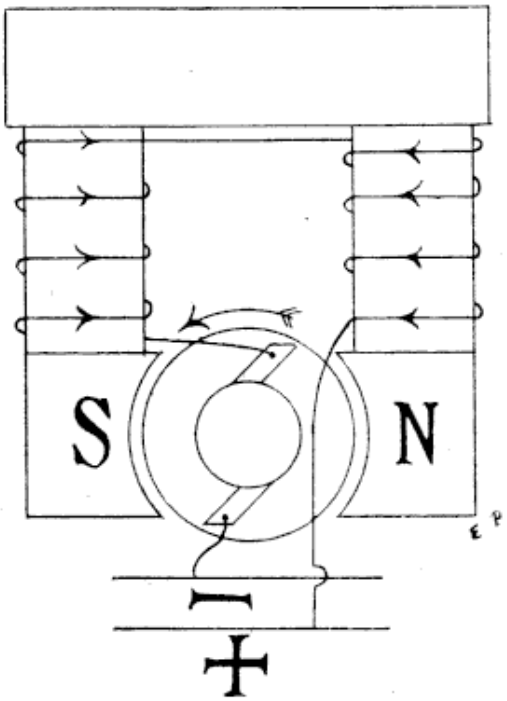


Fig. 59.

Le diagramme (fig. 60) montre nettement la disposition du circuit ; r est la résistance de l'induit et des balais, s celle de l'enroulement des inducteurs et R celle du circuit extérieur.

Le courant a pour valeur

$$I = \frac{E}{r + s + R} = \frac{n N \mathfrak{N}}{r + s + R},$$

d'où l'on tire pour la valeur du flux *traversant l'induit*

$$\mathfrak{N} = \frac{I(r + s + R)}{nN}.$$

Cette équation montre que dans la machine série, et pour autant que l'on ne dépasse pas le coude de la courbe du magnétisme, le flux utile et par suite *la force électromotrice engendrée croissent proportionnellement au courant débité par l'induit.*

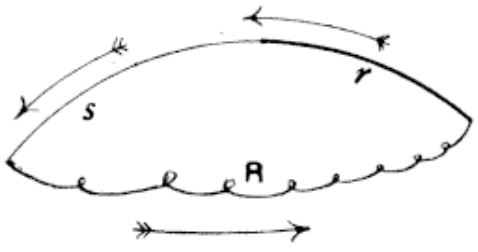


Fig. 60.

D'autre part, en appelant $\mathfrak{R}$ la rélu ctance du circuit magnétique de la dynamo, m le nombre de spires de ses induc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teurs, on a pour le flux qu'ils émettent, en négligeant la réaction d'induit :

$$\mathfrak{N}' = \frac{4\pi m \mathrm{I}}{\mathfrak{R}}.$$

Toutes les lignes de force émises ne traversant pas l'induit à cause des dérivations magnétiques s'établissant dans l'air ambiant, il est nécessaire que l'on ait

$$\mathfrak{N}' > \mathfrak{N}$$

ou

$$4\pi n \mathrm{N} m > \mathfrak{R}\,(r+s+\mathrm{R})$$

ou encore

$$r+s+\mathrm{R} < \frac{4\pi n \mathrm{N} m}{\mathfrak{R}}.$$

r et s étant fixes dans un appareil donné, il existe pour les machines série, une valeur maximum de la résistance extérieure R, au-dessus de laquelle l'auto-excitation ne se produit plus.

Comme la machine doit au moins s'amorcer en court-circuit, ou pour R = o, il faut que l'on ait à la limite

$$(r+s)\,\mathfrak{R} < 4\pi n \mathrm{N} m.$$

Dans les très petites dynamos, cette condition n'est fréquemment pas remplie, à cause de la grande résistance électrique résultant de l'emploi de fil fin et de l'importance relativement grande de l'entrefer. Aussi les petites machines ne présentent-elles jamais l'excitation série.

La puissance totale EI fournie par la machine se subdivise en deux parties : l'une $\mathrm{I}^2(r+s)$ dépensée en échauffement dans le fil de l'induit et des inducteurs, et l'autre dépensée dans le circuit extérieur. Cette dernière seule est utilisable plus ou moins complètement, par l'intermédiaire de récepteurs.

C'est le même courant qui traverse tout le circuit. En appelant e la différence de potentiel aux bornes, on a

$$\mathrm{I} = \frac{e}{\mathrm{R}} = \frac{\mathrm{E}}{r+s+\mathrm{R}}, \qquad \text{d'où} \qquad e = \mathrm{E}\cdot\frac{\mathrm{R}}{r+s+\mathrm{R}}.$$

Le voltage aux bornes sera d'autant plus grand, que la résis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tance intérieure de la machine sera plus petite par rapport à la résistance extérieure.

Nous venons de voir que la résistance extérieure ne doit pas dépasser un certain quantum, pour que la machine puisse s'amorcer.

D'autre part, au-dessous d'une certaine valeur de cette même résistance, l'intensité du courant peut atteindre une valeur dangereuse pour la conservation de la dynamo. Il faut donc éviter avec soin tout court-circuit accidentel, en intercalant à la suite de la machine un interrupteur automatique qui rompt le circuit, lorsque le courant dépasse la limite de sécurité. La rupture brusque du circuit, pourrait donner lieu à des forces électromotrices d'induction élevées, provoquant des effets destructifs pour l'isolant des conducteurs ; il ne faudra donc l'effectuer que graduellement, en insérant des résistances croissantes.

Une propriété fort utile de ce genre d'excitation réside dans l'invariabilité du calage des balais, tant qu'on n'atteint pas le coude de la courbe de saturation des noyaux, puisque le champ inducteur, comme les champs transversaux, restent proportionnels au courant.

Enfin remarquons que la machine, étant connectée avec des appareils électrolytiques qui produisent, comme nous le savons, une force électromotrice opposée à celle de la source, si le moteur qui l'entraîne vient à ralentir, son voltage baisse proportionnellement ; lorsqu'il arrivera à être inférieur à celui du circuit d'utilisation, le courant sera renversé dans les inducteurs, les pôles seront intervertis et l'induit, continuant à tourner dans le même sens, la force électromotrice engendrée changera de signe, de sorte que le courant, vu la faible résistance totale rencontrée, pourrait acquérir brusquement une valeur dangereuse au point de vue de l'effet Joule ; en tout cas, les appareils de sûreté couperaient le circuit, d'où perturbation. La dynamo en série ne convient donc pas pour les opérations électrolytiques.

Inducteurs en dérivation. — Ici le circuit des inducteurs est monté en dérivation sur les circuits induit et extérieur (fig. 61 et 62).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dès lors le sens du courant y reste invariable, quelle que soit la direction de celui circulant dans le circuit extérieur, comme il est facile de s'en rendre compte, et l'inconvénient signalé ci-dessus pour la machine série disparaît.

On a

$$I = \frac{E}{r + \frac{dR}{d+R}} = \frac{nN\mathfrak{N}}{r + \frac{dR}{d+R}} \quad (1)$$

d désignant la résistance des bobines en dérivation

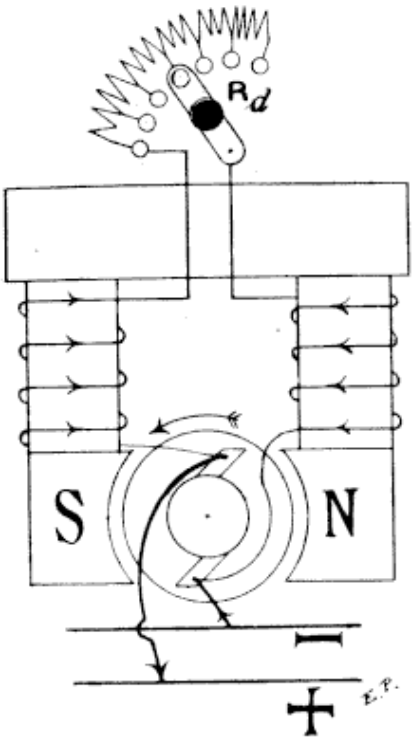


Fig. 61.

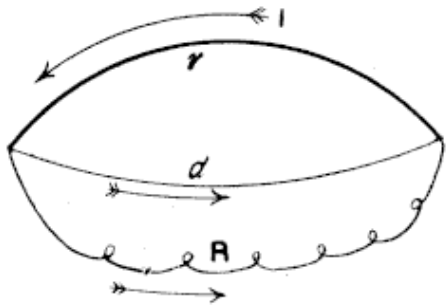


Fig. 62.

d'où $$\mathfrak{N} = \frac{I}{nN}\left(r + \frac{dR}{d+R}\right).$$

D'autre part le flux sortant des inducteurs

$$\mathfrak{N}' = \frac{4\pi m i_d}{\mathfrak{R}}$$

en appelant comme précédemment m le nombre de spires des inducteurs.

On devra encore avoir $\mathfrak{N}' > \mathfrak{N}$ ou

$$\frac{4\pi m i_d}{\mathfrak{R}} > \frac{I}{nN}\left(r + \frac{dR}{d+R}\right).$$

Mais $i_d = I\frac{R}{d+R}$. Remplaçant et effectuant la réduction il vient

$$\mathfrak{R}\left(\frac{rd}{R} + r + d\right) < 4\pi mnN.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En partant d'une grande valeur de la résistance extérieure R et la faisant décroître progressivement, on voit qu'il arrivera un moment où l'équation de condition ne sera plus satisfaite et la machine se désamorcera.

A l'inverse de ce qui a lieu pour les dynamos en série, il n'y a donc aucun danger à mettre une machine en dérivation en court-circuit.

Enfin, à circuit ouvert $R = \infty$, de sorte que l'équation de condition étant nécessairement remplie, la machine s'amorcera. Elle fonctionne d'ailleurs alors comme une machine série.

Le courant passant par l'inducteur est prélevé sur le courant total débité par l'induit. Il réduit le courant utile dépensé dans le circuit extérieur; aussi y a-t-il intérêt à le diminuer le plus possible. La force magnétomotrice $4\pi m i_d$ qu'il développe peut être obtenue en agissant, soit sur i_d, soit sur m. Le premier moyen devant être rejeté pour la raison que nous venons d'indiquer, reste le second. En pratique, on constitue donc les enroulements inducteurs des machines en dérivation, de fil fin enroulé en un grand nombre de spires présentant une grande résistance électrique, de manière que le courant qui les traverse $i_d = \frac{e}{d}$ soit minime, $e = E - Ir$ étant la force électromotrice disponible aux balais.

La résistance de l'induit est généralement fort petite (quelques centièmes d'ohm dans les machines moyennes); la chute de potentiel y est conséquemment faible, de sorte que l'on dispose aux balais de la presque totalité de la force électromotrice développée par la machine. A vitesse et flux magnétique constants, le voltage reste donc à peu près invariable, puisqu'il ne diminue avec l'augmentation du débit que de la quantité fort faible Ir.

Rhéostat de champ. Mais lorsque le courant augmente, la réaction d'induit vient s'ajouter à la perte de charge, pour réduire la force électromotrice engendrée, et la différence de potentiel disponible aux balais diminue sensiblement. Comme il est nécessaire dans la plupart des applications, d'assurer la constance du voltage appliqué, il convient de pouvoir contre-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

balancer la réaction d'induit lorsqu'elle se manifeste. Pour cela, il faut intercaler une résistance variable en série avec les inducteurs, de manière à permettre de renforcer le flux qu'ils émettent, proportionnellement à la perte de flux due aux courants de circulation dans l'induit.

Les machines en dérivation sont donc toujours pourvues d'une résistance subdivisée appelée *rhéostat de champ*. Celle-ci est, en général, constituée par un cadre en fer supportant des séries de boudins métalliques attachés à des isolateurs en porcelaine et fixés, à leurs extrémités, dans des plots disposés en arc de cercle, sur lesquels vient appuyer un levier de contact. Les plots sont assez rapprochés, pour que le levier en touche simultanément deux en passant d'une position à la suivante, ceci pour éviter des interruptions.

Pour une induction magnétique donnée des noyaux inducteurs, le coefficient de selfinduction étant proportionnel au carré du nombre des spires, on voit qu'il sera bien plus grand que dans une machine en série, quoi que le courant y soit beaucoup moins intense.

L'inductance qui en résulte peut déterminer des étincelles capables d'endommager l'isolant des conducteurs, si l'on coupe brusquement le circuit des inducteurs. Il y aura donc lieu de ne rompre celui-ci que progressivement, par l'intermédiaire de résistances graduellement croissantes.

Pour éviter toute étincelle à la rupture du circuit inducteur quand l'excitation est indépendante, il conviendra d'établir les enroulements en court-circuit au moment de la rupture. La fig. 63 rend compte de cette disposition. R rhéostat

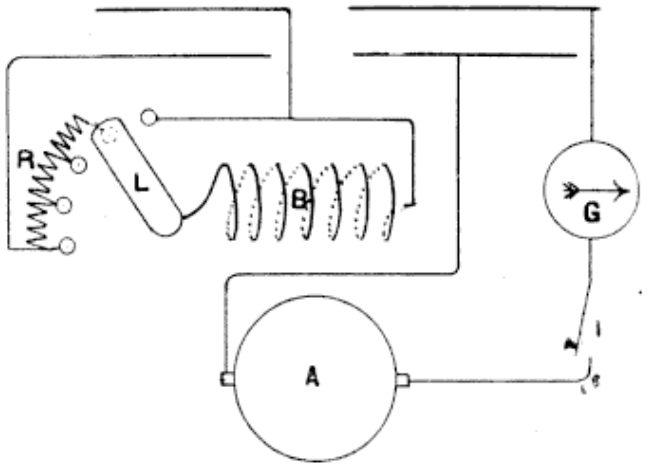


Fig. 63.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'excitation, B bobine inductrice, L lame glissante qui, poussée sur le dernier plot, met l'inducteur en court-circuit. A induit, I interrupteur, G ampèremètre.

On peut donc, à l'aide du rhéostat de champ, insérer une résistance plus ou moins grande dans le circuit des inducteurs, de manière à diminuer ou augmenter à volonté l'intensité du courant dérivé, donc celle du champ inducteur. Mais ceci exige des manœuvres lorsque l'intensité du courant d'utilisation varie.

Il serait impossible de régler les machines à la main, quand les variations sont nombreuses. On recourt alors aux dynamos *compounds*, qui assurent automatiquement l'invariabilité du calage des balais et de la différence du potentiel utilisable.

Inducteurs à excitation composée ou machines compounds. — Nous avons vu plus haut que l'enroulement en série confère à la machine la propriété de faire croître le voltage aux bornes avec le débit. D'autre part, si l'enroulement est en dérivation, le voltage *baisse* quand le débit augmente, par suite de la perte de charge et de la réaction d'induit. On comprend donc que la combinaison de ces deux modes d'excitation, dans une même machine (fig. 64), rende le voltage sensiblement constant entre certaines limites. On obtient ainsi une machine *compound*.

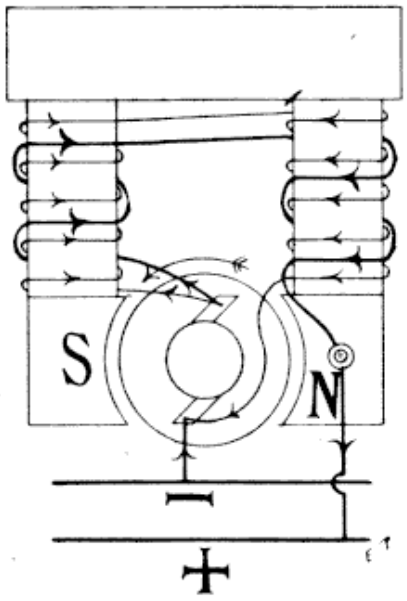


Fig. 64.

Dès que, par suite de l'augmentation de la charge, la force magnétomotrice de l'enroulement dérivé faiblit, celle de l'enroulement en série augmente et compense la réduction de l'autre.

Le calcul des enroulements s'établit comme suit : l'enroulement en dérivation est déterminé de manière à fournir, à vide,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le nombre d'ampères-tours aptes à développer le voltage normal. On détermine de même le nombre d'ampères-tours nécessaires pour obtenir aux bornes le même voltage normal, lorsque la machine fonctionne à son maximum de charge, c'est-à-dire quand les pertes de la dynamo sont le plus grandes. La différence des deux nombres trouvés donne le nombre d'ampères-tours que l'enroulement série doit comporter.

Le problème à résoudre peut être, non pas de maintenir la tension constante aux bornes, mais bien aux extrémités d'une canalisation où se trouvent les appareils d'utilisation. La résistance de cette canalisation étant R et le courant qui la traverse i, nous savons que la chute de tension y sera Ri. Elle augmentera avec i, de sorte que pour maintenir le voltage $e - Ri$ constant, il faudra que le voltage e aux bornes croisse avec le courant. C'est ce que fournit la machine *hypercompound*, dans laquelle l'enroulement en série est prédominant.

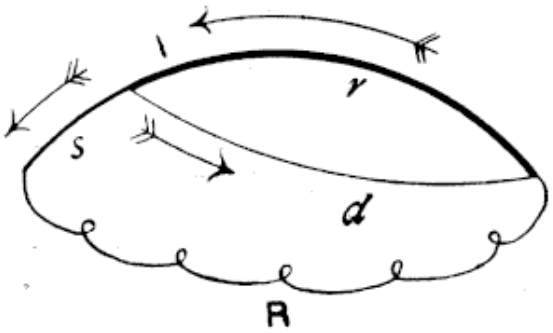


FIG. 65.

Les bobines en dérivation peuvent occuper deux positions par rapport aux autres organes de la machine : ou bien elles sont branchées directement sur l'induit et l'on a la *compound* à *courte dérivation* (schéma 65),

$$I = \frac{E}{r + \dfrac{d\,(s + R)}{d + s + R}},$$

ou bien elles sont branchées en dérivation sur l'induit et l'enroulement série (fig. 66), et l'on a la *compound à longue dérivation*.

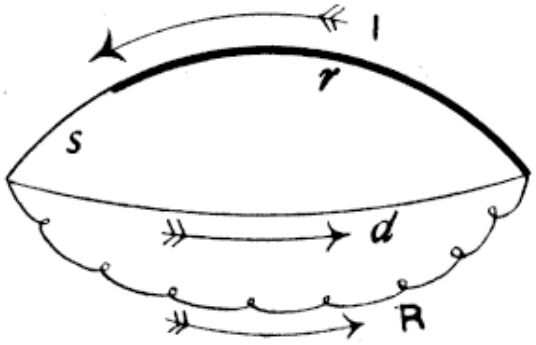


FIG. 66.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La valeur du courant devient

$$I = \frac{E}{r + s + \frac{dR}{d + R}}.$$

On emploie surtout les dynamos *compounds* dans les petites installations privées, où les machines ne sont pas contrôlées incessamment et où une augmentation de voltage pourrait faire brûler les lampes. On les utilise également lorsque les variations de charge sont très brusques, comme c'est le cas pour les génératrices des usines centrales de tramways électriques ainsi que le montrent les diagrammes des wattmètres enregistreurs installés aux tableaux des dites usines.

Principales formes des inducteurs. — La valeur de la réluctance $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu s}$ montre, que pour obtenir le plus grand flux possible avec une force magnétomotrice et un métal donnés, il convient d'assigner à l la plus faible et à s la plus grande valeur possible. Les électro-aimants seront donc courts et gros. D'autre part, au point de vue de l'économie de cuivre dans la bobine magnétisante, il y aura avantage d'adopter la section circulaire, celle-ci possédant le périmètre minimum.

Inducteurs bipolaires. — Nous avons indiqué plus haut (fig. 59, 61 et 64) la forme des inducteurs *Edison*. Ils présentent un inconvénient : le socle de l'appareil, généralement en fonte, absorbe un certain nombre de lignes de force perdues au point de vue utile. On y remédie partiellement en interposant, entre le bâti et le socle, une plaque en métal non magnétique, par exemple en zinc. Pour que cette plaque soit efficace, il faut qu'elle présente une certaine épaisseur ; on admet environ 11 fois la longueur de l'entrefer.

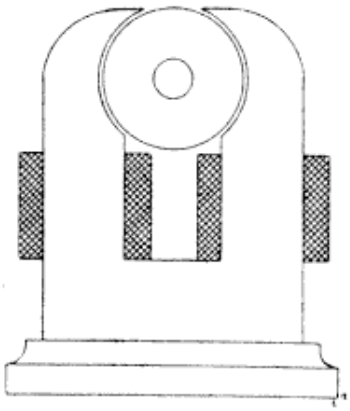


Fig. 67.

Gramme a évité cette sujétion, en renversant la disposition

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 67) et plaçant l'induit à la partie supérieure, d'où le nom de *type supérieur*. Dans ce cas, il convient toutefois de modifier la forme des expansions polaires supérieures. Si le développement de celles-ci en face de l'induit était simplement symétrique par rapport à l'horizontale passant par l'axe de rotation, la partie du flux bifurquant dans le bas de l'induit et empruntant les parties latérales intérieures des noyaux et de la culasse, parcourant un chemin moins long, donc moins réluctant, serait plus dense que celle passant par la partie supérieure. Il en résulterait une attraction plus forte vers le bas surchargeant les paliers, et une dissymétrie du champ, obligeant à un décalage inégal des balais. On donne, en conséquence, plus de développement aux expansions polaires supérieures. Mais ce type présente moins de stabilité que le précédent, la partie pesante étant reportée au sommet.

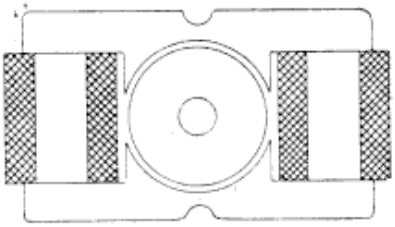


FIG. 68.

Le type *Manchester* (fig. 68) qui eut un moment de vogue, comporte deux noyaux verticaux créant des pôles conséquents dans les expansions polaires. Il y a donc deux circuits magnétiques distincts placés en parallèle, comportant chacun un noyau, deux demi-expansions polaires, un demi-induit.

Pour évaluer les ampères-tours d'une machine semblable, il suffit de calculer ceux d'un seul des deux circuits ne développant que la moitié du flux total de la machine.

Avec les dispositifs précédents, les dérivations magnétiques dans l'air ambiant (dispersion) sont notables. On les réduit, dans les machines modernes, en envoyant directement dans l'induit le flux sortant des noyaux (fig. 69).

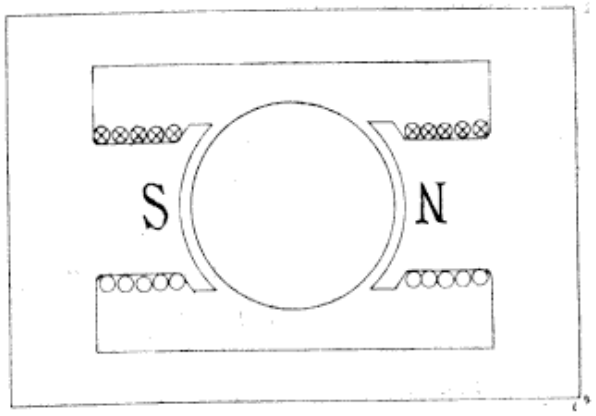


FIG. 69.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au-delà d'une certaine puissance, on ne construit plus de machines bipolaires, l'importance du flux devenant trop considérable sous chaque pôle et sa répartition s'effectuant inégalement sur l'induit. On ne dépasse pas 20 kw pour les machines à simple circuit et 10 pour celles à double circuit.

INDUCTEURS MULTIPOLAIRES. — Ou bien les pôles sont à l'*intérieur* de l'induit (fig. 70), ou ils sont *extérieurs* à celui-ci.

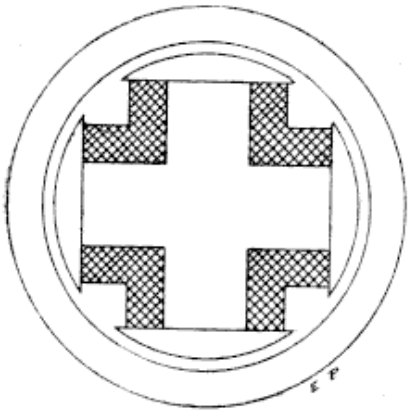


FIG. 70.

Dans ce dernier cas, on distingue deux variantes : *a)* les noyaux et bobines sont disposés *perpendiculairement* à l'induit (fig. 71); ce cas est de beaucoup le plus général; il correspond exactement à la bipolaire (fig. 69); *b)* ils sont tangents, système THURY (fig. 72).

Les diverses bobines excitatrices sont montées en tension entre les balais.

NOMBRE DE PÔLES A ADOPTER. — Jusque 70 kw environ les machines sont tétrapolaires; jusque 175, hexapolaires; jusque 400, octopolaires; jusque 800, décapolaires, etc.

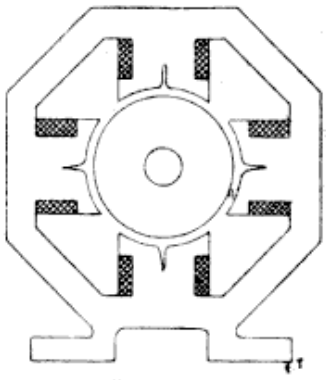


FIG. 71.

FLUX PERDU. — Le flux développé par les inducteurs n'est jamais absorbé complètement par l'induit. Une portion plus ou moins grande, suivant le type, la puissance et le nombre de pôles des dynamos, se disperse dans l'air ambiant et, n'étant pas coupée par les conducteurs de l'induit, se trouve perdue au point de vue de la production de la force électromotrice.

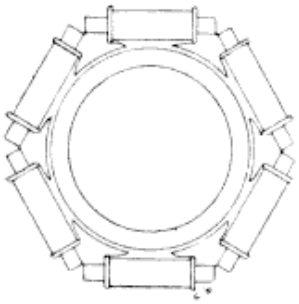


FIG. 72.

Le coefficient de dispersion (coefficient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'Hopkinson) plus grand pour les petites machines, dépend du type de la dynamo, de ses dimensions, de l'excitation et de la charge.

On a trouvé expérimentalement :

ν = 1,5 pour les dynamos du type Manchester
1,3 » » » Édison.
1,1 à 1,2 » » du dernier type.

Le coefficient des machines à induit lisse est de 15 à 20 % plus grand que celui des machines à induit denté.

Inductions admises. — Dans les inducteurs en fer et acier doux, 10 000 à 18 000 gauss ; dans les inducteurs en fonte, 6 000 à 10 000 gauss.

Densité de courant. — 2 à 6 A par millimètre carré de section de fil inducteur.

Surface de refroidissement des bobines inductrices par watt dépensé : 10 à 20 centimètres carrés.

Construction des bobines magnétisantes. Les bobines magnétisantes sont enroulées sur des carcasses métalliques soigneusement isolées ou sur des montures en matière isolante. On les enroule aussi directement sur un gabarit en bois dont la section correspond à celle du pôle. Pour que la bobine finie soit suffisamment rigide, on vernit les couches successives de fil et l'on passe une large ganse alternativement au-dessus des groupes de fils voisins.

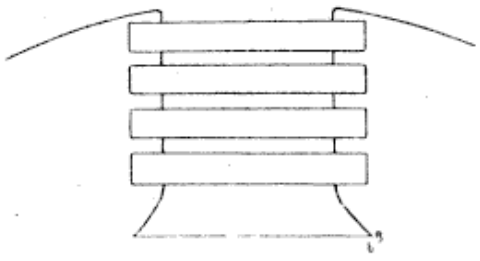


Fig. 73.

On cherche aujourd'hui à assurer une énergique ventilation des bobines d'excitation, par exemple (fig. 73), en subdivisant les bobines sans carcasse en plusieurs parties entre lesquelles on dispose de petites cales en bois.

Les bobines de compoundage peuvent se disposer soit au-des-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sus des bobines en dérivation, soit en-dessous, soit, ce qui est préférable au point de vue des réparations, à l'une des extrémités.

Dès que l'on atteint des puissances moyennes, les noyaux et culasses des génératrices à courant continu sont établis en acier coulé et d'une seule pièce. Les expansions polaires sont rapportées et formées de paquets de tôle isolée au papier fixés aux noyaux au moyen de boulons.

---

§ 3. — Suppression des étincelles au collecteur. Rendements. Tableaux de distribution.

Suppression des étincelles. — Nous avons vu que pour obtenir une commutation sans étincelle aux balais, il faut avancer ceux-ci dans le sens du mouvement, ce qui fait naître la réaction d'induit et diminue la force électromotrice disponible. Divers moyens sont employés pour réduire cette réaction.

1. Saturation des noyaux. — L'étude de la commutation sans étincelle nous a montré qu'il y a avantage, pour diminuer le coefficient de *selfinduction* des spires, de saturer fortement le noyau de l'induit. D'une manière générale, on conçoit qu'il est utile d'adopter les inductions les plus élevées possible dans toutes les parties du circuit magnétique, puisque alors, les faibles champs développés par la circulation des courants dans l'induit, acquièrent une importance relative moindre et que la machine devient plus légère.

2. Sectionnement des noyaux polaires. On réduit l'influence des flux transversaux en rendant leur circuit plus réluctant, ce qui se réalise en ménageant des fentes longitudinales dans les expansions polaires (voir fig. 69).

Ce moyen est peu efficace, parce que les lignes de force transversales n'existent pas en réalité, le flux distordu n'étant pas la résultante de deux flux composants, mais bien la résultante des ampères-tours inducteurs et transversaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3. Formes spéciales données aux expansions polaires. — On améliore la commutation en donnant aux extrémités des épanouissements polaires des formes particulières, pour que la bobine à commuter n'entre que progressivement dans le champ inducteur. Il suffit parfois d'arrondir fortement ou de relever les extrémités polaires. Au lieu de faire usage d'épanouissements rectangulaires, on peut aussi leur donner la forme d'un parallélogramme, de façon qu'ils se présentent obliquement par rapport à l'axe de l'induit.

4. Balais résistants. — L'extracourant dû à la mise en court-circuit de la spire est d'autant moins intense que le circuit dans lequel il se développe est plus résistant. On augmente la résistance du circuit des spires passant sous les balais en feuilletant ceux-ci de manière que le courant arrivant à une des touches (fig. 74), doive suivre les feuilles du balai, remonter jusqu'à la soudure qui les réunit à leur extrémité opposée au collecteur, redescendre par les feuilles en contact avec la seconde touche, pour enfin atteindre cette dernière.

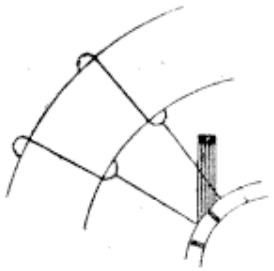


Fig. 74.

De bons résultats sont obtenus dans cet ordre d'idées, en remplaçant le cuivre par le charbon dur que l'on cale perpendiculairement au collecteur, ce qui permet la marche dans les deux sens sans devoir retourner les balais.

5. Pôles compensateurs. — Depuis quelques années on est arrivé à des résultats remarquables, par l'emploi de petits pôles auxiliaires N', S', excités en série, situés entre les pôles, sur les lignes neutres théoriques (fig. 75), et ne couvrant qu'une ou deux encoches.

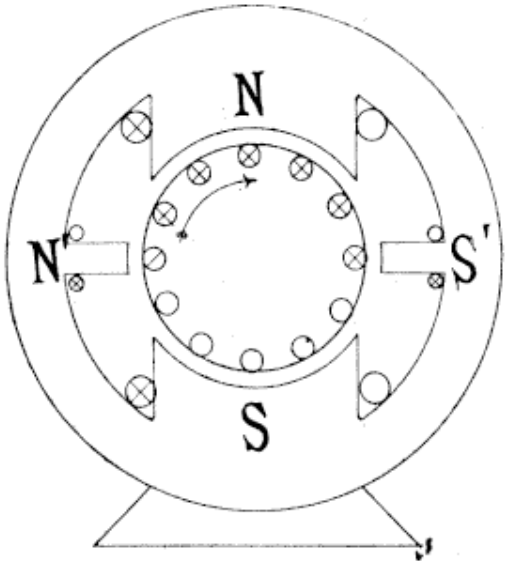


Fig. 75.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'effet de ces pôles, nul quand la machine marche à vide, devient plus énergique à mesure que le courant à commuter augmente. Ils sont indispensables quand il s'agit d'établir des dynamos de grande puissance tournant à des vitesses très élevées. Leur emploi permet de réduire beaucoup l'entrefer et de réaliser ainsi une économie notable sur le cuivre des inducteurs.

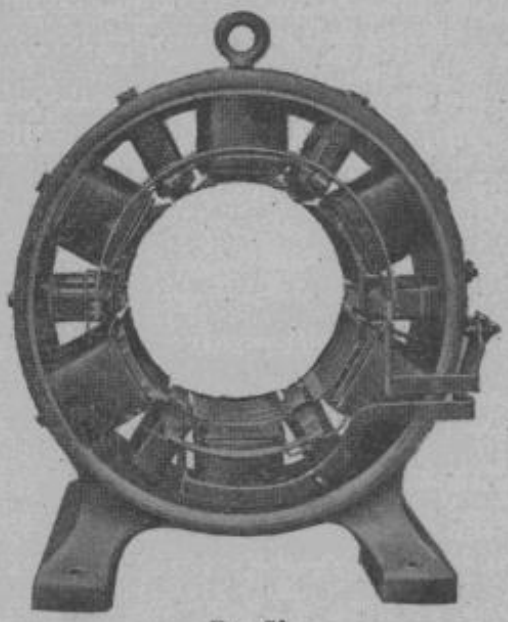


FIG. 76.

Le débit de la machine n'est plus alors limité que par l'échauffement de l'enroulement induit; on peut dire qu'avec eux, le problème de la bonne commutation est entièrement résolu. La figure 76 montre le système inducteur avec pôles compensateurs, d'une machine multipolaire.

Rendements. — On en distingue trois. En désignant par :

P_m la puissance *mécanique* en watts dépensée sur l'arbre du générateur, mesurée au dynamomètre de transmission;

P_e la puissance électrique *totale* produite par le générateur;

P_u la puissance électrique *utile* disponible aux bornes;

$\frac{P_e}{P_m}$ est le coefficient de transformation; $\eta_{ie} = \frac{P_u}{P_e}$ est le rendement électrique; $\eta_{ii} = \frac{P_u}{P_m}$ est le rendement industriel ou commercial.

Appelons comme précédemment : E, la force électromotrice totale en volts développée dans la dynamo; e, la différence de potentiel utile en volts, prise aux bornes extérieures, c'est-à-dire à celles sur lesquelles se branche le circuit d'utilisation; I, i_d, i_e, les intensités du courant en ampères, dans l'induit, dans les inducteurs en dérivation et dans le circuit extérieur; r, s, d, R,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les résistances en ohms, mesurées à chaud, de l'induit avec ses balais, de l'enroulement en série, de l'enroulement en dérivation et du circuit extérieur.

Dans une machine série, nous aurons pour un régime quelconque :

$$E = e + I(r + s) \text{ et } \eta_{ie} = \frac{eI}{EI} = \frac{e}{E}.$$

Dans une machine en dérivation (fig. 61) :

$$E = e + r(i_d + i_e); \quad i_d = \frac{e}{d}; \quad \eta_{ie} = \frac{ei_e}{EI}.$$

Dans une machine *compound* à court *shunt* (fig. 63) :

$$E = e + i_e s + r(i_d + i_e); \quad i_d = \frac{e + is}{d}; \quad \eta_{ie} = \frac{ei_e}{EI}.$$

Dans une machine *compound* à long *shunt* (fig. 64) :

$$E = e + (r + s) I = e + (r + s)(i_d + i_e); \quad i_d = \frac{e}{d}; \quad \eta_{ie} = \frac{ei_e}{EI}.$$

CHIFFRES PRATIQUES. — Le rendement des dynamos varie avec leur puissance; il est d'autant plus faible que la puissance est elle même moins considérable, les résistances passives prenant alors une importance relative plus grande.

Le tableau suivant donne la valeur du rendement commercial des machines modernes.

Puissance en kw utiles (aux bornes) . . .	1	3	5	10	15	20	25	50	75	100	2500
Rendement commercial	0,76	0,82	0,83	0,85	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,915	0,95

Tableaux de distribution. — Dans le but de faciliter les manœuvres, on relie la ou les dynamos aux circuits d'utilisation, au moyen d'un tableau de distribution (fig. 77) généralement en marbre, lequel porte les appareils de contrôle, ceux de sécurité et de manœuvre. A et B sont deux barres de cuivre en rapport avec

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les bornes de la dynamo par l'intermédiaire d'un ampèremètre I, d'un interrupteur N et d'un fusible de sûreté F_1. Un voltmètre V permet de mesurer la différence de potentiel existant entre ces barres, desquelles se détachent les circuits d'utilisation après passage par des fusibles F_2, F_3, F_4, F_5 et les interrupteurs N_1 et N_2. Enfin un commutateur C permet d'insérer tout ou partie du rhéostat de champ magnétique, de manière à obtenir le voltage voulu entre A et B.

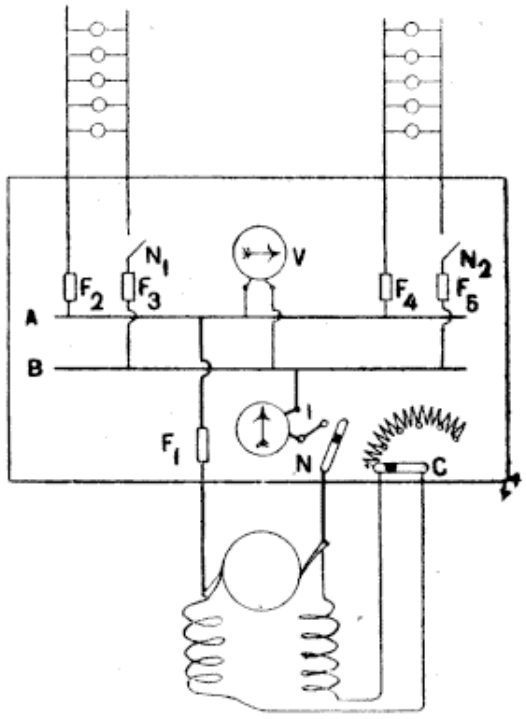


FIG. 77.

Il convient de remarquer que la position relative des fusibles et des interrupteurs n'est pas indifférente. Si les coupe-circuits étaient placés *après* l'interrupteur par rapport aux barres de distribution, ils ne protégeraient pas l'installation contre un court-circuit se manifestant entre les conducteurs qui réunissent les interrupteurs aux barres. Sur les branchements importants, les interrupteurs doivent être doubles, c'est-à-dire pourront interrompre l'un ou l'autre des *deux* conducteurs du branchement.

On évitera le plus possible les croisements de fils; enfin, il conviendra de fixer le tableau à 0,40 m au moins du mur, pour permettre un accès aisé aux conducteurs. Tous les circuits doivent être étiquetés et porter l'indication de leur fonction.

Si l'installation comporte plusieurs machines, on affecte un panneau spécial à chacune d'elles, de manière à pouvoir assurer leur indépendance absolue en cas d'avarie. Les circuits principaux doivent, pour le même motif, être aussi disposés dans des panneaux spéciaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C'est au marbre blanc que l'on donne généralement la préférence à cause de son homogénéité et de sa pureté.

Lorsqu'il s'agit de circuits à haute tension, le tableau se complète par une série de galeries séparées par des cloisons et divisées en chambres ou réduits incombustibles, dans lesquels passent les barres collectrices et où sont également installés les interrupteurs et autres appareils de réglage manœuvrés à distance du tableau souvent par l'intermédiaire de relais fonctionnant à basse tension.

Lorsqu'on ne connaît pas le schéma d'un tableau, il faut se garder d'y effectuer une manœuvre quelconque, en l'absence de personne compétente, afin d'éviter des accidents.

§ 2. — Les caractéristiques.

Généralités. — Les conditions de fonctionnement des divers types de dynamos peuvent être très simplement mises en évidence au moyen de courbes appelées *caractéristiques* par M. Marcel Deprez, qui, le premier, en a montré l'utilité. On les obtient en traçant les diagrammes $e = f(i)$ *à vitesse constante* pour des régimes variés. La caractéristique *à circuit ouvert* ou *à vide*, à la vitesse N tours par minute, est la courbe $E_0 = f(i)$ obtenue en portant en abscisses les valeurs i du courant *d'excitation*, que l'on fait varier graduellement, et, en ordonnées, les valeurs correspondantes de la force électromotrice.

La caractéristique à vide ne part pas de l'origine à cause du magnétisme rémanent. En augmentant lentement l'excitation, la force électromotrice commence par croître à peu près linéairement. L'inclinaison de cette partie de la caractéristique dépend de l'entrefer. Plus celui-ci est réduit, plus la caractéristique s'élève rapidement. Quand le fer commence à se saturer, la caractéristique s'incurve et d'autant plus vite, que l'entrefer est plus étroit. Les augmentations de force électromotrice deviennent alors de plus en plus lentes. Si l'on diminue l'exci-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tation, on obtient une courbe se plaçant au-dessus de la précédente et en différant en général assez peu pour qu'on puisse les confondre.

La force électromotrice à circuit ouvert est donnée par la relation

$$E_0 = nN\mathfrak{G}\ 10^{-8}.$$

Le nombre de fils périphériques de l'induit n étant forcément constant, si l'on assigne une valeur déterminée à $\mathfrak{G}$, en laissant invariable l'intensité du courant traversant les inducteurs, la force électromotrice à circuit ouvert ne dépendra plus que de la vitesse, si l'on fait abstraction de la valeur démagnétisante, très faible d'ailleurs, due aux courants de Foucault se développant dans les inducteurs et l'induit. Pour une autre valeur N de la vitesse, on aura

$$E'_0 = nN'\mathfrak{G}\ 10^{-8}, \quad \text{d'où} \quad \frac{E'_0}{E_0} = \frac{N'}{N} \quad \text{et} \quad E'_0 = E_0 \frac{N'}{N}.$$

On voit donc que, si l'on a relevé une caractéristique à circuit ouvert à la vitesse N, il est aisé de tracer celle à la vitesse quelconque N', car il suffit de multiplier les ordonnées de la première par le rapport des deux vitesses.

La caractéristique *extérieure* ou *externe* donne la courbe de la force électromotrice relevée *aux balais* ou *aux bornes* (suivant le type de machine), en fonction de l'intensité du courant dans *le circuit extérieur* ou *d'utilisation*.

La caractéristique *totale* ou *interne* fournit les valeurs des forces électromotrices développées dans l'induit en fonction du même courant extérieur; elle se déduit de la précédente.

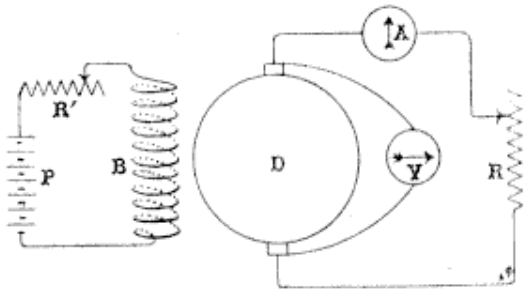


FIG 78.

Excitation indépendante. — Le montage de l'installation est représenté (fig. 78), dans laquelle D est l'induit, V un voltmètre dérivé à ses bornes, A un ampèremètre, R un rhéostat réglable, B les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

inducteurs excités par une source P dont le débit peut être ajusté au moyen du rhéostat R'.

Nous avons vu qu'à circuit ouvert, la force électromotrice est donnée par l'équation

$$E_0 = nN\mathfrak{N}10^{-8}.$$

$\mathfrak{N}$ étant constant par hypothèse, puisque l'excitation est indépendante, et la vitesse invariable par définition, la caractéristique à circuit ouvert sera représentée par l'horizontale AB (fig. 79), tirée à la distance E_0 de l'axe des abscisses.

Faisons débiter l'induit en partant d'une grande résistance extérieure, que nous diminuons progressivement, et mesurons, au moyen de l'ampèremètre A, et du voltmètre V placé en dérivation sur les balais, les intensités i_1, i_2, i_3, ..., et les voltages e_1, e_2, e_3, ..., correspondant à ces divers régimes. Nous dresserons ainsi un tableau qui, traduit sous forme de courbe, nous donnera la caractéristique extérieure $e = f(i)$. C'est une courbe AC, partant de la valeur E_0 pour un courant nul (circuit ouvert, $R = \infty$) et assez fortement incurvée.

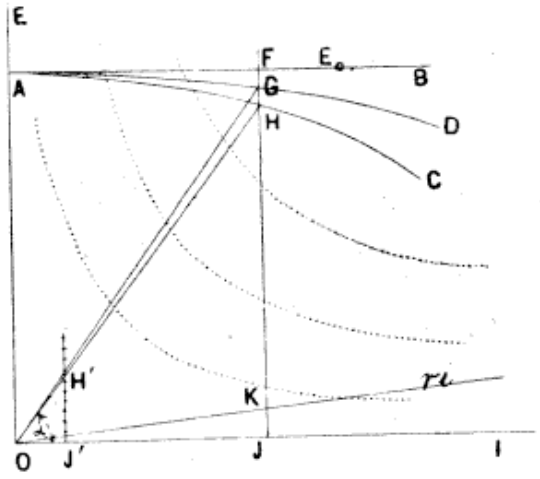


FIG. 79 (1).

Aux divers régimes i_1, i_2, i_3, ..., la résistance (à chaud) r de l'induit et celle b des balais, provoquent les pertes de voltage $(r + b)\, i_1$, $(r + b)\, i_2$, $(r + b)\, i_3$ ... qui, ajoutées aux voltages existant aux balais, fournissent la force électromotrice totale développée aux dits régimes i_1, i_2, i_3, ... A l'extrémité des abscisses i_1, i_2, i_3, ... élevons des ordonnées respectivement égales à $e_1 + (r+b)\, i_1$, $e + (r+b)\, i_2$ ...; nous obtiendrons ainsi la

(1) Lire sur la figure 79 : $(r + b)\, i$ au lieu de $r\, i$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

caractéristique totale AD. C'est une courbe passant aussi par A (circuit ouvert) et s'infléchissant un peu moins que AC. Graphiquement, on l'obtiendra aisément en traçant la droite $e' = (r+b)\,I$, qui représente la perte dans l'induit et les balais. Il suffira alors de mener une ordonnée quelconque FJ, dont la portion KJ indiquera la perte dans les balais et l'induit quand celui-ci débite l'intensité OJ. En l'ajoutant à l'ordonnée HJ, différence de potentiel aux balais, on obtiendra la force électromotrice totale GJ. La différence $FG = E_0 - GJ$ donne *la perte de voltage due à la réaction d'induit*, puisque E_0 est la force électromotrice due à l'excitation seule, quand l'induit n'est le siège d'aucun courant, c'est-à-dire quand il n'y a pas de réaction d'induit.

Tirons la droite OH. Nous avons $HJ = OJ \operatorname{tg} \alpha$, ou $e = I \operatorname{tg} \alpha$ ou encore $\frac{e}{I} = \operatorname{tg} \alpha$. Mais en vertu de la loi d'Ohm, $\frac{e}{I} = R$. Donc, *la tangente de l'angle que fait la droite menée d'un point quelconque de la caractéristique extérieure à l'origine, avec l'axe des* I, *représente numériquement la résistance en ohms du circuit extérieur raccordé aux balais, pour le régime défini par les coordonnées du point considéré.*

De même, la tangente de l'angle de la droite OG avec l'axe des I donnera la valeur de la résistance *totale* du circuit.

On remarquera que les tangentes ne représentent les résistances, que si les échelles adoptées pour mesurer les volts et les ampères sont égales. Quand les échelles sont différentes, on porte sur l'axe des I, à partir de l'origine, une longueur OJ', correspondant à 1 ampère et l'on élève à l'extrémité une perpendiculaire indéfinie, divisée en longueurs égales à celle qui représente 1 volt. Cette droite devient l'échelle des résistances. L'intersection d'un vecteur quelconque avec cette ordonnée y intercepte un nombre de divisions indiquant la résistance correspondante. On a alors, en effet,

$$\frac{HJ}{OJ} = r = \frac{H'J'}{OJ'} = H'J'.$$

Réciproquement, la résistance du circuit extérieur ou total étant donnée, il suffira, pour déterminer quelles sont alors les conditions de fonctionnement de la dynamo, de mener de l'origine une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

droite ayant pour coefficient angulaire la valeur de cette résistance, et d'abaisser l'ordonnée du point d'intersection avec la caractéristique extérieure ou totale, ce qui déterminera d'un coup la force électromotrice disponible ou totale et l'intensité du courant.

Posons maintenant EI = 1, puis 2, 3, ... kilowatts, et traçons les courbes correspondantes d'équipuissance, qui seront des hyperboles équilatères ; les ordonnées de leurs points d'intersection avec les caractéristiques définiront les régimes pour lesquels la machine développe les puissances correspondantes.

On se rendra ainsi facilement compte, graphiquement, des conditions spéciales aux divers régimes que peut fournir la dynamo. Les rendements électriques, notamment, seront déterminés par le rapport des ordonnées des caractéristiques extérieure et totale.

Excitation en série. — A circuit ouvert, aucun courant ne passant dans l'enroulement d'excitation, la force électromotrice est nulle, à part celle, très faible, produite par le magnétisme rémanent. Lors du fonctionnement de la machine, le courant total traverse les inducteurs, le champ varie constamment avec la charge, et il est utile de se rendre compte de la force électromotrice que l'induit développerait à circuit ouvert, pour les diverses valeurs que peut alors prendre l'excitation.

On déconnectera donc les inducteurs ; on les reliera à une source quelconque de courant et, faisant varier l'intensité du courant d'excitation en modifiant des résistances interposées dans le circuit,

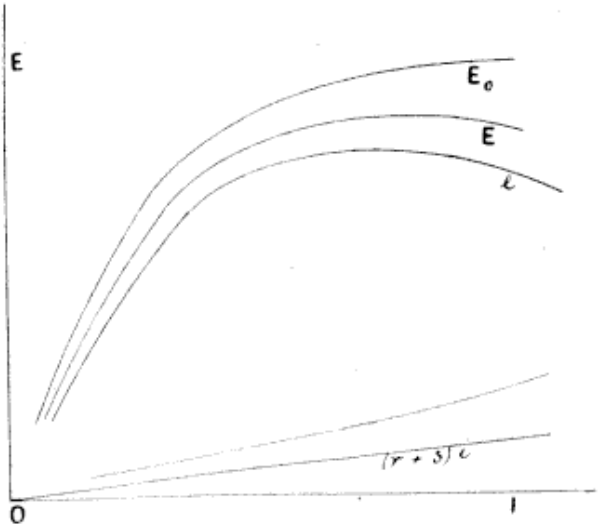


FIG. 80.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on mesurera, au moyen d'un voltmètre branché sur les balais, les diverses forces électromotrices E_1, E_2, ..., correspondant aux régimes d'excitation i_1, i_2, ..., toujours à vitesse de rotation constante.

La courbe E_0, tracée (fig. 80) au moyen de ces valeurs, est précisément celle du magnétisme ; elle part d'un point situé au-dessus de l'origine, à cause du magnétisme rémanent, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer.

Rétablissons maintenant les connexions normales (fig. 81), puis, l'induit tournant toujours à la même vitesse que précédemment, relevons les valeurs successives e_1, e_2, ..., du voltage aux bornes et les intensités I_1, I_2,, ..., du courant passant alors dans le circuit extérieur et qui sont aussi celles traversant les inducteurs. La construction de la courbe $e = f(I)$ correspondante nous donne la caractéristique extérieure. Elle part du même point que la précédente, mais reste en dessous. Au delà du coude de la première, elle s'infléchit par suite de la réaction d'induit.

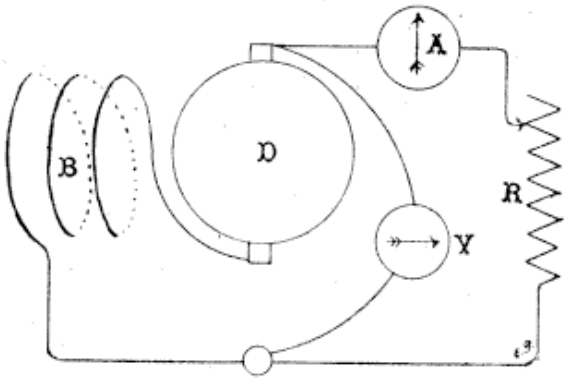


FIG. 81.

Comme dans le cas précédent, les valeurs correspondantes e_1, e_2, ..., I_1, I_2, ..., nous permettent de calculer celles de la force électromotrice totale : $E = e + (r + s + b) I$, au moyen desquelles on tracera la caractéristique totale. La différence entre les ordonnées des caractéristiques à circuit ouvert et totale nous donnera encore l'effet de la réaction d'induit, et le rapport des ordonnées de la caractéristique extérieure à celles de la seconde de ces courbes, les rendements électriques.

En traçant la courbe résultant des différences entre les caractéristiques extérieures et à circuit ouvert, nous mettons en évidence, pour les divers régimes, l'influence de la réaction d'induit et la chute de voltage dans la machine.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La formule $E_o = nN\mathfrak{N}\ 10^{-8}$ montre que la caractéristique à circuit ouvert représente les flux en fonction des courants d'excitation, à une échelle égale à celle des volts divisée par $nN\ 10^{-8}$.

La forme même de la caractéristique extérieure, indique qu'il conviendra de faire fonctionner la dynamo dans la région sensiblement horizontale, un peu au delà du coude. En dehors de cette région, en effet, de faibles différences dans l'intensité du courant amèneraient de grandes variations dans le voltage, ce qui, ainsi que nous le verrons plus loin, nuirait au fonctionnement des récepteurs, s'il ne le compromettait entièrement.

CONSTRUCTION GRAPHIQUE DES CARACTÉRISTIQUES EXTERNE ET INTERNE D'APRÈS LA CARACTÉRISTIQUE A CIRCUIT OUVERT (1). — On remarquera que, partant de la caractérisque à circuit ouvert, il est possible de tracer graphiquement la caractéristique externe et, par suite, la caractéristique interne.

Cherchons, à cet effet, quelle sera la force électromotrice aux bornes, quand la machine débitera le courant I_1. Portons cette intensité sur l'axe des X en OI_1 (fig. 82) et menons l'ordonnée I_1A correspondante.

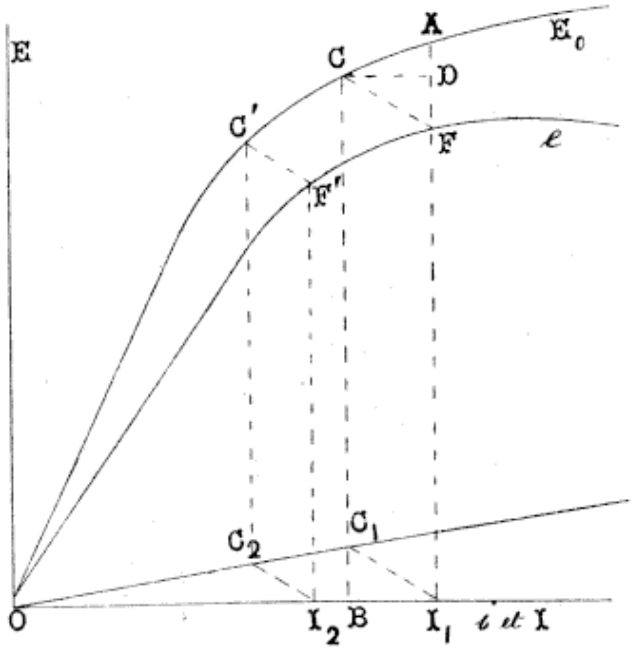


FIG. 82.

A circuit ouvert, nous trouverions aux bornes la différence de potentiel I_1A. Mais à circuit fermé nous obtiendrons moins, à cause de la réaction d'induit d'une part, et

(1) E. ARNOLD. *La machine dynamo à courant continu*, p. 487, Béranger, Paris, 1904.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la chute de voltage dans la machine d'autre part. Si cette dernière n'existait pas, la réaction d'induit aurait simplement pour effet de réduire l'action magnétisante du courant I_1, d'une quantité I_1B, et la force électromotrice obtenue serait celle due au courant magnétisant OB, représentée par l'ordonnée BC que nous reportons au droit de I_1 en I_1 D. A cause de la perte de charge $I_1 (r + s + b) = DF$, nous n'obtiendrons aux bornes que la force électromotrice $I_1D - DF = I_1F$ et F sera le point de la caractéristique externe correspondant au courant I_1. Tirons CF. On peut admettre que le triangle CDF, dit *triangle des pertes*, a ses côtés proportionnels à l'intensité I du courant débité par l'induit. Par conséquent il suffira, pour trouver les divers points de *e*, de réduire ses côtés proportionnellement à I et de le déplacer parallèlement à lui-même, de manière que le point C se meuve sur la courbe E_o.

Ayant tracé ce triangle pour un régime, il est aisé de déduire graphiquement les divers points de *e*. En effet, par I_1, menons une droite $I_1 C_1$, égale et parallèle à FC et joignons C_1 à l'origine. Pour déterminer le point correspondant à un autre régime il suffira, en remarquant que I_1C_1CF est un parallélogramme, de mener par I_2 une parallèle à I_1C_1, de tirer l'ordonnée du point de rencontre C_2 avec la droite OC_1 et de compléter le parallélogramme $I_2C_2C'F'$, qui fournira la différence de potentiel aux bornes $F'I_2$.

La courbe ainsi obtenue ne coïncide pas absolument avec la caractéristique externe réelle; les valeurs fournies sont trop petites pour de faibles et trop fortes pour de grandes saturations.

La caractéristique interne se trouve comme précédemment, en ajoutant aux ordonnées de la caractéristique externe les chutes correspondantes $I (r + s + b)$.

Machine en dérivation. — La caractéristique à circuit ouvert (fig. 84) s'obtiendra, comme pour la machine précédente, en raccordant les inducteurs à une source de courant, faisant varier son intensité et mesurant, pour chacune de ces valeurs, la différence de potentiel développée aux balais. On peut également la tracer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en auto-excitation, en agissant sur le rhéostat de champ complété par une résistance additionnelle. Le courant circulant dans l'induit étant très faible, les deux courbes coïncident pratiquement.

On réalise alors l'installation représentée fig. 83 et l'induit tournant toujours à la vitesse constante choisie N, on mesure la force électromotrice aux balais à circuit ouvert ($R = \infty$). Puis, diminuant graduellement la résistance extérieure, on relève pour chaque régime l'intensité du courant utile et le voltage correspondant aux balais, ce qui permet de tracer la caractéristique extérieure EB. Celle-ci part de la valeur du voltage à circuit ouvert, s'infléchit graduellement par suite de la réaction d'induit, passe par un point de rebroussement pour une intensité dite *critique*, puis revient vers l'origine, en tournant sa convexité vers l'axe des I. Cette dernière partie ne peut se déterminer que sur certaines machines, car le régime devient alors instable.

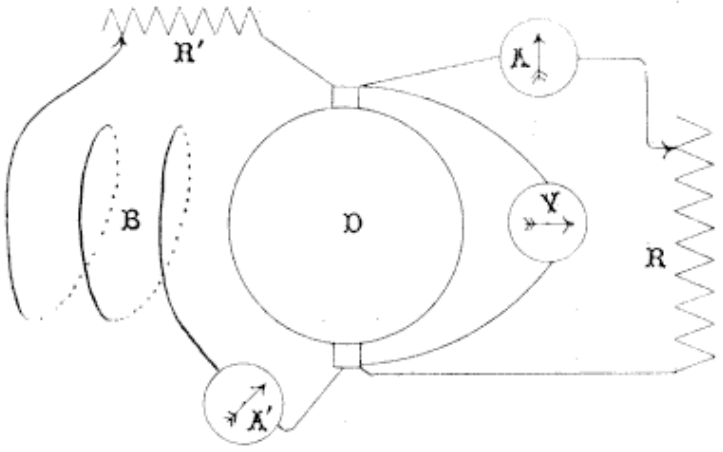


Fig. 83.

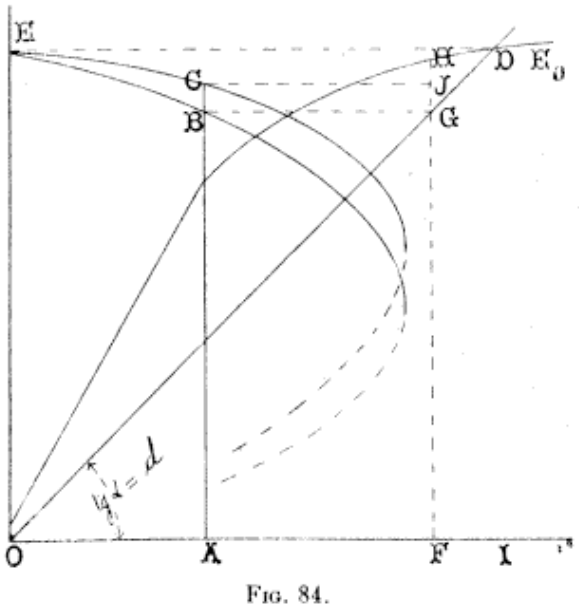


Fig. 84.

Le rebroussement de la courbe peut sembler étrange à première

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vue. Il est cependant aisément explicable. Lorsque la machine est mise en court-circuit, c'est-à-dire pour R = o, l'excitation étant nulle, la force électromotrice et par suite le courant sont nuls. R augmentant, après amorçage, le courant va en augmentant dans le circuit extérieur, au fur et à mesure que l'intensité croissant dans les inducteurs, la force électromotrice augmente. Quand la force électromotrice normale est atteinte, les augmentations successives de la résistance ont pour effet de diminuer graduellement le courant extérieur, qui devient nul à circuit ouvert. Le courant extérieur allant en augmentant, pour diminuer ensuite et se réduire à zéro, a nécessairement passé par un maximum.

La caractéristique interne s'obtient en ajoutant aux ordonnées de la caractéristique externe les voltages perdus dans l'induit par la circulation des courants, c'est-à-dire

$$I\,(r + b) = (i_e + i_d)\,(r + b) = \left(i_e + \frac{e}{d}\right)\left(r + b\right)$$

L'effet de la réaction d'induit pourra être déterminé en se rappelant qu'il représente la différence entre la force électromotrice que la machine donnerait à vide pour l'excitation du régime considéré et la force électromotrice qu'elle développe effectivement en charge sous la même excitation.

Traçons une droite OD telle que *tg* DOI = *d*, résistance des inducteurs. Il en résulte que les ordonnées de cette droite représenteront les voltages aux extrémités du circuit dérivé, et les abscisses correspondantes les courants d'excitation.

Menons une ordonnée quelconque AB de la caractéristique externe. Elle fournit le voltage aux balais quand le circuit extérieur est traversé par le courant OA. Si d'autre part, nous menons l'horizontale BG et tirons l'ordonnée GF, la longueur OF nous donnera le courant d'excitation correspondant au voltage AB. Il nous suffira donc de prolonger FG jusqu'à la rencontre de la caractéristique à circuit ouvert, pour obtenir la valeur FH que l'excitation OF donnerait à circuit ouvert. Menant l'horizontale CJ, la longueur JH mesurera la réaction d'induit.

La stabilité de fonctionnement exige que la machine travaille suivant la branche supérieure de ses caractéristiques.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CONSTRUCTION GRAPHIQUE DES CARACTÉRISTIQUES EXTERNE ET INTERNE A L'AIDE DE LA CARACTÉRISTIQUE A CIRCUIT OUVERT. — On peut encore, comme pour la machine série, construire la caractéristique externe en partant de la caractéristique à circuit ouvert.

Le point D où la droite OD telle que $tg\ \alpha = d$, coupe la courbe E_o, représente le point de fonctionnement à circuit ouvert puisque, tant qu'on n'y est pas arrivé, le voltage appliqué aux bornes du circuit d'excitation est plus élevé que celui nécessitant le passage du courant magnétisant dans le dit circuit. Au-delà c'est l'inverse, de sorte que le point D ne peut être dépassé pour l'excitation choisie. Reportons le point D en J (fig. 85).

Considérons maintenant un point K de la caractéristique à

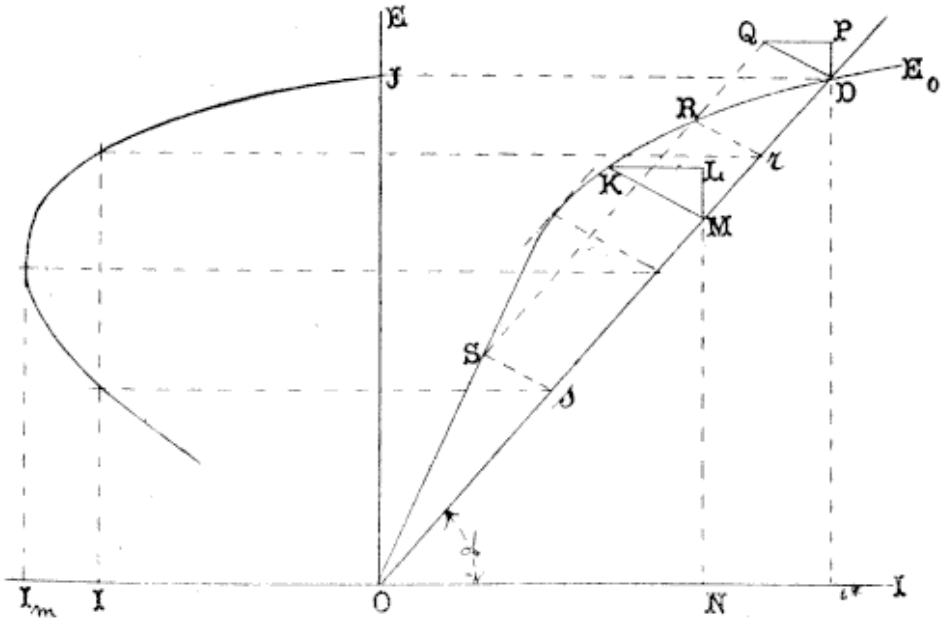


FIG. 85.

vide correspondant à un régime de courant i_k dans le circuit externe. On peut admettre que ce courant i_k est égal au courant total I_k débité par l'induit, vu la faiblesse du courant d'excitation. Du fait de la réaction d'induit, nous devrons majorer l'excitation d'une quantité KL proportionnelle au courant total. Si de l'ordonnée LN nous retranchons la chute de voltage $I_k(r+b)=LM$ nous devons aboutir en un point M de la droite OD, et MN repré-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sentera le voltage aux bornes de l'enroulement dérivé pour le régime I_k. Joignons KM. Nous reconnaissons dans le triangle KLM le triangle des pertes dont les côtés, d'après la remarque précédemment faite, peuvent être considérés comme proportionnels au courant total I_k du régime considéré. Nous obtenons le point M et ainsi de suite.

Nous déduisons de là la construction suivante : en D portons $DP = I\,(r + b)$ pour le régime quelconque I, puis en PQ la valeur du courant d'excitation correspondant à la réaction d'induit pour ce régime. Joignons QD.

Par Q menons une parallèle à OD qui coupe E_o en R et S, d'où nous mènerons des parallèles à QD fournissant les deux points *r* et *s* correspondant au courant I. Nous porterons alors celui-ci en OI à gauche de OE, puis sur l'ordonnée de son extrémité, nous reporterons les points *s* et *r* ce qui nous fournira les deux points de la caractéristique externe relatifs au courant I et ainsi de suite.

Le point critique sera fourni par la tangente à E_o parallèle à OD.

La branche supérieure de la courbe, d'ailleurs la plus intéressante, coïncide exactement avec la courbe relevée en pratique ; la branche inférieure s'en écarte assez bien.

La caractéristique interne se déduira sans difficulté, comme précédemment.

Machine compound. — Traçons encore la caractéristique à circuit ouvert $O\,E_o$ (fig. 86) et la droite dont la tangente vaut numériquement la résistance du circuit dérivé. Son point d'intersection D avec $O\,E_o$ est le point de fonctionnement à circuit ouvert comme nous l'avons vu. Reportons-le en J. Si la machine était parfaitement compound, elle fournirait un voltage constant $= D\,O'$ à ses bornes pour tous les régimes de fonctionnement et sa caractéristique serait une horizontale.

I correspondant à la pleine charge de la machine, construisons en D le triangle des pertes pour ce régime. K P correspondra encore à la réaction d'induit et D P à la perte de charge. Pro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

longeons K P jusqu'en P' et déplaçons le triangle parallèlement à lui-même jusqu'à ce que K vienne en P', ce qui se fera le plus simplement en menant P' D' parallèle à K D. Menons aussi P D'' parallèle à K D.

Le point P' correspondra au fonctionnement à pleine charge I.

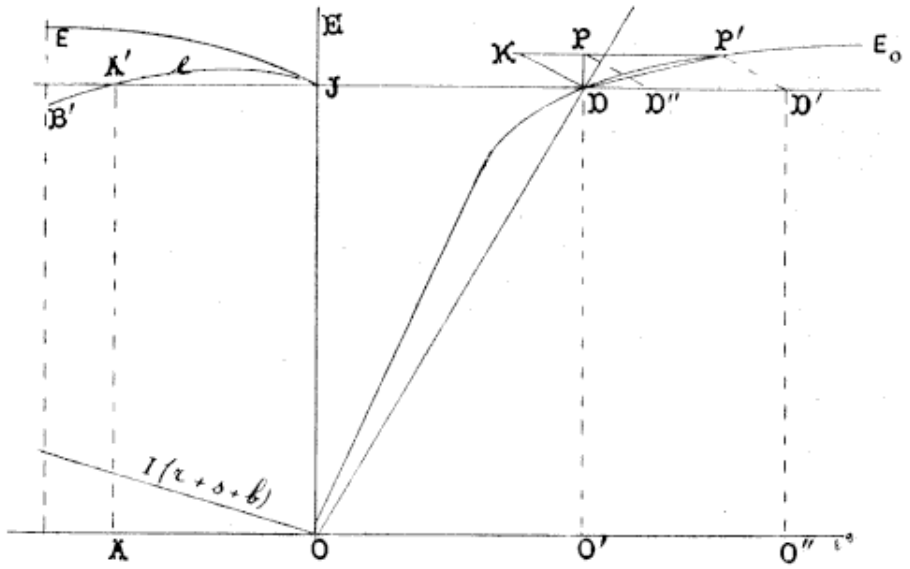


FIG. 86.

En effet, pour l'obtenir nous devons ajouter le supplément d'excitation O' O''. Dans celui-ci la portion D D'' équilibre la réaction d'induit, tandis que D'' D' fait monter le voltage jusqu'à un point permettant la chute D P nécessaire pour le fonctionnement au régime de pleine charge. K P' = D D' correspondra donc au supplément d'excitation à développer par l'intermédiaire du fil série, d'où l'on pourra aisément calculer le nombre de spires de ce dernier.

Afin de ne pas surcharger la figure, portons maintenant à gauche de O, en O A, une longueur égale à D D', c'est-à-dire proportionnelle au courant total de pleine charge I et reportons-la en A'. Nous avons ainsi un second point de la caractéristique externe, J étant le point correspondant au circuit ouvert.

Pour obtenir un point intermédiaire, il suffit de remarquer que : 1° le triangle à considérer alors est un triangle proportionnel à D P P' et 2° le point de ce triangle correspondant à P' doit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rester sur O E_o, tandis que le point correspondant à D doit se trouver sur la droite O D prolongée, puisque celle-ci marque les voltages appliqués aux balais de la machine.

Plus simplement, il suffira de mener par les divers points de la courbe D E_o des parallèles à D P' jusqu'à leur point de rencontre avec la droite O D, et le fragment d'ordonnée compris entre ces intersections et l'horizontale D D' donnera les excédents de voltage au-delà de O' D dus à la prépondérance initiale de l'enroulement série. En reportant ces excédents de voltage, nous obtiendrons la courbe J A' qui montre que la machine sera, entre ces limites, plus que compound ou *hypercompound* et au-delà moins que compound ou *hypocompound* (partie A' B').

En ajoutant aux ordonnées de la courbe *e* ainsi obtenue celles de la droite $e' = I(r + s + b)$, on obtient la caractéristique interne E.

Application des caractéristiques. — *Déterminer les conditions de fonctionnement d'une dynamo série à intensité constante dont le réglage se fait en shuntant l'enroulement série.*

Nous tracerons la caractéristique extérieure sans shunt O*e* (fig. 87), puis les caractéristiques extérieures Oe_1, Oe_2, Oe_3, obtenues avec des shunts de plus en plus forts.

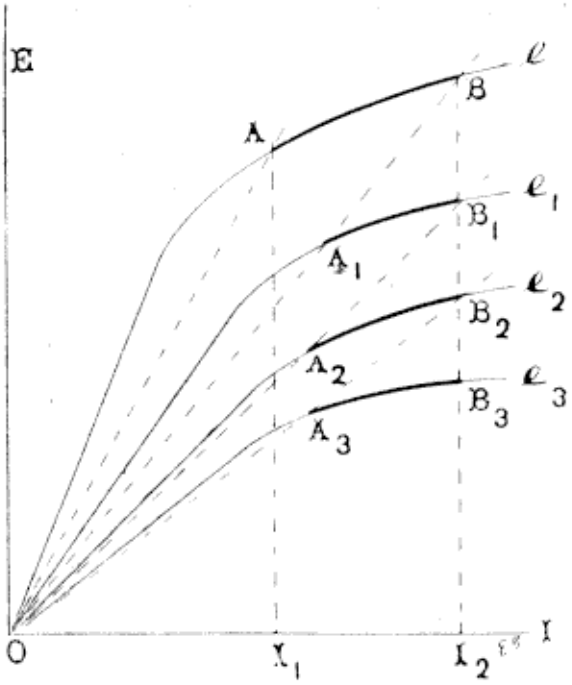


FIG. 87.

L'intensité ne pouvant varier qu'entre les limites I_1 et I_2, portons à l'échelle des ampères les longueurs I_1 et I_2 sur l'axe des I et élevons, aux points I_1 et I_2 des perpendiculaires à cet axe qui rencontreront la caractéristique O *e* en A et B. Tirons les droites A O et B O. Quand la résistance extérieure variera de $r =$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tg AOI à $r' = $ tg BOI, aucun shunt ne devra être employé. Si la résistance tombe en dessous de tg BOI, c'est au premier shunt qu'il faudra recourir pour rester dans les conditions imposées jusqu'à ce que la résistance tombe à la valeur tg B_1OI. Si elle tombe en dessous de cette valeur, il faudra passer au second shunt dont la portion A_2 B_2 de la caractéristique sera utilisée et ainsi de suite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE IV.

Moteurs à courant continu.

Lorsqu'on connecte une dynamo avec une source d'électricité à différence de potentiel constante et moyennant les précautions que nous indiquerons ci-après, on constate que l'induit se met à tourner. Son mouvement s'accélère jusqu'au moment où les résistances passives font équilibre au couple moteur. Si l'on observe, d'autre part, l'aiguille d'un ampèremètre inséré dans le circuit d'alimentation, on remarque que, très intense au début, le courant diminue graduellement, ce qui indique la production d'une force contre-électromotrice croissant avec la vitesse.

---

§ 1. — Considérations générales : puissance, couple, rendement.

Abstraction faite de toute hypothèse quant au mode de production du flux inducteur, considérons un induit à anneau fonctionnant d'abord comme générateur de courant et tournant dans le sens de la flèche 1 (fig. 88).

Le courant engendré se distribuera comme les flèches l'indiquent. L'intensité I circule dans le circuit extérieur, I/2 dans les deux moitiés de l'induit.

Supposons maintenant que nous envoyions dans la machine un courant de mêmes sens et intensité que celui qu'elle produisait comme dynamo. La distribution du courant et des flux magnétiques s'établira encore exactement de la même manière qu'auparavant. Toutefois, les spires tendant à faire entrer un flux maximum par leur face négative (celle par laquelle entrent

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les lignes de force développées par le courant qui les parcourt) ou, ce qui revient au même, à réduire le flux inducteur entrant par leur face positive, il est facile de voir que l'induit va être sollicité à tourner en sens inverse (flèche 2). L'application des diverses règles connues, notamment la règle des trois doigts, (T. 1, p. 163) nous conduirait à la même conclusion.

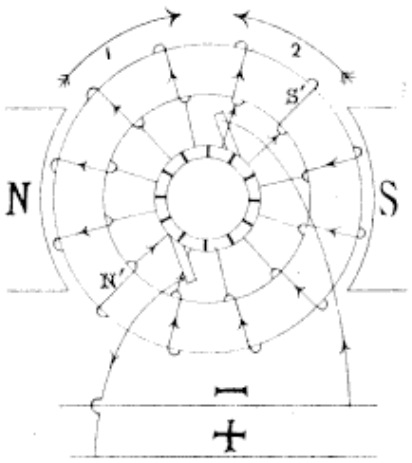


FIG. 88.

D'ailleurs, la circulation des courants dans l'induit va créer un pôle sud en S', un pôle nord en N'. Une attraction s'exercera entre N et S', N' et S, une répulsion entre S et S', N et N' et ces quatre actions concordantes tendent à faire tourner l'induit dans le sens indiqué.

Pour éviter le broutement du collecteur, les balais devront être retournés. On remarquera qu'ils se trouvent calés en arrière du mouvement, et symétriquement placés par rapport à la ligne neutre, à même régime de fonctionnement. On règle d'ailleurs leur position jusqu'à obtenir le minimum d'étincelles.

De même que dans le cas de la génératrice, les spires de l'induit sont partagées en deux groupes : d'une part, les spires antagonistes comprises dans le double de l'angle de calage; d'autre part, les spires donnant lieu à une force magnétomotrice transversale déformant le champ inducteur.

Si l'on avançait les balais de l'autre côté de la ligne neutre, les spires comprises dans le double de l'angle de calage favoriseraient la production du champ inducteur. On a pensé d'utiliser cette propriété pour établir des machines autoexcitatrices sans enroulement sur les inducteurs. Mais la présence d'étincelles irréductibles empêche d'atteindre ce but.

Courant absorbé, puissance et couple. — L'induit se déplaçant en sens inverse du mouvement qu'il avait dans le fonctionnement en générateur, et le champ magnétique étant resté le même, la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

force électromotrice induite sera de sens inverse à celle que la dynamo développait, c'est-à-dire opposée à la différence de potentiel E qu'il faut appliquer à la machine, pour la faire traverser par le même courant que primitivement.

Nous trouvons donc une force électromotrice E appliquée aux extrémités de la résistance des balais et de l'induit et, dans ce dernier, la force contre-électromotrice e. En vertu de la loi d'Ohm, l'intensité du courant traversant le système sera

$$i = \frac{E - e}{r}, \qquad (1)$$

r correspondant donc à ce que nous avons désigné précédemment par $r + b$; d'où nous tirons, en multipliant les deux membres par i :

$$i^2 r = Ei - ei \quad \text{ou} \quad Ei - i^2 r = ei.$$

Le terme $i^2 r$ représente la puissance dissipée par effet Joule dans l'induit et les balais; $Ei = P$ est la puissance électrique dépensée aux bornes. La différence $Ei - i^2 r$ correspond donc au travail mécanique transmis par l'axe, plus les diverses pertes dues à la rotation de l'induit, frottements dans les coussinets et dans l'air, hystérèse et courants de Foucault

$$Ei - i^2 r = ei = p + F \qquad (1')$$

ou, en faisant abstraction de ces pertes, $ei = p$.

Mais, en appelant $\mathfrak{N}$ le flux traversant l'induit, N le nombre de révolutions par seconde et n le nombre de spires, nous savons que la force électromotrice d'induction développée $e = n\mathrm{N}\mathfrak{N}$. Donc, en unités C. G. S.

$$p = ie = in\mathrm{N}\mathfrak{N}. \qquad (2)$$

L'induit s'est mis à tourner sous l'influence d'un couple moteur dont nous représentons la valeur par C quand le régime est atteint. A ce moment, le travail par tour est $2\pi C$ et la puissance $2\pi CN$. C'est une seconde expression de la puissance mécanique développée. En l'égalant à la première, il vient

$$2\pi C\mathrm{N} = in\mathrm{N}\mathfrak{N}, \quad \text{d'où} \quad C = \frac{in\mathfrak{N}}{2\pi}. \qquad (3)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Telles sont les trois équations liant les divers facteurs électriques de l'électromoteur.

N nombre de tours par seconde ayant disparu de l'équation (3), on voit qu'en négligeant les effets parasites, le couple moteur est indépendant de la vitesse; à flux magnétique constant absorbé par l'induit, il n'est fonction que de l'intensité du courant.

Rendement. — Enfin, le rendement industriel théorique de l'appareil sera représenté par

$$\frac{p}{P} = \frac{ei}{Ei} = \frac{e}{E} = \frac{E - ir}{E}.$$

e étant proportionnel à la vitesse de rotation de l'induit, plus la vitesse augmentera, plus le rendement sera élevé.

Fonctionnement théorique. — Voyons maintenant quelles sont les variations des facteurs électriques concurremment avec celles du couple résistant, et supposons d'abord celui-ci suffisant pour maintenir l'induit immobile.

Le courant qui traverse ce dernier est alors

$$I = \frac{E}{r}.$$

Il est maximum, car aussitôt que l'induit se met à tourner, la force contre-électromotrice vient diminuer la valeur du numérateur. Dans le cas envisagé, le moteur ne restituant aucun travail, le rendement est nul.

Lorsque le couple résistant est plus faible que le couple moteur, l'induit démarre et sa vitesse s'accélère jusqu'à ce que l'accroissement des résistances diverses dues au mouvement de l'induit compense l'excédent du couple moteur. Au fur et à mesure que la vitesse de l'induit augmente, e s'amplifie.

La puissance

$$p = ei = \frac{e(E - e)}{r}$$

commence par croître. Elle atteint un maximum obtenu en éga-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lant les deux facteurs e et $E-e$ dont la somme E est constante. On trouve $e = E/2$, ce qui donne pour valeur correspondante du courant, en portant cette expression dans l'équation (1)

$$i = \frac{E}{2r}.$$

La puissance restituée est donc maximum quand, le courant absorbé étant la moitié de celui qui traverserait l'induit maintenu immobile, celui-ci tourne avec une vitesse telle qu'il développe une force contre-électromotrice exactement égale à la moitié de la différence de potentiel appliquée.

Lorsque la puissance est maximum, le rendement a pour valeur :

$$\frac{E}{2E} = 50\ \%.$$

Si le couple résistant décroît indéfiniment, e continue à croître, i diminue, le rendement augmente, la puissance est de plus en plus réduite, pour arriver à zéro quand $e = E$, puisque alors le courant est nul.

Traçons les diagrammes. Portons sur un axe horizontal (fig. 89) des longueurs proportionnelles à e, c'est-à-dire à la vitesse de rotation de l'induit, et à leurs extrémités des ordonnées proportionnelles à

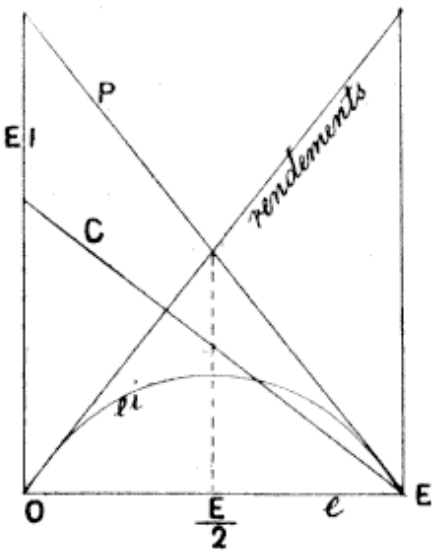


Fig. 89.

$$P = Ei = \frac{E(E-e)}{r}.$$

Pour $e = 0$, nous avons $P = EI$, valeur maximum. Pour $e = E$, $P = 0$. La droite représentative passe par le point E.

C'est également une droite analogue qui représentera les couples $C = \frac{E-e}{r}\frac{n\mathfrak{N}}{2\pi}$ puisque $\mathfrak{N}$ est supposé constant à part la réaction d'induit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La courbe des puissances restituées est représentée par l'équation

$$p = e\,i = \frac{e\,(\mathrm{E} - e)}{r}.$$

Pour $e = 0$, $p = 0$, la courbe passe par l'origine. Pour $e = \mathrm{E}$, $p = 0$, la courbe passe aussi par E. Nous savons que pour $e = \mathrm{E}/2$, la valeur de p est maximum et que le rendement est alors égal à 50 %. Élevons donc à l'abscisse E/2 une perpendiculaire et prenons la moitié de l'ordonnée correspondante P, nous aurons encore un point de la courbe. La tangente en ce point E/2 est horizontale, puisque la courbe y passe par un maximum. La courbe est d'ailleurs une parabole que nous pourrons aisément construire.

Traçons enfin la courbe des rendements :

$$\eta_{ti} = \frac{ei}{\mathrm{E}i} = \frac{e}{\mathrm{E}}.$$

Nous voyons que c'est également une droite passant par l'origine et par un point dont l'ordonnée à l'abscisse E est 1. Partant de zéro, le rendement croît graduellement et peut théoriquement atteindre l'unité, mais à ce moment la puissance est nulle. Il sera donc avantageux que le moteur fonctionne sur la seconde moitié de la courbe des p, de manière que le rendement soit suffisant.

La marche aux environs de la puissance maximum n'est pas avantageuse, vu le faible rendement qu'elle procure. Mais il y a plus : elle ne peut être admise qu'exceptionnellement et pendant quelques instants, au démarrage par exemple, à cause du courant très intense que la machine absorbe alors. La section des conducteurs n'est en effet calculée, par raison d'économie, que pour supporter, d'une manière permanente, le courant correspondant à la puissance normale.

Fonctionnement pratique. — Les diagrammes de la figure 79 correspondent à un cas théorique, dont on se rapproche d'autant plus que la puissance des machines est plus considérable, le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rendement croissant avec la puissance. En pratique, on s'en écarte donc plus ou moins. La puissance électrique p se trouve réduite des déchets F mécaniques, magnétiques et électriques que nous avons laissés de côté pour une première approximation. L'induit doit en effet vaincre les frottements des coussinets, de la résistance de l'air; enfin, l'hystérèse et les courants de Foucault absorbent une partie de la puissance disponible qui se dissipe en chaleur, de sorte que la puissance mécanique *utile* p_u que l'on peut recueillir sur l'axe, n'est qu'une fraction plus ou moins grande (en général relativement grande cependant) de *ei*. Le rendement industriel ou commercial devient :

$$\eta_{ii} = \frac{p_u}{P} = \frac{p_u}{Ei}.$$

Il est utile de le connaître, pour une machine donnée, aux diverses puissances qu'elle est susceptible de développer. Pour effectuer cette détermination, on monte sur l'axe de l'induit un frein de Prony, qu'on charge progressivement, et l'on mesure pour chaque charge, au moyen d'un ampèremètre inséré dans le circuit, d'un voltmètre branché en dérivation sur les bornes et d'un compte-tours, l'intensité du courant absorbé, le voltage et la vitesse de rotation de l'induit. On a alors tous les éléments pour dresser les diagrammes de la puissance électrique dépensée, de la puissance mécanique recueillie et du rendement industriel en fonction de la vitesse.

On obtient des courbes analogues à celles de la figure 90, dans laquelle nous reconnaissons les trois courbes théoriques de la figure 89 plus ou moins étalées.

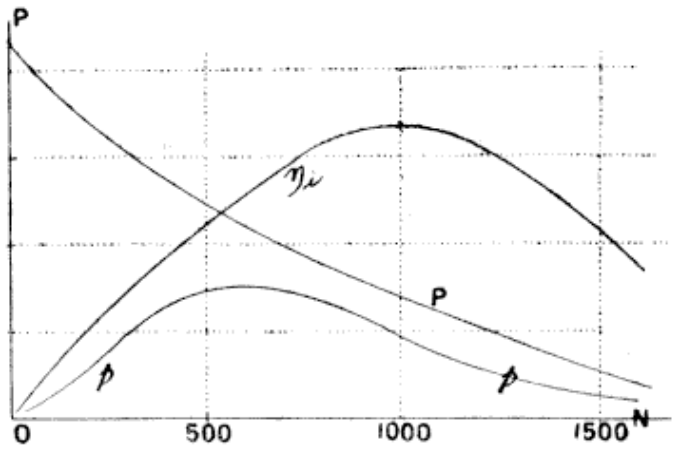


FIG. 90.

Il est à remarquer que le diagramme des rendements montre que ceux-ci gardent des valeurs élevées et peu dif-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

férentes pour une série de vitesses comprises entre de larges limites, propriété extrêmement précieuse des moteurs électriques.

Renversement du sens de la rotation. — Si l'on renverse le courant dans l'induit, les faces négatives des spires vont devenir positives et réciproquement, de sorte que les réactions électromagnétiques s'inversant, l'induit tournera en sens contraire.

Rendement dans le fonctionnement en générateur et en moteur. — Il est intéressant de comparer le rendement dans les deux cas du fonctionnement en générateur et en moteur. Soit un induit de résistance r traversé par un courant $I = i$ et développant la même force électromotrice $E = e$, qu'il fonctionne en générateur ou en moteur.

Le rendement du générateur est le rapport de la puissance utile aux bornes, elle-même égale à la différence entre la puissance électrique totale et l'effet Joule dans l'induit $EI - I^2r$, à la puissance dépensée pour le faire tourner $EI + F$. F comprenant les frottements mécaniques, la perte d'énergie due à l'hystérèse et aux courants de Foucault

$$\eta_{ig} = \frac{EI - I^2r}{EI + F}.$$

Le rendement du moteur s'obtient en faisant le rapport de la puissance récupérable sur son axe, soit $ei - F$, à la puissance électrique totale dépensée à ses bornes $ei + i^2r$ soit, puisque $i = I$ et $e = E$ par hypothèse,

$$\eta_{im} = \frac{EI - F}{EI + I^2r}.$$

La différence

$$\eta_{ig} - \eta_{im} = \frac{F^2 - (I^2r)^2}{(EI + F)(EI + I^2r)}$$

sera positive ou négative, c'est-à-dire que le rendement du générateur dépassera ou n'atteindra pas celui du moteur, selon que F est $\gtrless I^2r$. En général F l'emportant sur I^2r, le rendement en générateur dépassera celui en moteur. Toutefois, F et i^2r ne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

correspondant qu'à quelques °/₀ de la puissance totale, les rendements dans les deux cas ne diffèrent pas sensiblement.

On en déduit immédiatement un moyen de mesurer le rendement quand on possède deux dynamos semblables et une source suffisante d'électricité. Les deux induits sont accouplés rigidement, puis on fournit aux bornes de la première machine une puissance EI; on recueille aux bornes de l'autre une puissance E'I'. En appelant P la puissance mécanique transmise du premier induit au second, on a :

$$\eta_{1m} = \frac{P}{EI}; \quad \eta_{1g} = \frac{E'I'}{P} \text{ d'où } \eta_{1m}\eta_{1g} = \frac{E'I'}{EI}$$

et, puisqu'on suppose $\eta_{1m} = \eta_{1g} = \eta_1$

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{E'I'}{EI}}.$$

Il suffit donc, dans ce cas spécial, de deux voltmètres et ampèremètres, pour déterminer le rendement des deux machines.

Équations fondamentales. — Les équations trouvées plus haut,

$$i = \frac{E-e}{r} \ (1), \qquad p = ie = in\mathfrak{N}N \ (2), \qquad C = \frac{in\mathfrak{M}}{2\pi} \ (3),$$

vont nous permettre d'examiner les conditions de fonctionnement des divers genres d'électromoteurs.

Pour la clarté des discussions qui suivent, nous allons exprimer plus explicitement certains de leurs facteurs en fonction des autres.

Eliminons i de la valeur du couple et pour cela, remplaçons dans (3) i par sa valeur (1) et e par l'expression équivalente $n\mathrm{N}\mathfrak{M}$, nous trouvons une relation entre le couple, le flux et le nombre de tours

$$C = \frac{n\mathfrak{N}E - n^2\mathfrak{N}^2N}{2\pi r}. \qquad (4)$$

Enfin, substituant dans (1) la valeur de e, nous tirons l'expression du nombre de tours en fonction du flux et du courant

$$N = \frac{E-ir}{n\mathfrak{N}}. \qquad (5)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 2. — Divers types d'électromoteurs et leur fonctionnement

Le phénomène de réversibilité des dynamos étant général, on peut rencontrer, fonctionnant comme électromoteurs, les divers types de générateurs étudiés précédemment. En outre, les distributions d'électricité se faisant soit à intensité, soit sous tension constantes, nous aurons chaque fois à examiner les modifications qu'apportent ces deux systèmes d'alimentation dans la répartition du courant entre les divers organes de la dynamo, ainsi que les variations du champ inducteur et du couple qui s'ensuivent.

Nécessité d'employer un rhéostat de démarrage. — Il serait dangereux d'appliquer brusquement à un électromoteur la tension normale.

Considérons par exemple le cas de l'alimentation sous tension constante et une machine en dérivation. La perte dans l'induit n'atteint que 2 à 5 % de l'énergie totale absorbée, c'est-à-dire que l'on a

$$\frac{i^2 r}{\mathrm{E}\, i} = 0{,}02 \text{ à } 0{,}05 \text{ d'où } i = \frac{\mathrm{E}}{50\, r} \text{ à } \frac{\mathrm{E}}{20\, r}. \qquad (1)$$

L'intensité du courant, pendant la marche normale à pleine charge, c'est-à-dire dans les conditions les plus dures, est donc au plus égale à $\frac{\mathrm{E}}{20\, r}$, et l'enroulement des moteurs se calcule pour ces conditions de fonctionnement, c'est-à-dire pour un débit constant de i.

Si l'on appliquait brusquement la tension totale E, on voit d'après (1) que le courant atteindrait une intensité de 50 à 20 fois plus considérable que celle maximum permanente et l'induit serait brûlé. Par conséquent le courant de démarrage devra être limité par un rhéostat. Appelons R la résistance de ce dernier. Nous aurons pour l'intensité initiale du courant $i' = \frac{\mathrm{E}}{r + \mathrm{R}}$ et pour que i' soit au plus égal au maximum de i, il faut que $r + \mathrm{R} = 20r$, d'où $\mathrm{R} = 19r$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ainsi, à condition d'insérer au début du démarrage une résistance égale à 19 fois la résistance de l'induit, le courant ne dépasse pas l'intensité normale. Au fur et à mesure que la vitesse angulaire de l'induit s'accroît, on pourra réduire progressivement le rhéostat, jusqu'à le supprimer complètement, quand la vitesse normale est atteinte.

Divers types de rhéostats de démarrage. — Rhéostat liquide. — On emploie parfois, par raison d'économie, surtout quand il s'agit de grandes intensités, un dispositif à liquide dans lequel deux pièces ou séries de pièces en fer A, B (fig. 91), raccordées, respectivement aux conducteurs d'amenée et de départ du courant, isolées l'une de l'autre et commandées par un levier, une manivelle et, éventuellement, des engrenages pour éviter les à-coups, plongent dans un bain de carbonate de soude dissous dans l'eau. Quand les pièces mobiles sont à fond de course, des mâchoires métalliques M_1M_2 les mettent en court-circuit.

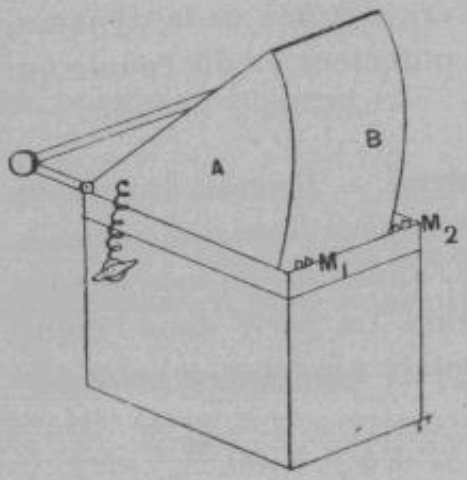


Fig. 91.

Les inconvénients de ces rhéostats sont que les pièces métalliques se dissolvent à la longue dans le liquide et que celui-ci s'évapore. En outre, quand la tension est élevée, de fortes étincelles jaillissent à sa surface.


Fig. 92.

Rhéostat métallique en boudins. — Les rhéostats métalliques en boudins sont meilleurs et plus employés. Ils consistent généralement (fig. 92) en un cadre de fer supportant une résistance roulée en spirales ou boudins soutenus à leurs extrémités par des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

isolateurs en porcelaine et rattachés d'un côté à des plots isolés, disposés en arc de cercle, sur lesquels vient appuyer un levier de contact. Les touches sont assez rapprochées pour que le levier ne quitte pas l'une d'elles sans déjà reposer sur la suivante, ceci pour éviter des interruptions du circuit. Le métal employé est souvent le maillechort ou le ferro-nickel.

Rhéostat émaillé (Ward Leonard). — On utilise beaucoup, actuellement, des rhéostats émaillés, comportant une lame très mince de métal résistant (0,05 millimètre d'épaisseur environ) et de largeur proportionnée au courant qui doit la traverser. Cette lame, repliée en bandes ondulées parallèles (fig. 93), est noyée dans un émail isolant coulé à l'intérieur d'une auge métallique. La faible épaisseur de la bande empêche la rupture de l'émail sous l'effet des dilatations. Les coefficients de dilatation du métal et de l'émail sont d'ailleurs extrêmement voisins.

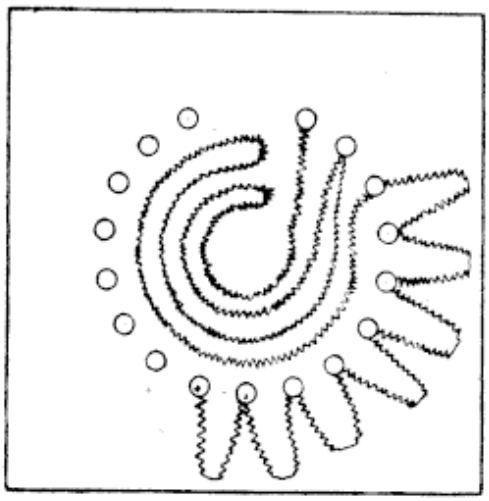


Fig. 93.

Moteur magnéto et moteur à excitation indépendante. — I **constante.** — $\mathcal{M}$ étant constant, à part l'effet d'ailleurs faible de la réaction d'induit, l'équation (3) indique que le couple est constant et cela à toutes les vitesses (ligne barres et points, fig. 94).

E **constante.** — $\mathcal{M}$ étant constant, l'équation (4) montre que le diagramme des couples en fonction des vitesses est une droite A B (fig. 94) très inclinée sur l'axe des vitesses à cause de l'importance de son coefficient angulaire $-\frac{n^2\mathcal{M}^2}{2\pi r}$. La vitesse est donc sensiblement constante à toutes charges.

Au démarrage, un rhéostat de résistance suffisante devra être

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mis en série avec l'induit, pour éviter que ce dernier ne soit traversé par un courant trop intense.

Le couple s'annule pour $N' = \frac{E}{n\mathfrak{M}}$. C'est le point A. n et $\mathfrak{M}$ étant restés constants, le couple ne peut s'annuler que si i lui-même se réduit à zéro (3). Mais pour qu'il en soit ainsi, il faut (1) que $e = E$ et le nombre de tours est alors celui maximum que l'induit peut atteindre de lui-même, puisque $e = nN\mathfrak{M}$.

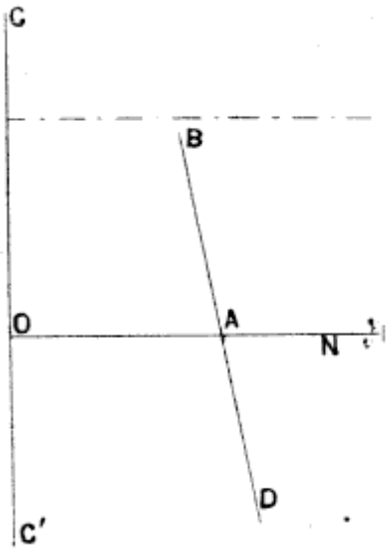


Fig 94.

En réalité, ce nombre de tours théorique N' n'est jamais atteint, puisque les diverses pertes d'énergie se produisant dans l'induit (frottements mécaniques, etc.) font annuler le couple moteur avant le courant.

Si le couple résistant change de signe en devenant moteur, la vitesse s'accélère encore, e l'emporte sur E, le courant se renverse ; nous sommes dans le cas de la génératrice, partie AD de la droite.

Moteur série. — I constante. — Si les barres + et — (fig. 95) sont insérées en série dans une canalisation dont l'intensité du courant est maintenue constante, on voit que le courant traversant les inducteurs et l'induit reste constant. Le flux $\mathfrak{M}$ ne se modifie pas et la valeur du couple (3) reste invariable (traits barres et points, fig. 96).

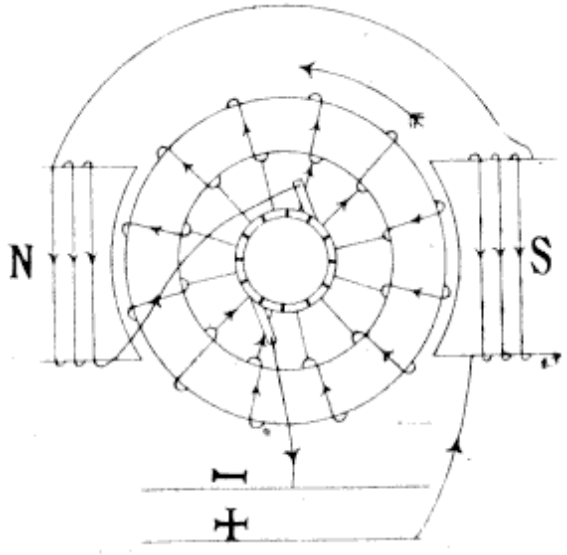


Fig. 95.

Par conséquent, le moteur ne démarre que pour autant que le couple moteur soit supérieur au couple résistant. Si la charge diminue,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la vitesse s'accélère jusqu'à ce que les résistances passives, qui sont fonction de la vitesse, compensent la diminution de charge. Pour une charge nulle, la vitesse peut devenir excessive.

L'indépendance du couple et de la vitesse se met aisément en évidence, comme l'a fait M. Marcel Deprez, en fixant sur la poulie d'un moteur série, un frein de Prony chargé d'un poids fixe. En appliquant à la machine une différence de potentiel croissante, on constate que le courant croît jusqu'au moment où l'induit se met en mouvement, c'est-à-dire jusqu'au point où le couple moteur vainc le couple résistant. Le courant garde alors une valeur invariable, et les renforcements de la force électromotrice appliquée ne provoquent plus qu'une accélération de la vitesse (5).

Modification de la vitesse. — A chaque régime caractérisé par un couple résistant constant, correspond une vitesse déterminée. En vertu de (3), i étant constant, le couple moteur est proportionnel au flux. Si donc on augmente celui-ci, le couple moteur augmente. Le couple résistant étant resté le même, l'induit va accélérer son mouvement jusqu'au moment où les résistances passives dues à l'augmentation de la vitesse compenseront l'excédent de l'effort moteur. Si on réduit le flux, la vitesse diminue.

Les modifications du flux s'obtiennent, soit en diminuant ou augmentant le nombre de spires actives des inducteurs, soit, système Thury, en shuntant l'inducteur par une résistance variable.

E **constante.** — Si maintenant les 2 barres + et — (fig. 95) sont maintenues sous tension constante, le courant et, par suite, le champ seront maximums au démarrage. Pour ce double motif, le couple C est maximum et extrêmement énergique. Puis, au fur et à mesure que la vitesse s'accélère, la force contre-électromotrice augmente et le courant diminue. Le régime s'établit quand le couple moteur équilibre le couple résistant.

Le couple $C = \frac{i\, n\, \mathfrak{N}}{2\,\pi}$. Si les noyaux du moteur ne sont pas

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

saturés, on pourra poser $\mathfrak{M} = ki$. La valeur du couple peut donc s'écrire

$$C = \frac{i^2 n k}{2\pi} = K i^2 = \frac{K (E - e)^2}{r^2} = K' (E - n N \mathfrak{M})^2.$$

La courbe représentative est parabolique (trait plein, fig. 96).

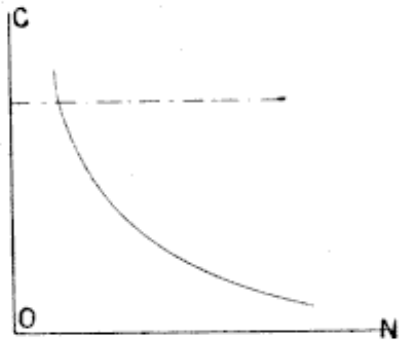


FIG. 96.

Si les noyaux sont saturés, c'est-à-dire si $\mathfrak{M}$ reste constant, l'équation (4) montre que la fonction représentant C relativement à N devient linéaire.

Lorsque la charge disparaît, le moteur s'emballe. En effet, l'équilibre entre le couple résistant très faible même à de grandes vitesses, et le couple moteur, ne peut être obtenu que par la réduction de ce dernier, ce qui exige que i et par suite le champ soient faibles (3). Or i ne peut diminuer que moyennant l'augmentation de la force contre-électromotrice (1), ce qui exige que l'induit prenne des vitesses de rotation excessives, puisque le flux diminue avec i.

Cet inconvénient ne se produit pas dans les petits moteurs, où les résistances passives sont relativement élevées, mais l'intégrité des grandes machines pourrait se trouver compromise; aussi l'emploi des moteurs série fonctionnant sous potentiel constant est limité à quelques cas spéciaux, comme celui des tramways, où leur énergique couple de démarrage est particulièrement avantageux.

MODIFICATION DE LA VITESSE. — Nous venons de voir (expériences de Marcel Deprez) qu'en modifiant la différence de potentiel appliquée aux bornes du moteur série, la vitesse se modifie parallèlement. Sous potentiel constant, on réalisera cette modification en plaçant en série, avec la machine, des résistances que l'on supprimera, partiellement ou totalement à volonté. Ce système présente l'inconvénient de consommer inutilement de l'énergie dans des résistances.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il existe un moyen plus économique d'atteindre le résultat. De l'équation (5)

$$N = \frac{E - ir}{n\mathfrak{F}},$$

on tire

$$N = \frac{E - \frac{\mathfrak{F} r}{k}}{n\mathfrak{F}} = \frac{\frac{E}{\mathfrak{F}} - \frac{r}{k}}{n}$$

et l'on voit qu'en réduisant le flux, la vitesse augmentera et vice-versa.

Le moyen le plus employé pour modifier le flux, consiste à *shunter l'enroulement inducteur par une résistance variable.*

Renversement du sens de rotation. — Quand on renverse le courant dans une canalisation alimentant un moteur série, on remarque que, si les faces négatives des spires sont devenues positives et réciproquement, d'autre part, la direction du champ inducteur s'est inversée également, de sorte que les réactions électromagnétiques restent les mêmes et l'induit continue à tourner dans le même sens.

Pour intervertir la rotation, il y a donc lieu, solution générale, de ne renverser le courant que soit dans l'inducteur, soit dans l'induit. On évitera de grandes réactions inductives en produisant, avant renversement, l'extinction graduelle du courant au moyen de rhéostats appropriés et en augmentant de même, progressivement, l'admission du courant inverse.

Dans le cas où les changements de rotation ou de régime sont fréquents, comme dans les tramways, on s'affranchit de tout décalage des balais, par l'emploi de frotteurs en charbon qui se fixent perpendiculairement au collecteur et que l'on cale suivant la ligne neutre théorique. Les machines série, comme nous l'avons fait remarquer, ont d'ailleurs une réaction d'induit à peu près invariable à toutes charges.

Emploi du moteur série. — On recourt au moteur série quand il faut obtenir un grand couple de démarrage; opérer un réglage simple de la vitesse dans des limites très étendues; exercer des efforts considérables à vitesse réduite (deux fois le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

couple normal pour un courant 1,5 fois plus grand que le courant normal) et de faibles efforts à des vitesses élevées.

Son inconvénient est de s'emballer à vide.

Il convient donc spécialement pour les applications demandant un couple puissant au démarrage et *où le moteur est constamment sous le contrôle direct de l'opérateur* (appareils de levage, tramways).

Moteurs en dérivation.— I **constante.** — Lorsqu'on introduit un tel moteur dans une canalisation à courant constant (fig. 97), l'induit étant extrêmement peu résistant absorbera un courant i presque égal au courant total. L'intensité i_d passant dans les inducteurs est par conséquent minime, ainsi que le flux et le couple moteur

$$C = \frac{in\mathfrak{N}}{2\pi}.$$

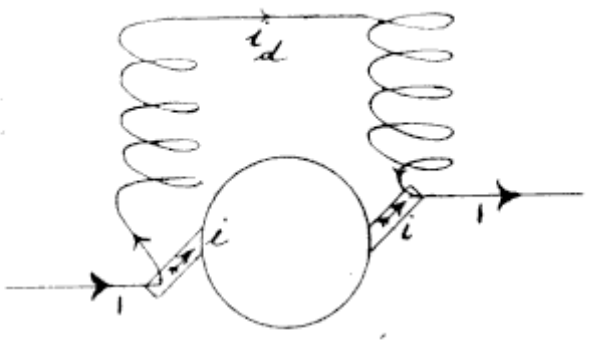


FIG. 97.

Si néanmoins le couple résistant est plus faible que celui-ci, l'induit démarre et la force contre-électromotrice qu'il développe augmentant avec la vitesse, force une partie de plus en plus grande du courant à passer par les inducteurs, ce qui augmente le champ et par suite le couple.

Si au contraire le couple résistant est plus grand que le couple moteur initial, il y a lieu d'introduire en série, avec l'induit, une résistance qui amplifie suffisamment le courant inducteur pour provoquer le démarrage, et que l'on retire ensuite peu à peu.

Quoi qu'il en soit, le couple croîtra. En vertu de la première loi de Kirchhoff,

$$i + i_d = \mathrm{I}.$$

Tant que l'on n'aura pas atteint le coude de la courbe du magnétisme, on pourra écrire

$$\mathfrak{N} = ki_d,$$

k étant une constante.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En remplaçant i et $\mathfrak{N}$ par leur valeur dans l'expression du couple, il vient

$$C = \frac{(I - i_d)\, nki_d}{2\pi} = k_1 (I - i_d)\, i_d.$$

Nous trouvons dans l'expression du couple le produit de deux facteurs variables dont la somme est constante. Le produit est maximum quand les deux facteurs sont égaux, c'est-à-dire quand $i_d = I/2$. Donc, la *valeur du couple atteindra son maximum, quand le courant bifurquera par parties égales dans l'induit et les inducteurs.* La vitesse de l'induit continuant à s'accélérer, une partie de plus en plus grande du courant passera dans les inducteurs, de sorte que le couple diminuera par réduction de i, l'augmentation de $\mathfrak{N}$ se réduisant de plus en plus quand on approche de la saturation.

En résumé, le diagramme du couple en fonction de la vitesse affectera la forme de la courbe en traits et points de la figure 98.

E **constante.** — Soumises à une différence de potentiel constante, les spires inductrices sont traversées par un courant maximum et par suite développent un flux considérable ; l'induit, malgré l'intercalation d'un rhéostat de démarrage, laisse passer un courant intense; le couple est maximum au démarrage. Puis, au fur et à mesure que la vitesse augmente, la force contre-électromotrice réduit le courant dans l'induit (1), le couple diminue (3) et se proportionne a l'effort résistant.

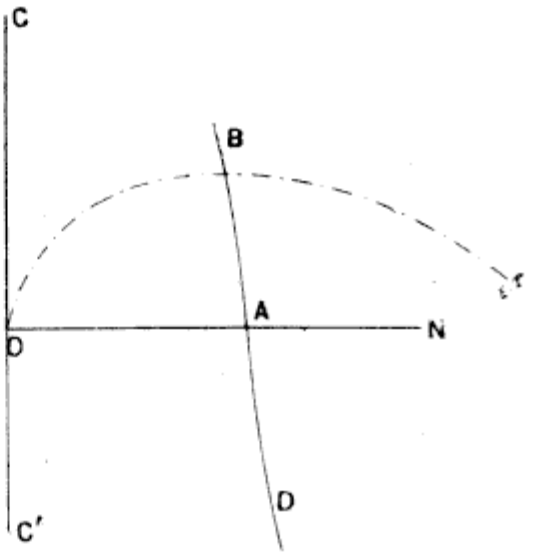


FIG. 98.

La vitesse reste à peu près constante à toutes charges, car, d'après l'équation (5), lorsque i augmente, la réaction d'induit s'amplifie et réduit le flux $\mathfrak{N}$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

traversant l'armature, de sorte que le numérateur et le dénominateur de N diminuant simultanément, la fraction varie peu, (AB fig. 98).

Le moteur shunt est donc auto-régulateur, qualité précieuse, qui a fait multiplier son emploi dans les applications industrielles. En outre, si son couple résistant change de signe, c'est-à-dire devient moteur, e prend une influence prépondérante, le courant se renverse dans l'induit, mais non dans les inducteurs, de sorte que le moteur se transforme en générateur fournissant de l'énergie à la canalisation qui l'alimentait, AD (fig. 98). Cette récupération est, cela va sans dire, essentiellement économique.

Modification de la vitesse. — La chute de potentiel ir étant toujours très faible, l'équation (5) peut s'écrire : $N n \mathfrak{F} = E =$ constante et l'on voit que pour augmenter la vitesse, il faut diminuer le flux et réciproquement, ce qui se fait en agissant sur le rhéostat de champ dont sont presque toujours munies les installations de moteurs.

La discussion de l'équation (4) conduirait à la même conclusion.

Renversement du sens de rotation. — On intervertira, comme toujours, le sens du courant dans l'induit seul.

Emploi du moteur shunt. — Le moteur en dérivation possède un couple de démarrage plus faible que celui du moteur série; par contre, l'emballement n'est pas à craindre, la vitesse variant dans des limites très étroites, 4 à 5 % entre la marche à vide et la marche à pleine charge. Son emploi est tout indiqué, quand l'installation commandée requiert une marche continue, régulière et non continuellement surveillée.

Schémas d'installation. — A titre d'exemple, donnons le schéma de l'installation d'un moteur. Les conducteurs d'amenée du courant aboutissent, par l'intermédiaire d'un tableau de distribution et après passage par un fusible F, à deux barres A et B (fig. 99), desquelles se détachent, d'une part, un conducteur se rendant à l'ampèremètre I et à la manette C du rhéostat de dé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

marrage ; d'autre part, à un conducteur se raccordant au balai d'où le circuit bifurque vers l'induit et l'enroulement inducteur.

Dans la position figurée, aucun courant ne passe dans l'installation. Dès que l'on déplace vers la droite la manette C, le courant est admis dans les inducteurs et, par l'intermédiaire du rhéostat, dans l'induit.

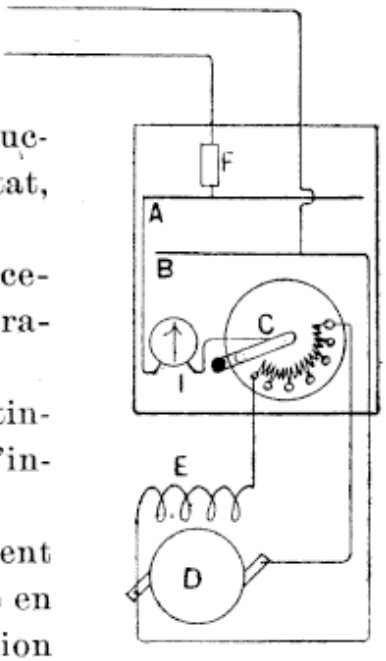


Fig. 99.

En continuant le mouvement de déplacement vers la droite, la résistance est graduellement retirée de l'induit.

A la rupture il ne se produit pas d'étincelle, vu la fermeture permanente de l'inducteur sur l'induit et le rhéostat.

Cette disposition présente l'inconvénient de placer tout le rhéostat de démarrage en série avec les inducteurs dans la position normale, d'où perte inutile par effet Joule.

On peut aisément supprimer le rhéostat en le munissant d'une lame circulaire de court-circuit CC' (fig. 100), sur laquelle appuie constamment la manette M.

Lorsque celle-ci se trouve sur le 3e plot, par exemple, l'entièreté de la tension est encore appliquée à l'inducteur, mais il ne reste plus en série avec l'induit, que la partie du rhéostat située à droite de M.

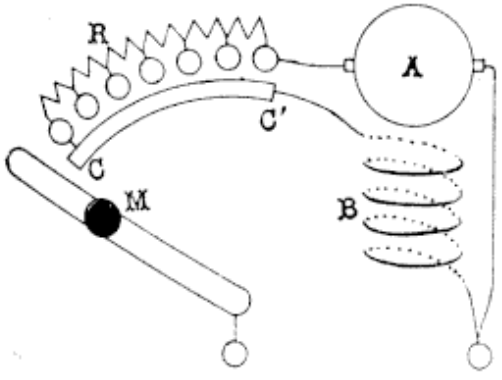


Fig. 100.

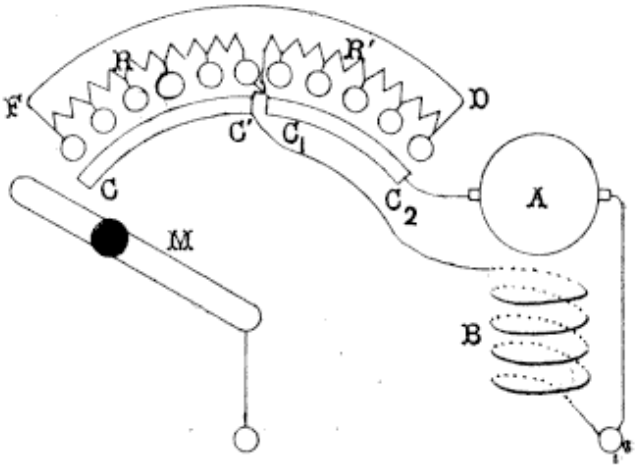


Fig. 101.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin, si l'on ajoute une seconde lame circulaire C_1C_2 (fig. 101), et que l'on subdivise la résistance en deux parties R et R' respectivement reliées à C_1C_2 et CC', on aura la latitude de dépasser la vitesse normale dans une certaine mesure. En effet, au-delà de C', on insère tout ou partie de la résistance R' en série avec les inducteurs, ce qui réduit le courant d'excitation. La jonction FD a pour objet de former un circuit fermé de l'induit, de l'inducteur et du rhéostat, ce qui empêche toute étincelle à la rupture du circuit.

Moteurs compounds. — ENROULEMENTS CONCORDANTS. — Les machines compounds, étudiées précédemment, ont des caractéristiques mécaniques qui tiennent naturellement le milieu entre celles des moteurs série et shunt. A potentiel constant, notamment, le diagramme de la vitesse en fonction du couple sera une courbe AB (fig. 102) peu incurvée et assez fortement inclinée sur l'axe des C.

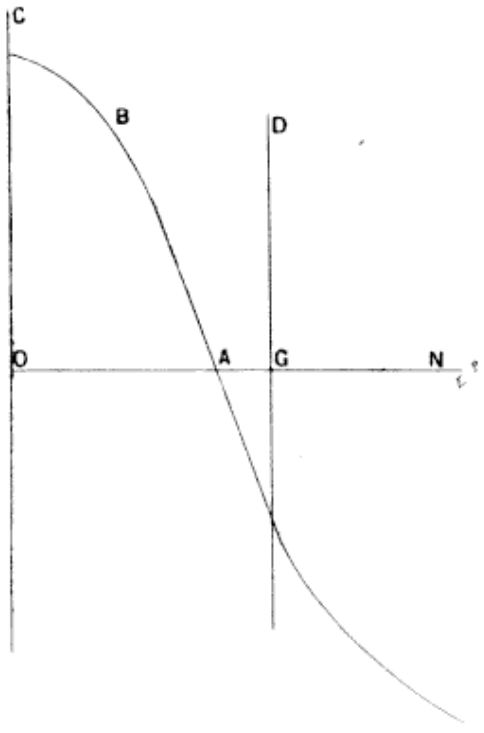


FIG. 102.

Le moteur compound concordant combine les avantages du fort couple de démarrage du moteur série et de l'auto-réglage approximatif du moteur en dérivation.

Il est tout indiqué pour la commande individuelle des machines-outils à vitesse sensiblement constante exigeant le développement soudain d'un fort couple moteur ou des démarrages fréquents, telles que perçoirs, cisailles, machines a cintrer, pilons pneumatiques, ainsi que les machines à mouvement alternatif comme les raboteuses et mortaiseuses.

ENROULEMENTS DIFFÉRENTIELS. — Si l'application que l'on a en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vue exige une très grande constance de la vitesse, on emploiera une machine compound à enroulements différentiels, c'est-à-dire dont l'enroulement série agit en sens inverse de l'enroulement dérivé.

En effet, l'équation (5)

$$N = \frac{E - ir}{n\mathfrak{R}}$$

montre que, le numérateur diminuant par augmentation de i, la constance de N ne peut être obtenue qu'en réduisant proportionnellement le dénominateur également, c'est-à-dire $\mathfrak{R}$. On enroulera donc les spires en série en sens inverse de l'enroulement en dérivation, et dès lors le diagramme peut devenir une droite GD (fig. 102) parallèle à l'axe des C.

Certaines précautions doivent être prises au démarrage, à cause de la grande intensité traversant les spires en série qui pourrait renverser le champ et faire démarrer le moteur en sens inverse. On supprime donc l'enroulement série à la mise en marche, au moyen d'un commutateur, ou mieux, on y renverse à ce moment le courant, pour ne rétablir les connexions normales que lorsque la marche régulière est obtenue.

Moteur cuirassé. — Quand le moteur doit être installé dans un endroit particulièrement exposé aux poussières, à l'humidité, aux gaz ; ou d'accès difficile, ce qui a pour effet de réduire l'entretien, il est nécessaire qu'il soit complètement enveloppé (fig. 103) de manière à mettre ses organes complètement à l'abri. Dans ce cas la machine est hermétiquement fermée. On la munit du côté du collecteur, suivant sa puissance, d'un ou deux couvercles montés sur charnière, pour faciliter l'accès au collecteur et aux porte-balais.

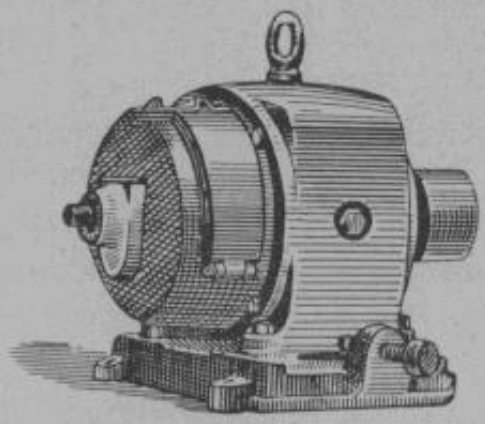


Fig. 103.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Puissance approximative d'un moteur. — M. Snell a établi les formules suivantes, donnant la puissance mécanique approximative disponible sur l'axe d'un moteur :

$P = 0{,}03\ ld^2N$ watts pour les machines à anneau ;
$P = 0{,}045$ » » à tambour.

Quelques cas particuliers d'application des moteurs. — Quand il s'agit de moteurs puissants, la construction de rhéostats de démarrage présente des difficultés et leur emploi ne va pas sans une perte sensible d'énergie, quand ils doivent faire démarrer fréquemment des masses considérables.

Emploi d'accumulateurs. — On peut utiliser, dans ce cas, une batterie d'accumulateurs que l'on fractionne en un certain nombre de groupes appliqués successivement en série à l'aide d'un commutateur approprié, de manière à augmenter progressivement la vitesse.

Système Léonard. — Le gros moteur à faire démarrer sous charge A (fig. 104) peut être connecté avec une génératrice G montée sur le même arbre qu'un autre moteur M. Celui-ci est mis en marche *à vide*, à l'aide d'un rhéostat ordinaire. On excite alors progressivement G, de manière à faire monter la tension jusqu'à celle du réseau. Dès que le moteur A qui s'est mis en marche lentement atteint la vitesse de régime, on le branche sur le réseau sans perdre de puissance, ni provoquer d'afflux brusque de courant et par suite une baisse générale de voltage dans les circuits.

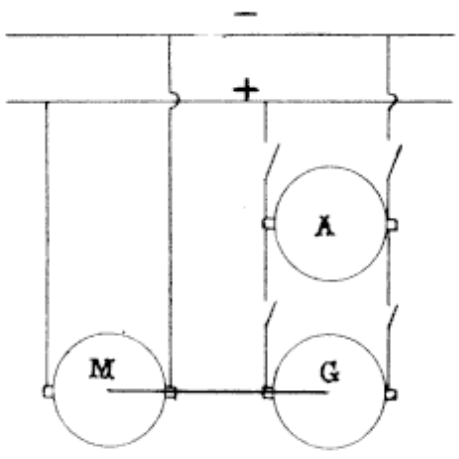


Fig. 104.

Système Ilgner. — Dans celui-ci, beaucoup employé pour les machines d'extraction et de laminoirs, l'arbre de groupe MG porte un gros volant ; d'autre part A n'est alimenté que par G, en courant continu, tandis que M est, en général, un moteur à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courants alternatifs (triphasés). Cela posé, l'énergie des démarrages est exclusivement empruntée au volant, dont la vitesse baisse légèrement. Dès qu'on est à faible charge ou à vide, le volant accélère ; il diminue de vitesse pendant les démarrages. Si sa masse est bien calculée, son effet régulateur est tel que l'usine centrale travaille sensiblement sous charge constante.

MOTEUR DE TENSION DOUBLE DE CELLE DU RÉSEAU.— Le moteur M (fig. 105) est de tension double de celle du réseau, du moteur *m* et de la génératrice G montés sur un même arbre, et marchant constamment à une allure sensiblement constante.

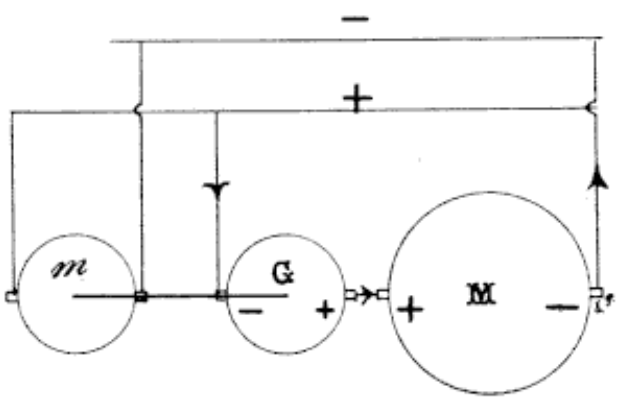


FIG. 105.

Quand M est inactif, la génératrice G fonctionne comme moteur et actionne le moteur *m* qui agit comme génératrice et est excité de manière à donner aux bornes une tension égale à celle du réseau. Le moteur G fonctionne alors presque à vide, son courant traversant l'induit du moteur principal.

Si l'on diminue alors l'excitation de G, sa vitesse augmente et la génératrice *m* fournit un courant s'ajoutant à celui du moteur G. En diminuant cette excitation de plus en plus, le courant absorbé par G devient suffisant pour faire démarrer M, dont la vitesse augmente progressivement. Par suite de la réduction de la tension disponible à ses bornes, le moteur G finit par ralentir et le courant s'inverse dans *m* qui fonctionne comme moteur. On annule alors l'excitation de G, de sorte que le gros moteur M se trouve alimenté sous la tension du réseau. En renversant l'excitation de G qui est devenue génératrice et l'augmentant peu à peu, la vitesse du moteur M s'amplifie pour atteindre finalement la vitesse normale. A ce moment il absorbe par exemple 1000 volts, tandis que G en fournit 500 en tension avec le réseau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Projet d'installation d'un moteur. — Un cas se présentant souvent est celui du remplacement de toute une installation mécanique : arbres, poulies et courroies, par un moteur actionnant directement l'arbre de couche principal de l'atelier.

De la puissance dépensée pour entraîner le tout, on pourra aisément déduire la puissance nécessaire à la partie de la transmission qui subsiste. On connaîtra, d'autre part, la vitesse de rotation à assurer, ce qui fournit les éléments permettant de déterminer les facteurs électriques du moteur à commander.

Exemple. — *Supposons qu'il faille installer un moteur de dix chevaux dans un atelier.*

Imposons-lui un rendement de 0,75. Pour qu'il reste 10 chevaux ou 7.360 watts disponibles sur l'axe moteur, nous devons dépenser $\frac{7.360}{0,75} = 9.813$ watts aux bornes de la machine.

En admettant que l'usine où doit être installé le moteur possède une source électrique de puissance suffisante au voltage de 220 volts, et que nous perdions 5 % de voltage dans la canalisation reliant la source au moteur, il restera $220 . 0,95 = 209$ volts aux bornes du moteur.

Comme celui-ci doit absorber 9.814 watts pour satisfaire au problème, il devra nécessairement être traversé par un courant de $\frac{9.813}{209} = 47$ ampères.

On commandera donc une dynamo de 0,75 de rendement industriel, fournissant 210 volts et 50 ampères. On amènera la vitesse au taux voulu, au moyen de dispositifs mécaniques appropriés aux circonstances locales.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE V

Couplage et essai des dynamos.

§ 1. — Couplage.

La consommation d'énergie dans une usine électrique est généralement très irrégulière. A certaines heures la demande est extrêmement faible, pour atteindre à d'autres une grande valeur. Si l'on ne desservait l'usine que par une seule grande machine, celle-ci ne fonctionnerait la plupart du temps qu'à faible charge, c'est-à-dire dans de mauvaises conditions de rendement. Il y a donc lieu, pour obtenir un rendement moyen convenable, de subdiviser la puissance maximum que la station doit être à même de développer en un certain nombre d'unités d'importance moyenne, que l'on met successivement en service suivant nécessité.

Au point de vue électrotechnique proprement dit, la question qui se pose alors est de mettre en activité sur le réseau de nouvelles dynamos, sans apporter aucune perturbation dans le fonctionnement général. En principe, *il faut que* par la disposition adoptée, *le sens du courant d'excitation d'une quelconque des machines conjuguées ne puisse jamais s'intervertir* afin d'éviter que la force électromotrice développée dans son induit ne s'inverse également.

Dynamos série. — Le couplage des dynamos série, en tension, ne présente aucune difficulté (fig. 106).

Pour le groupement en dérivation (fig. 107), il faut remarquer que si la vitesse de l'une d'elles fléchissait au point que sa force

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

électromotrice fût moindre que la différence de potentiel régnant à ses raccords avec les barres générales + et — du tableau, elle se trouverait traversée par un courant de sens inverse à celui qu'elle débitait, lequel renverserait sa polarité et tendrait à la faire tourner comme moteur, en sens inverse de la machine l'entraînant.

Un courant extrêmement intense la traverserait, ferait fonctionner les appareils de sûreté, ce qui l'isolerait du circuit et

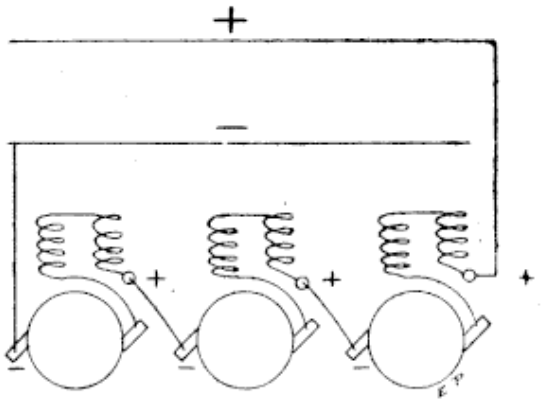


Fig. 106.

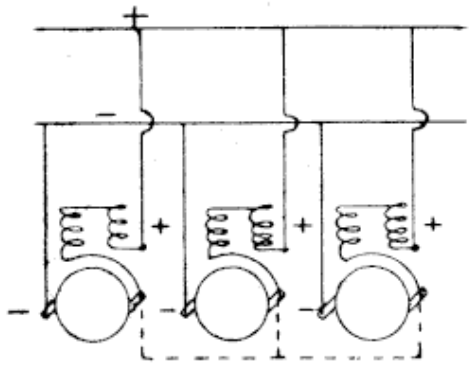


Fig. 107.

rendrait difficile son amorçage ultérieur, vu le sens du nouveau magnétisme rémanent. Au cas où des interrupteurs à minima l'auraient simplement isolée du circuit avant que le courant ne soit renversé, une nouvelle mise en marche serait nécessaire.

On évite ces inconvénients en réunissant en dérivation les bobines inductrices de toutes les machines par un fil dit *de compensation ou d'équilibre*, représenté en trait interrompu sur la figure 107.

Dès lors, un courant de même sens est toujours soutenu dans les inducteurs et, si un induit vient à ralentir au point de devenir le siège d'un courant inverse, il fonctionne aussitôt comme moteur, entraîne sa transmission et tend à rétablir la vitesse du régime. Cette irrégularité peut aisément être décelée par l'indication de galvanoscopes insérés dans le fil d'équilibre, entre les diverses unités. En temps normal ces appareils doivent marquer zéro.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dynamos en dérivation. — Le simple groupement en série des dynamos shunt, rend possibles des renversements de pôles, car si les inducteurs de l'une d'elles sont traversés par le courant provenant de l'induit des autres, elle produit une force électromotrice opposée. On empêche cet effet de se manifester en réunissant séparément en série (fig. 108) induits et inducteurs, mis les uns et les autres en dérivation entre les bornes extrêmes. Si alors une des machines ralentit, ses inducteurs restent néanmoins traversés par un courant de même sens que précédemment et le signe de la polarité reste invariable.

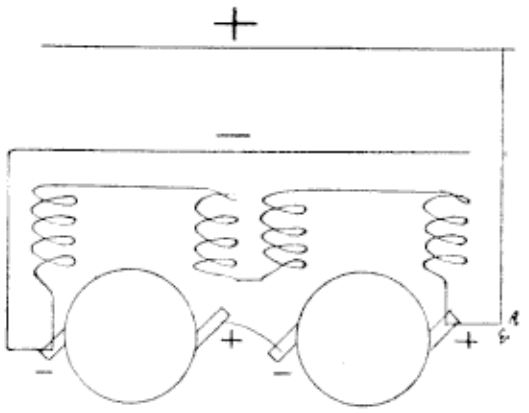


FIG. 108.

Dans le groupement en dérivation (fig. 109), l'inversion de polarité ne peut se produire puisque, comme nous l'avons déjà fait remarquer, le courant dans les inducteurs reste de même sens, que la force électromotrice prépondérante réside dans l'induit ou la canalisation extérieure.

Il faut toutefois éviter que l'armature d'une des machines ne vienne à être traversée par le courant du tableau, car alors son couple résistant se transforme en couple moteur, et elle soutirerait de l'énergie à l'installation au lieu de lui en céder.

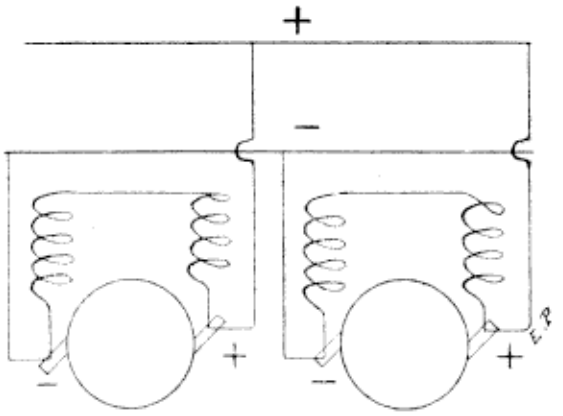


FIG. 109.

On évite cet inconvénient en ne couplant une machine qu'au moment où elle donne sensiblement la même force électromotrice que les autres. On règle ensuite son champ magnétique, pour lui faire débiter un courant en rapport avec sa puissance.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour découpler une dynamo, on diminue d'abord son excitation en agissant sur son rhéostat de champ, de manière à annuler ou du moins réduire à une valeur minime le courant qu'elle débite, ce qui permet de couper son circuit sans inconvénient.

Dynamos compounds.— La figure 110 donne le montage à réaliser pour coupler en dérivation des compounds à court shunt.

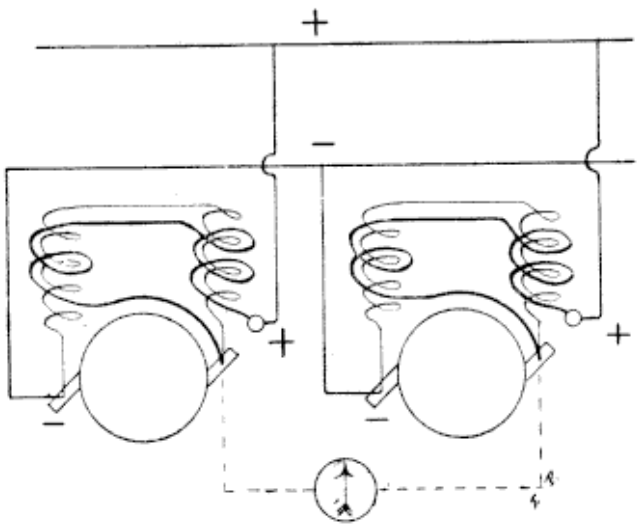


Fig. 110.

Afin d'éviter le renversement du champ inducteur dû aux spires placées en série, on réunit en dérivation les enroulements série des machines par le fil compensateur figuré en traits interrompus et dans lequel on intercale un galvanoscope. Quand celui-ci est au zéro, ce qu'on obtient par le réglage des champs dérivés, les deux machines fonctionnent d'une manière absolument indépendante.

---

§ 2. — Essais.

Il existe un assez grand nombre de méthodes d'essai des dynamos, mettant pour la plupart à contribution à la fois des mesures mécaniques et électriques. Les premières sont moins précises que les secondes, auxquelles il sera donc en général préférable de recourir quand on le pourra.

Méthode de Swinburne. — Une des méthodes le plus pratiques et d'ailleurs le plus usitées dans l'industrie est celle de Swinburne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Son application n'exige que l'emploi de trois appareils usuels : un compte-tours, un ampèremètre et un voltmètre.

D'une manière générale, nous pouvons écrire que le rendement industriel d'une machine est le rapport de la puissance utile restituée à la puissance dépensée. Considérons successivement un générateur et un moteur série.

Machine série. Génératrice. — Appelons comme précédemment r la résistance de l'induit plus celle des balais et s celle des inducteurs, I le courant débité par l'induit qui est aussi celui traversant les inducteurs et le circuit d'utilisation, e la force électromotrice aux bornes et E la force électromotrice totale (fig. 111).

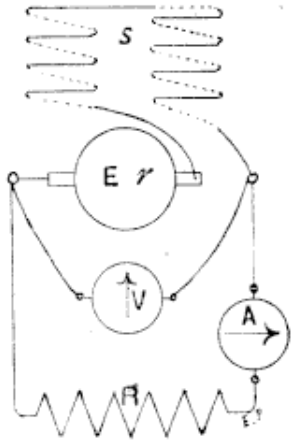


Fig. 111.

La puissance utile du générateur est eI. La puissance totale dépensée pour l'obtenir comprendra d'abord cette puissance utile, puis les diverses pertes de la machine. Parmi celles-ci, les pertes par effet Joule $I^2(r + s)$ peuvent être déterminées aisément. Il suffit, après calage de l'induit, pour empêcher sa rotation, de connecter la dynamo avec une source constante de courant, comme quelques éléments d'accumulateurs, de mesurer le voltage aux bornes E_1 et l'intensité i_1 du courant qui passe. L'application de la loi d'Ohm donne pour la résistance cherchée

$$r + s = \frac{E_1}{i_1}.$$

Il faut toutefois remarquer que, la résistance des métaux croissant avec la température, cette mesure doit se faire immédiatement après fonctionnement pendant un temps suffisant, pour que l'équilibre thermique soit atteint. La durée de l'essai sera de plusieurs heures suivant la puissance de la machine.

Il reste à déterminer les autres pertes dues à l'hystérèse, aux courants de Foucault et aux frottements mécaniques. Désignons-les par F.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous avons vu que, lorsqu'un induit tourne comme moteur, le produit du courant qui le traverse par la force contre-électromotrice qu'il développe, est égal au travail mécanique utile plus les pertes dont nous nous occupons : $eI = p_u + F$ (éq. (1)' p. 120). Ceci montre le moyen de déterminer ces dernières. Il suffira de faire fonctionner l'induit comme moteur *à vide*, ce qui annule le travail utile, et de s'arranger pour que les frottements mécaniques, l'hystérèse et les courants de Foucault soient alors les mêmes ou sensiblement les mêmes qu'en charge.

Toutes ces pertes étant proportionnelles à la vitesse, nous trouvons immédiatement comme première condition à réaliser : *le nombre de tours de l'induit dans l'expérience à vide, doit être le même qu'en charge.* En outre, deuxième condition, *le flux traversant l'induit doit aussi avoir la même valeur*, puisque les courants de Foucault et l'hystérèse en dépendent.

La vitesse se déterminera au moyen du compte-tours. Quant au flux, puisque l'on a

$$E = nN\mathfrak{N}\ 10^{-8}, \qquad (1)$$

on sera certain qu'il aura la même valeur que lors de la marche à pleine charge quand, les balais *étant calés sur la ligne neutre*, l'induit tournant à N tours comme avant, développera une force contre-électromotrice précisément égale à la force électromotrice engendrée dans le fonctionnement en dynamo.

Celle-ci était

$$E = e + (r + s)I.$$

Nous la connaissons. Excitons donc les inducteurs par une source indépendante variable à volonté (fig. 112); appliquons aux balais une force électromotrice E', puis mesurons le courant i' qui passe ainsi que la force électromotrice aux balais dont l'expression est

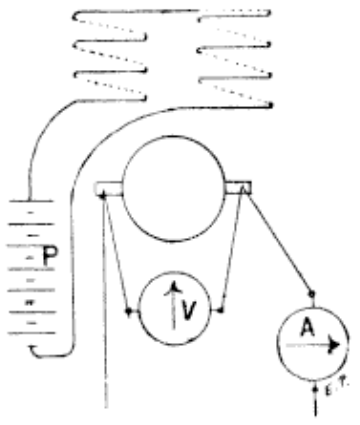


Fig. 112.

$$E' = e' + ri'.$$

En général, ce dernier terme est négligeable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour satisfaire aux conditions imposées, nous disposerons donc de la force électromotrice appliquée E' et du courant inducteur indépendant produisant le flux, de manière à avoir

$$E' - ri' = e' = E \tag{2}$$

quand l'induit fait N tours à vide.

A ce moment,

$$F = e'i' = Ei', \tag{3}$$

de sorte que le rendement s'exprimera par

$$\eta_{gs} = \frac{eI}{eI + (r + s)I^2 + Ei'} \tag{4}$$

Moteur série. — Dans le cas du moteur, le rendement est le rapport de la puissance mécanique disponible sur l'axe, à la puissance électrique EI dépensée à ses bornes. La puissance mécanique disponible est évidemment égale à cette dernière diminuée de toutes les pertes de la machine, soit

$$EI - (r + s)I^2 - F.$$

On déterminera F par une expérience à vide comme précédemment, en faisant tourner le moteur à la même vitesse et de manière à lui faire développer la même force électromotrice

$$E' = E - (r + s)I \tag{5}$$

qu'en charge.

On réglera donc le champ inducteur et la force électromotrice appliquée E'' de manière que

$$E'' - ri'' = E' \tag{6}$$

à la vitesse N.

Alors

$$F = E'i'', \tag{7}$$

et le rendement du moteur devient

$$\eta_{ms} = \frac{EI - (r + s)I^2 - E'i''}{EI}. \tag{8}$$

Machine en dérivation. — D'après ce qui précède, on trouvera aisément pour la génératrice

$$\eta_{gd} = \frac{ei}{ei + rI^2 + di_d^2 + Ei'}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Avec

$$E = e + rI,$$

et pour le moteur

$$\eta_{md} = \frac{EI - ri^2 - di_d^2 - E'i''}{EI}.$$

avec

$$E' = E - ri.$$

Enfin, les expressions dans le cas des machines compounds se déduiraient de la même manière que les relations précédentes.

Exactitude de la méthode. — Les résultats fournis par l'application de cette méthode, sont un peu trop forts. En charge, en effet, la concentration du flux sous les cornes polaires de sortie par suite de la réaction d'induit, y augmente l'induction et par suite les pertes hystérésiques qui sont fonction de l'induction maximum. Les courants de Foucault sont renforcés aussi, tant dans le noyau que dans les pièces de consolidation de l'induit, de sorte que la puissance déterminée à vide est trop faible, et le rendement déduit comme ci-dessus a une valeur trop forte.

La différence ne peut toutefois pas être importante, attendu que les pertes n'atteignent qu'une fraction minime de la puissance. Une erreur de quelques pour cent dans leur évaluation influe fort peu sur le résultat.

En fait, on obtient la valeur exacte du rendement à un ou deux °/₀ près, approximation très suffisante pour les besoins de la pratique.

Séparation des pertes. Méthode de Housman. — Le terme F se compose, comme nous l'avons vu, des frottements mécaniques, des pertes par hystérèse et des pertes par courants de Foucault dans le fer et dans les conducteurs de l'induit. Les deux premiers facteurs sont proportionnels à la première puissance, le dernier au carré de la vitesse de rotation.

On a donc

$$Ei' = kN + k'N^2$$

Or, à flux constant traversant l'induit, ce qui est le cas ici, l'équation (1) peut s'écrire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$N = \frac{E}{n \times 10^{-8}} = \frac{E}{k''} \qquad (9)$$

la vitesse est proportionnelle à la force électromotrice induite.

Remplaçons N par sa valeur dans l'équation précédente il vient

$$E\,i' = \frac{k\,E}{k''} + \frac{k'\,E^2}{k''^2} = k'''\,E + k^{IV}\,E^2 \qquad (10)$$

ou

$$i' = k''' + k^{IV}\,E \qquad (11)$$

et l'on voit que : *le flux traversant l'induit restant constant, l'intensité du courant devient une fonction linéaire de la force électromotrice induite quand on fait varier la force électromotrice appliquée.*

Nous allons tâcher de construire la droite représentée par l'équation (11). Pour cela nous devrons en connaître au moins deux points. Un premier point nous est donné par l'expérience faite à vide dans la méthode précédente. Nous porterons donc en abscisse la force électromotrice E, en ordonnée l'intensité i' trouvée. Puis laissant l'excitation constante, nous mesurerons l'intensité du courant absorbé par l'induit pour une force électromotrice appliquée moindre, ce qui nous donnera le point G (fig. 113). Nous tirerons BG, traçant ainsi la droite BA qui représente graphiquement l'équation (11).

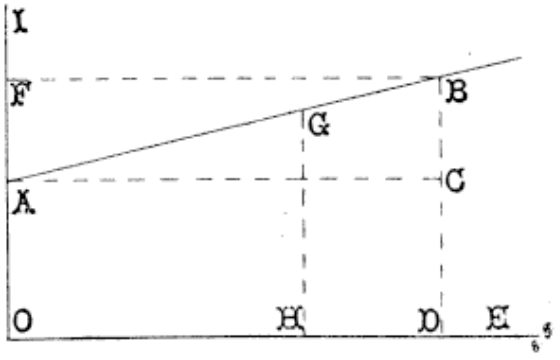


FIG. 113.

A titre de contrôle, on aura soin de faire quelques expériences supplémentaires en réduisant la force électromotrice appliquée. Les points obtenus devront se trouver sur BA.

Pour $E = o$, $i' = k''' = OA$. C'est la valeur de l'intensité nécessaire pour faire démarrer l'induit.

Quand $E = OD$, l'induit tourne à la vitesse N tours, la valeur DB de l'intensité du courant est égale à i' et la puissance dépensée est $E\,i'$. Mais en vertu de (10), $k'''\,E$ représente les pertes par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

frottements mécaniques et hystérèse. Ces pertes sont connues, puisque $k''' = OA$, que l'on peut mesurer sur l'épure ; leur valeur est d'ailleurs donnée par $k''' E = OA \times OD =$ la surface du rectangle OACD.

Quant aux pertes par courants de Foucault, elles sont représentées (10) par le terme $k^{IV} E^2$. Or k^{IV} est le coefficient angulaire de la droite AB, équation (11).

Donc

$$k^{IV} = \text{tg BAC} = \frac{BC}{AC} = \frac{BC}{E};$$

$$k^{IV} E^2 = BC \times E = BC \times OD = BC \times AC$$

et l'on voit que les pertes par courants de Foucault sont déterminées et mesurées par l'aire du rectangle ACBF.

On aurait pu établir cette conclusion directement sachant que Ei' ou le rectangle ODBF représente l'ensemble des pertes et OACD les pertes proportionnelles à la simple vitesse de rotation.

Méthode Bienaimé. — Tout ce que nous venons de voir est établi dans l'hypothèse que l'on peut appliquer à l'induit, dans le fonctionnement en moteur, une tension E' supérieure à la tension à ses bornes dans le fonctionnement en générateur, des chutes de voltage que le passage du courant y provoque dans les deux cas. Ceci n'est pas toujours possible.

M. Bienaimé pare à cet inconvénient en construisant la droite AB par points à l'aide de tensions inférieures à E, puis en déterminant graphiquement la valeur de i' correspondant à l'abscisse E.

Rappelons que la droite AB est le lieu des intensités en fonction des voltages, à *flux constant* absorbé par l'induit, et à vitesse variable, le flux ayant précisément pour valeur celle qui existe quand la *génératrice* tournant à N tours développe la tension totale E, ou encore quand l'induit tournant à la même vitesse comme moteur, engendre la force contre-électromotrice E.

Si, par exemple, nous considérons un point G de AB ayant pour coordonnées GH et OH, OH représentant la force contre-électromotrice développée e'', le nombre de tours qu'effectue l'induit à ce régime est fourni en vertu de (9) par la relation

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$N' = \frac{OH = e''}{k''} \qquad (12)$$

dans laquelle $k'' = n\mathfrak{N}10^{-8}$.

Réciproquement, quand l'induit développe e'', si le nombre de tours est N', le flux possède nécessairement la valeur tirée de l'équation ci-dessus, c'est-à-dire a la valeur voulue.

L'équation (9) relative au fonctionnement en générateur, nous fournira k'' et cette détermination effectuée, on pourra tirer le nombre de tours pour un régime quelconque (12).

La réaction d'induit n'intervient pas, parce que l'équation (1) ou (9) s'applique au flux traversant effectivement l'induit et non aux flux émis par les inducteurs.

Si donc on fait simultanément développer à l'induit la force électromotrice e'' et le nombre de tours N' déterminé comme ci-dessus, on sera certain que *l'excitation* a bien la valeur à réaliser.

Il suffira alors, d'appliquer diverses forces électromotrices aux balais, de mesurer chaque fois le courant absorbé par l'induit et de construire par points la droite AB. Puis, en portant à partir du point O, une longueur OD proportionnelle à E et menant l'ordonnée DB, celle-ci fournira l'intensité *i' qu'absorberait l'induit tournant à* N *tours en engendrant la force contre-électromotrice* E. La puissance E*i'* se trouve ainsi déterminée et les pertes séparées.

Exemple. — Dynamo en dérivation de 250 ampères sous 110 volts. La résistance de l'induit étant 0,02 O, la perte dans l'induit était de $0{,}02 \times 250 = 5$ volts; vitesse angulaire 840 tours par minute.

L'induit développant une force électromotrice totale de 115 volts à 840 tours, la valeur de k'' ressortait à

$$\frac{115}{840} = 0{,}136.$$

En vertu de la même équation, pour 80 volts le nombre de tours devait être

$$\frac{80}{0{,}136} = 588.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Appliquant 80 volts aux balais, l'excitation fut réglée jusqu'au moment où l'induit fit ce nombre de tours.

Ceci obtenu, l'excitation fut maintenue fixe; elle était de 2,8 ampères alors qu'elle atteignait 3,8 A en génératrice à 110 volts et en charge. On appliqua diverses tensions : 29 volts et 66 volts en relevant les intensités correspondantes.

On obtint ainsi trois points en ligne droite. La droite réunissant ces points, étant prolongée, donna pour l'abscisse 115 une ordonnée de 19,5 ampères.

La puissance nécessaire pour faire tourner la machine à vide à 840 tours sous 115 volts était donc

	$115 \times 19{,}5$		2 242
Pertes dans les inducteurs	$110 \times 3{,}8$		418
Pertes dans l'induit	$0{,}02 \times 250^2$		1 250
		Total	3 910

Puissance utile $(250 - 3{,}8)\ 110 = 27\ 082$

Rendement $\dfrac{27\ 082}{27\ 082 + 3910} = 0{,}87.$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VI

Les accumulateurs [1].

---

§ 1. — Généralités.

Nous avons vu que les produits d'une électrolyse peuvent, en se recombinant, donner lieu à un courant de sens inverse entretenu par la force électromotrice de polarisation. Après avoir électrolysé un électrolyte, on peut donc récupérer une certaine partie de l'énergie électrique dépensée en laissant, par la suppression de la source d'électricité et la fermeture du circuit, se recombiner spontanément les éléments libérés. On a constitué ainsi un *accumulateur* ou *pile secondaire*, dont l'énergie restituée pourra être d'autant plus grande, que les quantités d'ions mis en liberté sur les deux électrodes seront plus considérables et leur affinité chimique plus vive. C'est, en somme, un emmagasinage de l'énergie électrique sous forme d'énergie chimique potentielle.

Rendements. — Appelons T_c le temps pendant lequel on a procédé à l'électrolyse, c'est-à-dire à la *charge*, I_c le courant à un moment quelconque t. La quantité d'électricité ayant traversé l'électrolyte sera

$$Q_c = \int_0^{T_c} I_c \, dt.$$

De même, à la décharge, on aura

$$Q_d = \int_0^{T_d} I_d \, dt.$$

---

[1] Lamar Lyndon. *L'Accumulateur électrique*. Béranger, Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de sorte que le rendement en quantité sera

$$\eta_{iq} = \frac{Q_d}{Q_c} = \frac{\int_0^{T_d} I_d\, dt,}{\int_0^{T_c} I_c\, dt}.$$

Q_d représente la quantité d'électricité que le système peut restituer, c'est-à-dire sa *capacité*.

En désignant par E_c et E_d les différences de potentiel à un moment quelconque de la charge et de la décharge, W_c et W_d, P_c et P_d les énergies et puissances correspondantes, on a pour rendement en énergie

$$\eta_{iw} = \frac{W_d}{W_c} = \frac{\int_0^{T_d} E_d I_d\, dt}{\int_0^{T_c} E_c I_c\, dt} = \frac{\int_0^{T_d} P_d\, dt}{\int_0^{T_c} P_c\, dt}.$$

Pratiquement, pour déterminer ces rendements on relève, tant à la charge qu'à la décharge, à des intervalles de temps égaux et suffisamment rapprochés, par exemple toutes les 10 minutes, l'intensité en ampères du courant qui passe et la différence de potentiel en volts aux bornes. On dresse alors des tableaux donnant ces intensités et différences de potentiel successives et permettant d'évaluer aisément les intensités et puissances moyennes, lesquelles, multipliées par la durée des opérations, donnent les quantités de courant en ampères-heures et les énergies en watts-heures.

On remarquera que, pour évaluer la puissance moyenne, il y a lieu de prendre la somme des puissances successives et de diviser par le nombre des termes ajoutés. On s'exposerait à commettre des erreurs grossières si, pour l'obtenir, on se bornait à multiplier *l'intensité moyenne* par *la différence de potentiel moyenne*, la moyenne d'une somme de produits n'étant pas du tout égale au produit de la moyenne des facteurs, ainsi qu'il est aisé de le vérifier.

On peut aussi, à l'aide des tableaux dont il est question ci-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dessus, dresser les courbes des intensités et des puissances en fonction du temps. L'aire de ces courbes, comprise entre deux ordonnées extrêmes et l'axe des temps, représentera précisément les intégrales précédentes, ce qui conduira encore à la détermination des rendements.

Facteurs spécifiques. — On caractérise les accumulateurs en rapportant au poids de leurs électrodes, ou mieux à leur poids total, s'il s'agit d'éléments mobiles, leur capacité, l'intensité du courant tant à la charge qu'à la décharge, la puissance et l'énergie qu'ils sont capables d'absorber et de restituer dans ces conditions normales. On obtient ainsi les capacités en ampères-heures, les courants de charge et décharge en ampères, la puissance en watts, l'énergie en watts-heures par kilogramme de plaques ou totaux.

Substances essayées. — Nous laisserons de côté les accumulateurs au gaz, dont la pile à gaz de Grove est un exemple. Bien que des chiffres spécifiques remarquables aient déjà été atteints, ces appareils n'ont pas encore fourni des résultats industriels.

Un assez grand nombre de combinaisons voltaïques ont été étudiées. Parmi les principales, nous trouvons :

Plomb — eau acidulée sulfurique — plomb;
Id. — eau acidulée sulfurique — cadmium;
Id. — sulfate de cuivre — plomb ou cuivre;
Id. — sulfate de zinc — plomb ou zinc;
Cuivre — zincate de soude ou potasse — fer;
Peroxyde de nickel — potasse caustique — fer pulvérulent.

La plupart ont dû être abandonnées, soit à cause de capacités trop faibles, soit parce qu'elles ne gardaient pas la charge communiquée, et il n'est resté, tout au moins d'un emploi général, que l'accumulateur plomb-eau acidulée sulfurique-plomb, découvert en 1860 par Planté, lequel fournit à la décharge la force électromotrice élevée très constante, d'environ deux volts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 2. — Théorie, composition et fonctionnement des accumulateurs au plomb, essai au cadmium.

Formation. — Considérons une cuve électrolytique contenant de l'eau, dans laquelle plongent deux électrodes en plomb, et faisons-la traverser par un courant.

Première charge. — L'eau va être électrolysée. L'oxygène viendra oxyder l'anode et la transformera superficiellement en peroxyde de plomb $Pb\,O^2$; l'hydrogène à l'état naissant se dégagera sur la cathode

$$\underset{+}{Pb} + 2\,H^2O + \underset{-}{Pb} = \underset{+}{PbO^2} + 2\,\uparrow\!H^2 + \underset{-}{Pb}.$$

Première décharge. — Supprimons la source d'électricité et réunissons les électrodes par une résistance. Une électrolyse inverse va se produire. L'eau du bain fournira des ions H venant réduire le peroxyde de l'anode en protoxyde, tandis que les ions O correspondants viendront protoxyder la cathode.

$$\underset{+}{PbO^2} + H^2O + \underset{-}{Pb} = \underset{+}{PbO} + H^2O + \underset{-}{PbO}.$$

Quand cette réaction a pris fin, l'équilibre chimique est obtenu, le courant cesse.

Deuxième charge. — Rompons le circuit et faisons de nouveau passer un courant dans le même sens que précédemment. Le protoxyde de l'anode se peroxydera, tandis que celui de la cathode va se réduire à l'état de plomb pulvérulent doué d'affinités particulières

$$\underset{+}{Pb\,O} + H^2\,O + \underset{-}{Pb\,O} = \underset{+}{Pb\,O^2} + H^2O + \underset{-}{Pb}$$

puis l'H se dégagera à la cathode, tandis que l'action oxydante pénétrera plus avant dans la masse métallique de l'anode.

Deuxième décharge. — Mêmes réactions que pour la première Mais les masses de matières aptes à réagir étant plus

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

considérables, la quantité d'électricité restituée sera plus grande (réciproque de la première loi de Faraday), et ainsi de suite.

La succession d'opérations électrolytiques, charges et décharges ayant pour but d'augmenter la masse de *matières actives* des électrodes, porte le nom de *formation* de l'accumulateur.

Théorie de l'accumulateur. — L'électrolyte simple que nous venons de considérer présenterait le grand inconvénient d'être insuffisamment conducteur. En pratique, on mélange à l'eau de l'acide sulfurique, lequel améliore la conductibilité et intervient dans les réactions, suivant l'équation

$$\underset{+}{Pb\,O^2} + 2\,H^2SO^4 + \underset{-}{Pb} = \underset{+}{PbSO^4} + 2\,H^2O + \underset{-}{PbSO^4},$$

d'après laquelle deux équivalents d'acide sulfurique sont engagés et viennent sulfater les électrodes, d'où le nom de *théorie de la double sulfatation*.

En outre, à la fin de la charge, la matière active positive est formée de peroxyde de plomb imprégné d'un liquide suroxygéné contenant de l'acide persulfurique $H^2S^2O^8$; l'électrode négative est revêtue d'une couche de plomb doux très poreux, différant du plomb doux ordinaire finement divisé, par une grande aptitude à s'oxyder et des propriétés réductrices intenses.

En somme, le fonctionnement de l'accumulateur au plomb est celui d'une pile au plomb, à dépolarisant solide de peroxyde de plomb. L'acide persulfurique donne le coup de fouet du début ; la force électromotrice élevée obtenue tient à la nature particulière du métal négatif, car il suffit, dans une combinaison hydro-électrique ordinaire PbO^2 et Pb doux, de remplacer ce dernier par une plaque recouverte de plomb poreux naissant, obtenu *sans aucune charge*, par exemple en réduisant chimiquement un sel de plomb par le zinc, pour voir immédiatement monter la force électromotrice.

Moyens d'accélérer la formation. — La préparation par charges et décharges successives, de quantités suffisantes de matières actives sur les électrodes, correspond à une grande dilapidation d'énergie, même si l'on utilise la décharge d'une batterie à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

charge d'autres. En outre, le temps nécessaire est considérable, parce qu'on ne peut dépasser une certaine densité de courant par unité de surface métallique plongée dans l'électrolyte, tant à la charge qu'à la décharge.

Moyens chimiques. — Planté a conseillé de plonger les électrodes pendant quelques jours dans l'acide nitrique étendu de son volume d'eau. Une petite quantité de plomb se dissout et le métal devient spongieux à la surface, ce qui favorise les réactions ultérieures. Mais les procédés de l'espèce sont dispendieux ou compliqués ; leur application rend parfois les lames cassantes.

Moyens physiques : tartinage et chauffage. — Il est plus simple, comme l'indiqua en premier lieu Faure, de déposer directement sur les plaques des mélanges aptes à prendre aisément la composition voulue. On emploie souvent pour les plaques positives, une pâte de minium Pb^3O^4 malaxé dans l'acide sulfurique dilué à la densité 1,1 ce qui correspond à une teneur d'environ 14 % en poids d'acide sulfurique normal et, pour les négatives, de la litharge PbO malaxée avec une solution de densité 1,2 soit 27 % en poids. Parfois, on se borne à appliquer un mélange des deux oxydes, indifféremment sur les deux électrodes.

La pâte faite avec de la litharge, de l'acide sulfurique et de la glycérine, constitue une excellente matière active surtout pour les plaques négatives. On mélange des volumes égaux de glycérine et d'acide concentré ; on laisse refroidir, puis on ajoute deux fois le volume d'eau [1].

Chauffage. — Il serait utile, quant à l'activité des réactions et de l'augmentation de la capacité, de chauffer les bains. On ne peut réaliser ce chauffage, en pratique, à cause de son influence néfaste sur les négatives, au point de vue de leur durée et des actions locales qui se produisent alors.

---

[1] Lamar Lyndon, p. 144.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Électrodes à formation autogène ou hétérogène. — On est donc amené à deux modes bien tranchés de préparation des électrodes :

1° On produit la matière active aux dépens du support qui s'attaque peu à peu et finit, pour les plaques positives, par s'affaisser lorsque l'attaque est complète. C'est *la formation Planté ou autogène.*

La couche active est fort mince; elle n'excède pas un à deux dixièmes de millimètre. Aussi, pour augmenter la capacité, convient-il de réaliser avec un poids donné de plomb une surface maximum. Par des procédés spéciaux de fabrication, on arrive à obtenir des plaques présentant une surface effective atteignant 40 fois la surface apparente.

La capacité des plaques Planté est en général faible, (inférieure à 1 A-H par dcm² de surface active), mais elles sont robustes et la couche d'oxyde y adhère énergiquement. Elles continuent à se former jusqu'à la cinquantième décharge environ. A partir de ce moment la chute de matière active provoque une diminution légère et graduelle de la capacité, qui se continue jusqu'à usure complète (1).

2° On applique la matière active préparée de toutes pièces sur une grille plus ou moins heureusement combinée, de manière à retenir le mieux possible les oxydes. On augmente ainsi la capacité, l'accumulateur s'allège, mais sa destruction est plus rapide. On retarde celle-ci en diminuant l'oxydabilité du grillage par exemple en utilisant un alliage de : plomb 95; antimoine 3,5; mercure 1,5.

Dans les plaques Faure, la chute de la matière active se produit à partir de la 5e ou 6e décharge, d'où diminution faible mais continue de la capacité.

Comme par suite du foisonnement plus grand, dû à une plus haute oxydation, l'électrode positive tend à se gondoler davantage et se détériore plus que la négative, la plupart des constructeurs ont actuellement adopté des électrodes à formation

(1) Lamar Lyndon, p. 62.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

autogène pour les positives, à formation hétérogène pour les négatives.

Forme générale et disposition des électrodes. — Forme spiraloïde. Dès le début, Planté employa pour augmenter les surfaces actives en présence, deux électrodes constituées par deux lames de plomb enroulées en spirale et isolées l'une de l'autre. Cette disposition a été abandonnée, notamment parce qu'elle ne permet pas un démontage ni un entretien faciles.

Forme plane. — La forme plane rectangulaire (fig. 114) se rencontre le plus fréquemment. Les plaques se terminent d'un côté, à leur partie supérieure, par une queue de connexion Q au moyen de laquelle on raccorde ensemble, soit par soudure autogène, soit par des tiges, rondelles et boulons de serrage, toutes les plaques de même polarité. On admet plus ou moins de plaques suivant la capacité que l'on veut obtenir, leurs dimensions variant également. On fait naturellement alterner les plaques de polarités différentes placées parallèlement, à distance suffisante pour éviter les courts-circuits. On a l'habitude de mettre toujours une négative de plus, ce qui a l'avantage de faire arrêter la décharge par la positive, d'éviter ainsi la sulfatation nocive de la négative, d'en assurer par suite la longévité et de prolonger le service de l'élément.

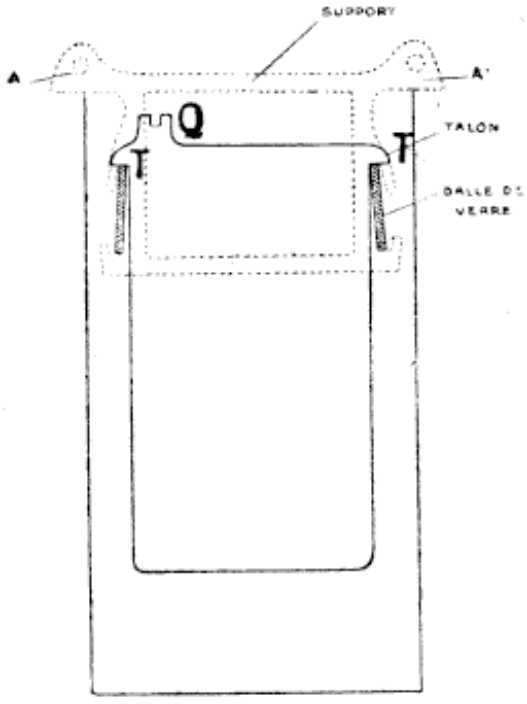


Fig. 114.

Surface active. — La surface active d'un élément quelconque est égale à la somme des surfaces des plaques positives. La surface d'une plaque positive est égale à deux fois le produit de sa largeur par la hauteur immergée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Forme massive. — Dans certains types, utilisés principalement pour la traction, les deux électrodes s'emboîtent l'une dans l'autre. L'une est un parallélipipède présentant des vides, dans l'axe desquels viennent se placer les masses cylindriques ou carrées de l'autre électrode. Par cette disposition, l'électrolyte, entièrement cloisonné sous de petits volumes, n'acquiert pas de mouvements de masse destructifs pour la matière active, malgré les trépidations du transport. Malheureusement on ne voit pas du tout ce qui se passe à l'intérieur de l'accumulateur, inconvénient grave, qui a fait abandonner à peu près complètement cette disposition.

Séparation et fixation des électrodes. — L'exacte séparation des électrodes entre elles est assurée par des tubes en verre, jarretières de caoutchouc, peignes ou cloisons perforées d'ébonite, etc.

Les plaques sont soutenues à une certaine distance du fond, pour que le dépôt qui se forme à la longue ne les mette pas en court-circuit. Elles portent à cette fin des talons T T qui viennent reposer : soit sur des dalles en verre soutenues elles-mêmes par un support approprié (fig. 119) ; soit sur des dalles prenant appui au fond du vase (fig. 115) par l'intermédiaire de tasseaux en plomb.

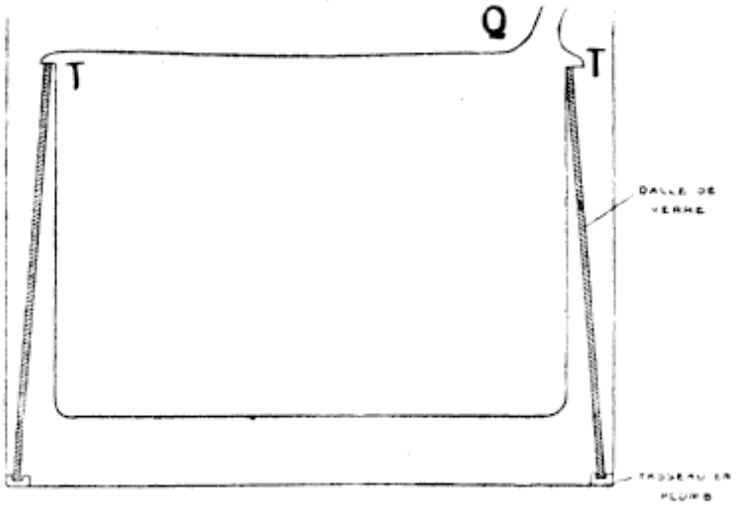


Fig. 115.

Il est à remarquer que, par cette disposition, la matière active tombant sur les lames support réunit les plaques de polarités différentes, tendant ainsi à les mettre en court-circuit.

On évite cet inconvénient en faisant reposer directement le talon des plaques sur le bord du vase (fig. 116). Quand le vase est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

métallique (grands éléments), les plaques reposent par leur talon sur une dalle en verre V *émergeant* du liquide (fig. 117).

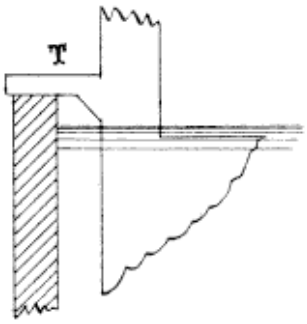


Fig. 116.

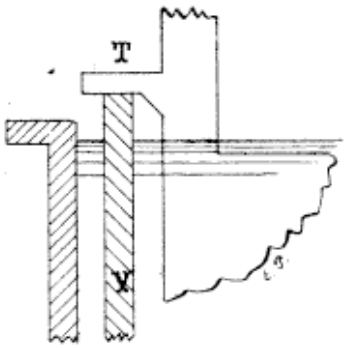


Fig. 117.

Dans les petits modèles, on coule aussi le fond des vases avec des replis venant supporter les plaques à la hauteur voulue. Un meilleur dispositif, dans cet ordre d'idées, est réalisé en rétrécissant le fond du vase (fig. 118) les extrémités des plaques venant s'asseoir sur les redents A et B. Pour assurer une séparation stable des électrodes, les parois verticales portent en outre des saillies en verre, venues de fonte.

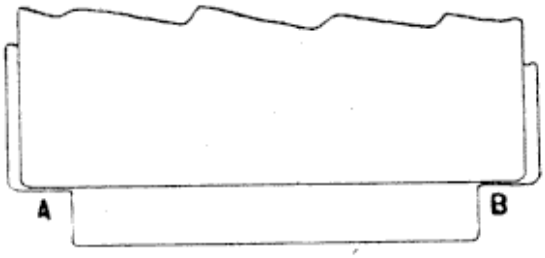


Fig. 118.

La figure 119 donne la vue d'un élément complètement monté.

Électrolyte.— Liquide libre. — Le liquide employé est une solution d'acide sulfurique *pur* dans l'eau distillée. La densité varie de 1,12 environ, ce qui correspond à 16° Beaumé et à un poids d'acide sulfurique normal de 17 % à 1,22 soit 26° Beaumé et 29,6 % d'acide. Pour le préparer, il faut avoir soin de verser lentement l'acide dans l'eau, et non l'eau dans l'acide, à cause de la grande élévation de température qui se produit et pourrait provoquer des projections de liquide corrosif. Il convient d'agiter continuellement le mélange au moyen d'une baguette en bois, ou mieux en verre ou porcelaine.

Les faibles densités ménagent les électrodes, mais il faut alors disposer d'un grand volume de liquide pour utiliser toute leur capacité. Les grandes densités élèvent la force électromotrice,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mais elles abrègent la durée. On apprécie la densité au moyen de densimètres très aplatis qui se glissent aisément entre les plaques.

La capacité croît avec la concentration de la solution sulfurique et passe par un maximum qui varie avec l'intensité de la décharge. Plus l'intensité est grande, plus le maximum recule vers les fortes concentrations d'acide.

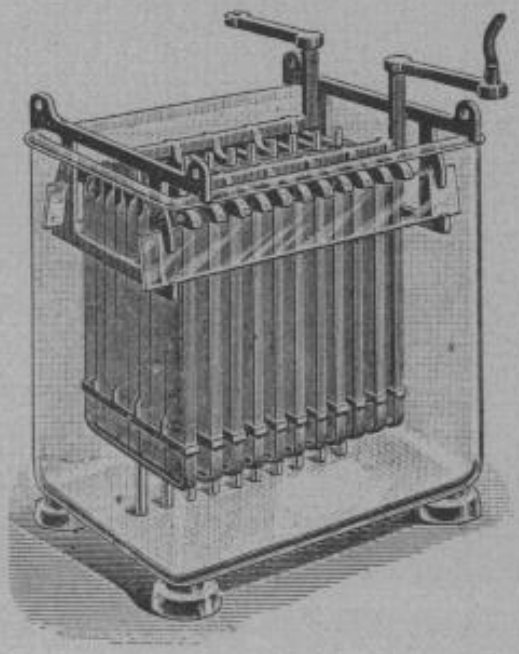


Fig. 119.

Liquide immobilisé. — On a essayé, dans les accumulateurs transportables, d'assurer la stabilité mécanique du liquide, en l'immobilisant soit dans des substances gélatineuses, soit dans des substances inertes, granulées ou fibreuses. Les résultats obtenus n'ont jamais été satisfaisants, parce qu'on augmente la résistance et qu'on rend la surveillance des plaques impossible, ce qui favorise la production de courts-circuits par défaut d'entretien efficace. En outre, la capacité se trouve fortement diminuée, par le fait que la migration des ions se fait d'autant moins aisément que l'immobilisation est plus complète.

Variation de la force électromotrice avec la densité. — On peut calculer la force électromotrice aux diverses densités, soit par la formule de Steinmetz

$$E = 1{,}85 + 0{,}917\ (\Delta - \delta)$$

dans laquelle E est la force électromotrice en volts, Δ le poids spécifique de l'électrolyte et δ le poids spécifique de l'eau, à la température de l'expérience, soit par la suivante

$$E = 1{,}85 + 0{,}00057\ p$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

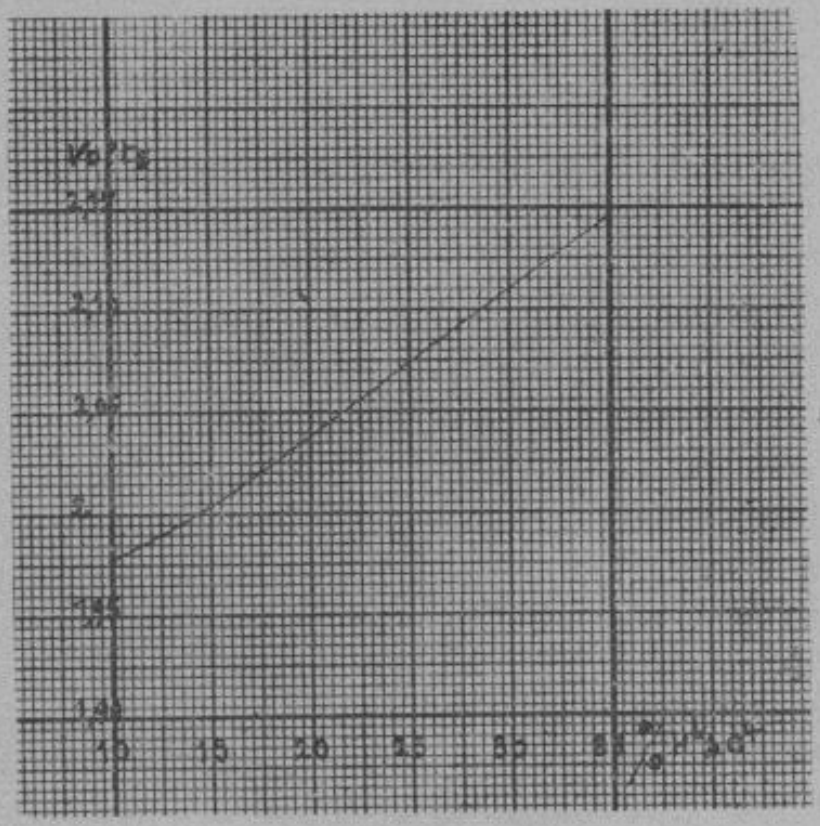


FIG. 120

dans laquelle p est le poids d'acide sulfurique en grammes par litre d'électrolyte.

Ces formules sont vraies pour des densités variant entre 1,005 et 1,65.

La variation de voltage en fonction du pourcentage d'H^2SO^4 est montrée graphiquement dans la fig. 120.

Récipients. — INSTALLATIONS FIXES. — Les vases en verre moulé sont les plus avantageux. Leur transparence facilite la surveillance; par contre ils sont fragiles. On a employé parfois le grès, mais il n'est pas isolant et donne lieu à des suintements. Pour les grands éléments, on recourt au plomb antimonié ou au bois doublé de plomb. Les soudures doivent être autogènes.

INSTALLATIONS MOBILES. — On utilise : le celluloïd, léger, solide et transparent, mais inflammable; l'ébonite (0,7 de caoutchouc pur, 0,3 de soufre), très bonne mais coûteuse; les succédanés de cette dernière, ambroïne, etc ; le bois doublé intérieurement d'ébonite.

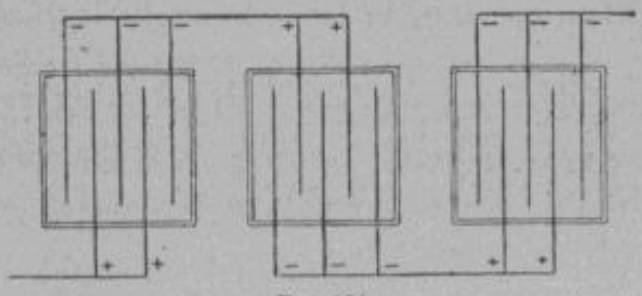


FIG. 121.

Montage d'une batterie. — Les divers éléments sont réunis en tension.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

A cet effet, la barre de liaison des queues des plaques négatives d'un élément se boulonne ou se soude à celle des plaques positives de l'élément suivant et ainsi de suite (fig. 121).

On rencontre aussi parfois des plaques jumelles (fig. 122). La plaque négative est soudée à la plaque positive qui lui est conjuguée dans l'élément suivant, disposition qui facilite l'entretien, puisqu'on peut retirer une paire de plaques sans interrompre le fonctionnement de la batterie. Mais l'examen du liquide compris entre les électrodes est moins facile que lorsque celles-ci sont perpendiculaires à l'axe de la batterie (fig. 121).

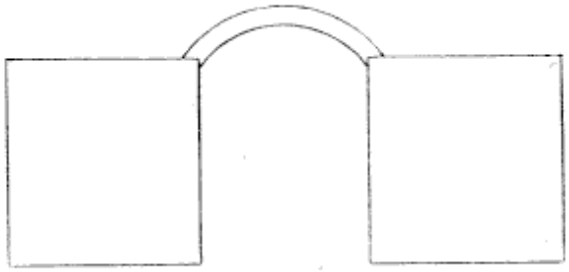


FIG. 122.

On met obstacle aux fines projections du liquide qui se produisent vers la fin de la charge par suite du dégagement de l'hydrogène, en recouvrant la solution d'une lame en verre ou d'une couche de paraffine fondue qui se prend en pellicule facile à enlever.

Les éléments, rapprochés sans se toucher, se posent sur des madriers ou des étagères par l'intermédiaire de roulettes isolantes en porcelaine ou verre. Pour parer à l'abaissement de l'isolement qui résulte des condensations aqueuses se produisant sur la surface de ces supports, on les divise souvent en deux parties (fig. 123). L'inférieure est pourvue d'un godet circulaire rempli d'huile dans laquelle vient plonger une expansion circulaire de la partie supérieure. Les deux pièces sont séparées par une cale en plomb.

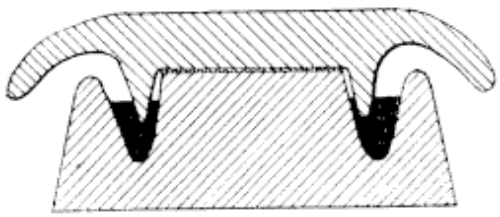


FIG. 123

Les madriers sont eux-mêmes soutenus par des isoloirs du même genre (fig. 124).

Résistance intérieure. — La résistance d'un accumulateur dépend naturellement de ses dimensions. Elle réside principalement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans les couches d'oxydes et varie avec la composition de l'électrolyte. Elle augmente pendant la décharge jusqu'à atteindre une valeur 4 à 5 fois supérieure à celle qu'elle avait au début de

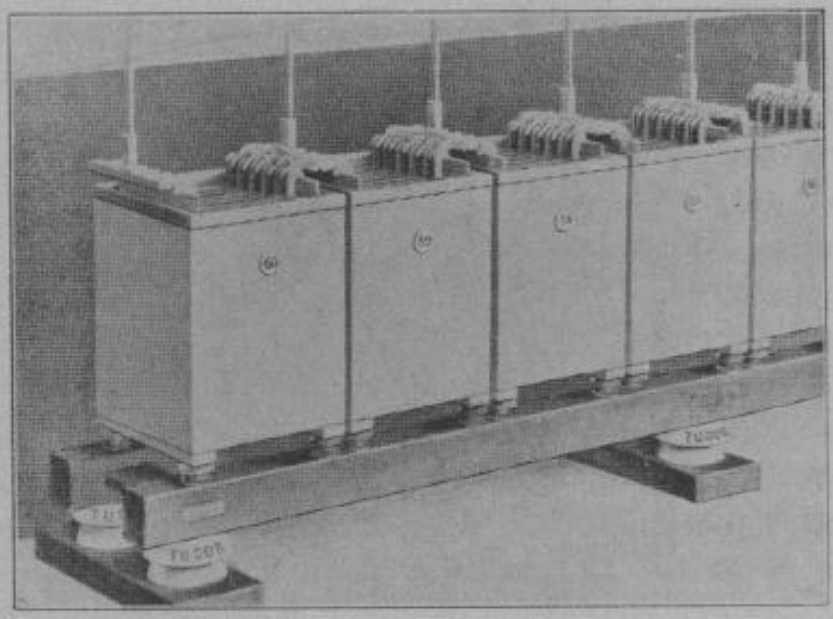


Fig. 124.

l'opération (1). En tous cas elle est très faible et ne dépasse pas quelques millièmes d'ohms dans les éléments de moyenne grandeur; aussi les courts-circuits sont à craindre, à raison des énormes courants qui peuvent en résulter.

Divers modes de charges. — On charge les accumulateurs soit à intensité, soit sous potentiel constants. MM. Cahen et Donaldson (2) ont expérimenté ces deux modes sur un élément à électrode positive Planté. La charge sous potentiel constant se faisait en le soumettant à une différence de potentiel constante de 2,5 volts. Voici le résultat de leurs essais :

---

(1) Lamar Lyndon, p. 66.

(2) *De la charge des accumulateurs et de leur rendement.* (Electricien, t. XVII, p. 165.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PROCÉDÉ DE CHARGE	Durée de charge en minutes	Décharge		Rendement en °/₀	
		A-H	W-H	En quantité	En énergie
Courant constant	206	65,25	123	95,5	81
Potentiel »	82	86	163	93,5	70,5

La durée de la charge à courant constant est donc deux fois et demie plus longue que celle à potentiel constant, et le rendement en énergie est de 10 °/₀ plus élevé. Par contre, la charge sous potentiel constant augmente l'énergie restituée de 32,5 °/₀. Elle est donc particulièrement indiquée, là où les réductions de poids ou de temps jouent un rôle prépondérant, par exemple en traction. D'une manière générale, c'est la charge à courant constant qui est appliquée, parce qu'elle ménage mieux les éléments ; nous étudierons ses principales caractéristiques.

Variation du voltage avec le régime. — Non seulement la capacité diminue quand l'intensité de la décharge augmente, mais le voltage disponible lui-même (à cause de la chute due à la résistance intérieure) diminue également, ainsi qu'il résulte du tableau suivant que donne la Société Tudor pour ses éléments :

DÉCHARGEMENT EN

Heures.	10	7 1/2	5	3	2	1
Minimum de voltage par élément.	1,83	1,82	1,81	1,80	1,75	1,70

Régimes normaux de charge et de décharge. — Les constructeurs indiquent toujours les régimes auxquels il convient de faire travailler leurs appareils ; il est prudent de les suivre exactement. A la charge, la densité du courant se tient généralement entre 0,5 et 1,5 A par kilogramme d'électrode et 0,4 à 2 A à la décharge.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Aspect des électrodes. — Après la charge. — A la fin de la charge, les plaques positives ont une teinte brun chocolat caractéristique due au bioxyde de plomb PbO^2. Si l'élément est déjà en service régulier depuis quelque temps, ce bioxyde de plomb se détache facilement en enduit velouteux quand on frotte du doigt l'arête supérieure de la plaque.

Les plaques négatives présentent un aspect métallique et la teinte en est grise. C'est du plomb spongieux facilement percé au moyen d'une épingle.

Après la décharge. — Les plaques positives sont de teinte moins foncée tirant sur le rougeâtre, tandis que les plaques négatives sont devenues plus ternes.

Variation de la capacité avec le régime, ses causes. — La capacité d'une batterie varie essentiellement avec le régime qui lui est appliqué. M. Peukert [1] a trouvé que le courant I de décharge est lié à la durée T par la formule

$$I^n T = \text{constante},$$

laquelle s'applique à une batterie quelconque. La valeur de $n > 1$, varie naturellement d'un type à l'autre. n est compris, pour les types usuels entre 1,08 et 2.

On peut facilement déduire la capacité pour un régime donné, connaissant celle d'un autre régime. Si l'on appelle Q et Q_1 les deux capacités, I et I_1 les intensités de décharge, de durées T et T_1, on aura

$$Q = IT, \quad Q_1 = I_1 T_1, \quad \text{d'où} \quad Q = Q_1 \frac{IT}{I_1 T_1}. \qquad (1)$$

Mais

$$I^n T = I_1^n T_1, \quad \text{d'où} \quad \frac{T}{T_1} = \frac{I_1^n}{I^n};$$

en remplaçant dans (1), il vient

$$Q = Q_1 \left(\frac{I_1}{I}\right)^{n-1}.$$

(1) Electrotechnische Zeitschrift, 1897.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Plus I sera grand, plus la quantité d'électricité que peut restituer la batterie sera faible. A quelles causes faut-il attribuer ce phénomène ?

D'après M. J. Wade (1), la décroissance de l'énergie spécifique avec l'augmentation de l'intensité de la décharge serait due à la *porosité insuffisante de la matière active* et à la *diffusion trop lente de l'électrolyte.* On comprend, en effet, que l'énergie maximum d'une matière active ne puisse être obtenue qu'à condition que l'électrolyte ait accès à chacune de ses molécules, c'est-à-dire que sa porosité soit moléculaire. Or, comme la diffusion dans la masse de la matière active est plus lente qu'au sein de l'électrolyte lui-même, ce sont les portions externes de cette matière active qui auront à fournir le supplément d'énergie demandé dans les décharges rapides. Cette répartition inégale du travail va en s'accentuant vers la fin de la décharge, attendu que la sulfatation de la matière active a pour résultat d'augmenter son volume, c'est-à-dire de réduire l'espace déjà insuffisant pour l'accès du liquide que laissent entre elles les molécules.

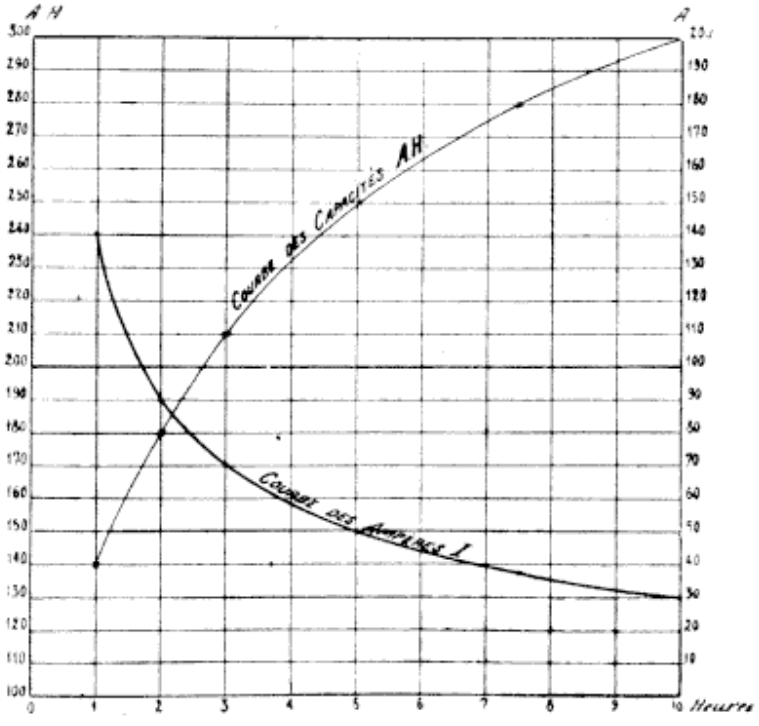


Fig. 125.

La décharge se trouve donc limitée, d'un côté par l'état

(1) Bainville : *Étude sur les accumulateurs.* (Électricien, t. XIX de 1900, p. 361.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avancé de réduction ou d'oxydation des portions externes de la matière active; d'un autre côté par la trop faible densité de l'acide qui entoure les couches internes. Il apparaît dès lors clairement, pourquoi la capacité tombe si rapidement à mesure qu'on augmente le régime de décharge, et aussi pourquoi l'on n'obtient pas un accroissement de cette capacité en augmentant l'épaisseur des couches de matière active au-delà d'une certaine limite.

En somme, une diffusion imparfaite fait travailler les couches profondes dans de mauvaises conditions, tant à la charge qu'à la décharge, et doit au surplus abréger la vie de l'élément, en détruisant la structure moléculaire de la matière active et en favorisant les actions locales sur son support.

La figure 125 donne les courbes de décharge et de capacité d'un accumulateur du système Tudor.

Caractéristiques des charges et décharges normales. — VARIATION DU VOLTAGE. — Au début de la charge, la force électromotrice monte en quelques minutes à 2,1 volts (figure 126), puis son accroissement est fort lent jusque 2,2 volts, pour monter ensuite rapidement vers la fin de la charge jusque 2,5, 2,6 et même 2,7 volts, suivant l'intensité du courant.

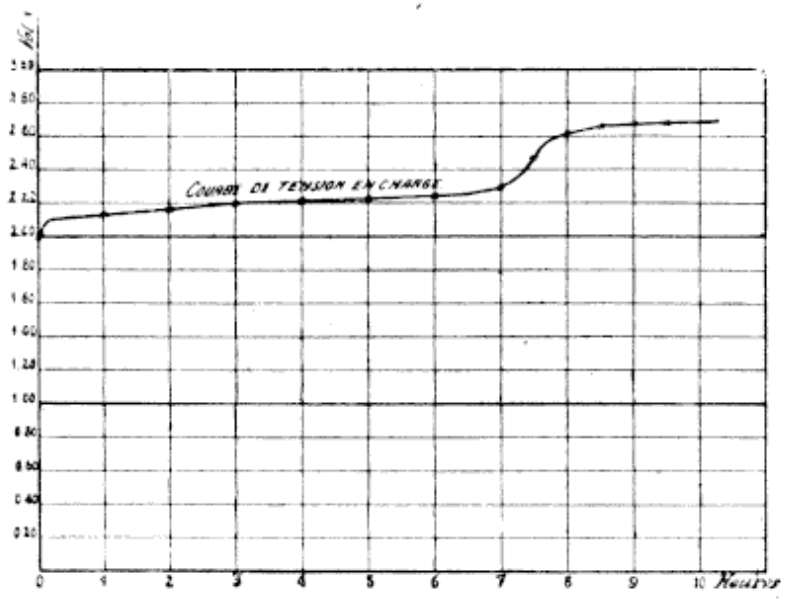


FIG. 126.

Lorsqu'on arrive à ces voltages, le liquide se met à bouillonner vivement, indice qu'une partie de l'énergie électrique est dépensée en pure perte à dissocier le liquide; il est temps d'arrêter,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à moins que l'on ne veuille, par une surcharge énergique, désulfater complètement les plaques. Lorsque l'élément chargé est laissé au repos, sa force électromotrice décroît jusqu'aux environs de 2 volts.

A la décharge, le voltage tombe en quelques minutes au-dessous de 1,95 volt (fig. 127), puis la décroissance est d'autant plus lente que le régime est plus modéré. Vers la fin de la décharge, la chute s'accélère. On arrête quand la force électromotrice aux bornes atteint 1,83 (régime en 10 heures) à 1,75 volt (régime en 3 à 1 heure).

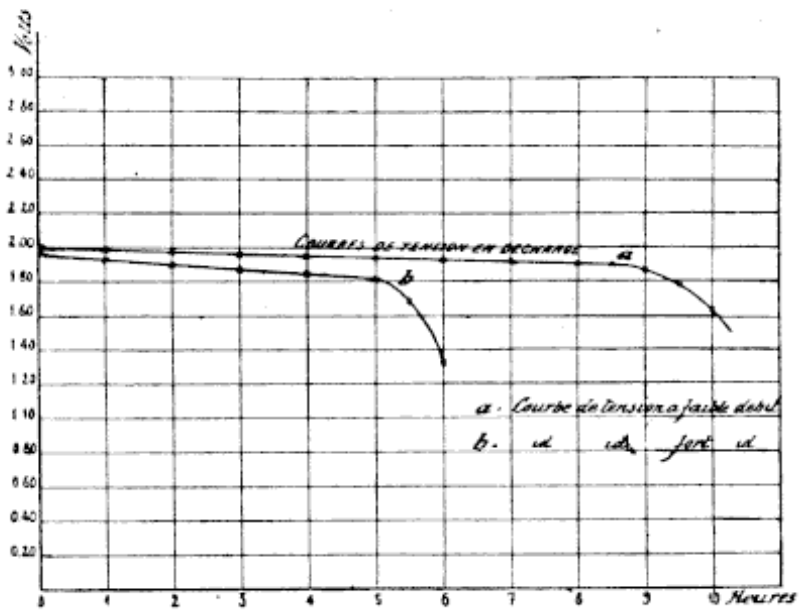


Fig. 127.

Il convient de ne pas descendre en dessous de ces valeurs limites. En effet, le sulfate de plomb étant isolant et difficile à réduire, si l'on déchargeait une batterie à fond, de manière que les électrodes fussent complètement transformées en $PbSO^4$, elles seraient perdues.

Chute de voltage spontanée. — Par suite des réactions locales qui s'exercent entre les matières actives rapportées, le plomb des supports et l'électrolyte, le voltage d'une batterie chargée ne débitant pas, tombe lentement au taux de 1 à 2 % par 24 h.

Une chute plus rapide indique que le bain contient des impuretés.

Variation de la densité de l'électrolyte à la charge et à la décharge. — La densité de l'électrolyte augmente pendant le chargement et diminue pendant l'opération inverse. Elle atteint son maximum

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quand l'élément est complètement chargé et elle varie, à la fin de la décharge, suivant le régime de celle-ci.

Si le courant de décharge a été faible, la densité variera au moins de 3 à 4° Beaumé, tandis que cette variation ne dépassera pas 1,25 à 1,50 pour une décharge effectuée en une heure.

Rendements. — De bons accumulateurs, bien traités, ont un rendement de 90 à 92 % en quantité et 85 % en énergie.

Si l'on décharge une batterie à un régime rapide, elle ne fournira pas toute l'énergie qu'elle est susceptible de donner pendant que le voltage tombera à 1,75 volt et il lui restera une charge résiduelle importante.

Les rendements doivent donc être calculés sur une série de cycles de charges et de décharges faites au même régime et dans les même conditions.

Durée. — Les négatifs des éléments stationnaires peuvent durer dix ans. Les positifs s'usent davantage. Quand ils sont à formation hétérogène, ce qui est actuellement l'exception, ils ne durent guère au-delà de trois ans.

Conservation d'une batterie. — Les plaques d'une batterie déchargée, abandonnée à elle-même, se recouvrent d'une couche blanche, compacte, de sulfate difficile à réduire ultérieurement. Cette sulfatation est d'autant plus importante que la décharge de la batterie a été poussée plus loin. Il faut donc avoir soin de charger les accumulateurs, qui doivent être laissés en repos pendant quelques semaines, et les recharger de mois en mois si la période d'inactivité doit se prolonger.

Si cette dernière est très longue, on s'affranchira des charges périodiques en lavant soigneusement les plaques après la dernière charge et les remontant dans une dissolution de sulfate de soude neutre qui les conserve indéfiniment. La première charge s'effectuera avec ce liquide.

Locaux. — Les locaux dans lesquels on installe des accumulateurs doivent être secs, frais, à température constante, bien

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aérés et éclairés. On évitera toutefois l'accès direct du soleil qui pourrait provoquer le bris des vases en verre. La température doit rester aussi uniforme que possible. On n'y circulera pas avec des lumières à flamme libre, vu la présence possible d'hydrogène formant des mélanges détonnants. Enfin, les parquets seront asphaltés ou couverts de plomb, en pente, et protégés par un plancher en bois à claire-voie; toutes les pièces métalliques sujettes à oxydation devront être recouvertes d'une peinture protectrice qui peut être formée par parties égales de goudron et de térébenthine appliqués à chaud.

Détermination de l'état des électrodes d'une batterie. — Essai au cadmium [1]. — Lorsque la capacité d'une batterie devient insuffisante, il y a lieu de déterminer si le défaut provient de l'une ou de l'autre des électrodes ou de toutes les deux, de manière à être fixé avec certitude sur les réfections à prescrire.

A cette fin, on procède à une décharge normale de la batterie en se servant d'une électrode auxiliaire en cadmium, plongée dans l'électrolyte entre les électrodes d'un des éléments. On mesure pendant l'essai la tension entre les bornes de l'élément (— et +); entre le cadmium et les plaques négatives (Cd et —); entre le cadmium et les plaques positives (Cd et +). Ces trois lectures sont effectuées rapidement, au moyen d'un commutateur approprié, au commencement, vers le milieu et plusieurs fois vers la fin de l'essai.

Lorsqu'un élément possède sa capacité normale, on trouve généralement les valeurs approximatives suivantes *vers la fin de la décharge* : entre le cadmium et l'électrode positive + 2 volts; entre le cadmium et l'électrode négative + 0,2 V; entre les deux électrodes + 1,80 V. En portant les résultats relevés suivant des courbes (voltages en fonction du temps), *on obtient des courbes régulières.*

Pour déterminer quelles sont les plaques qui possèdent le moins de capacité, on continue la décharge jusqu'à ce que la

[1] T'Sas : *Notes sur les accumulateurs électriques*. Bulletin de la Société des Ingénieurs du Hainaut, 1905.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tension tombe à 1,6 V aux bornes de l'élément. C'est alors *l'électrode dont la différence de potentiel avec le cadmium diffère le plus des valeurs normales indiquées plus haut, qui est la moins bonne.*

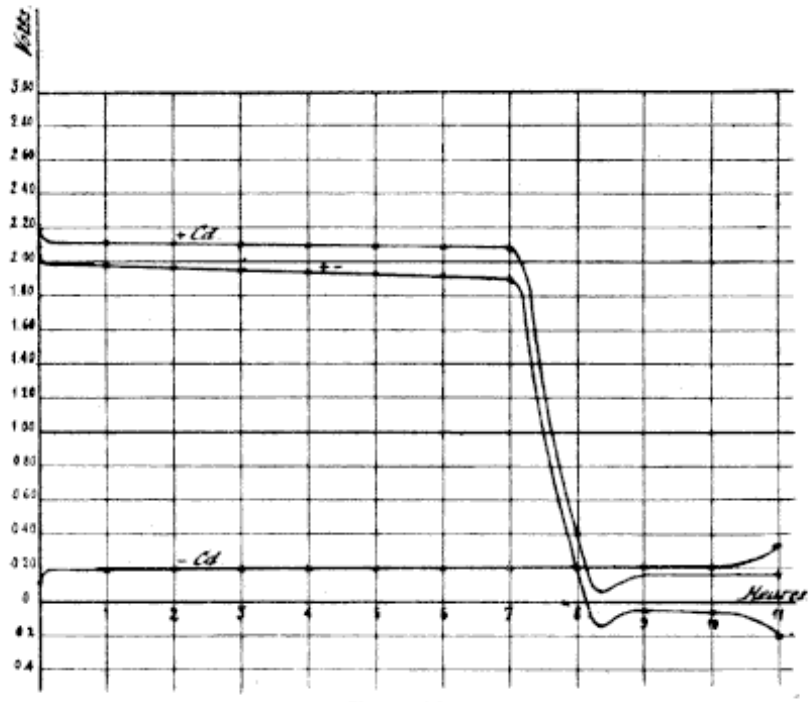


FIG. 128.

Enfin, *en poussant la décharge jusqu'après inversion de la polarité des électrodes, l'examen des courbes indique nettement l'électrode défectueuse et permet de calculer sa capacité.*

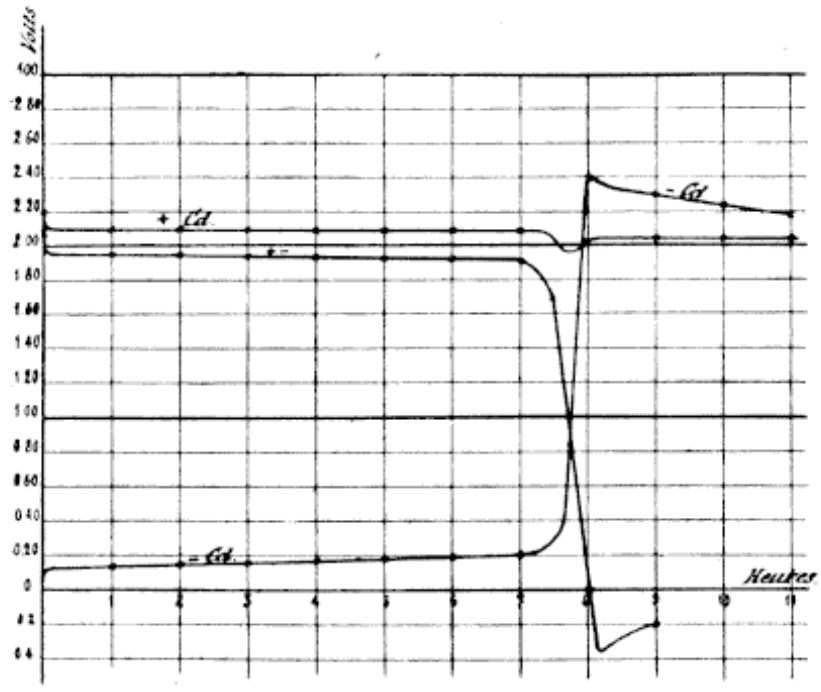


FIG. 129.

Dans la fig. 128, la capacité utile de l'électrode positive était épuisée après une décharge de 7 h., tandis que fig. 129, c'est la négative qui ne fournissait plus d'énergie après 7 h. 1/2, l'électrode + se trouvant encore en bon état après une décharge de 11 h.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 3. — Quelques types d'accumulateurs : Tudor, Industrielle d'accumulateurs, Gottfried Hagen.

Les constructeurs établissent, en général, divers types de leurs accumulateurs, suivant les usages auxquels ils sont destinés. Pour une batterie fixe, où le poids n'a aucune importance, les électrodes sont épaisses, la formation autogène prédomine. On y distingue souvent deux régimes : celui à décharge lente (dix à trois heures), celui à décharge rapide (deux à une heure).

Quand les éléments doivent être transportés, le poids est aussi réduit que possible, la forme devient plus compacte ; on ne dépasse guère 20 kilogrammes comme poids total de l'élément.

Accumulateur Tudor. — La plaque positive (fig. 130), de formation Planté, présente de fines lamelles verticales, presque jointives, encadrées de nervures horizontales. La plaque négative (fig. 131) est du type Faure. L'oxyde est comprimé entre deux grillages qui le retiennent entre eux.

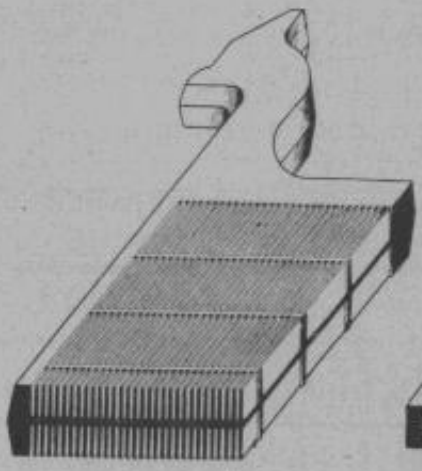


Fig. 130.

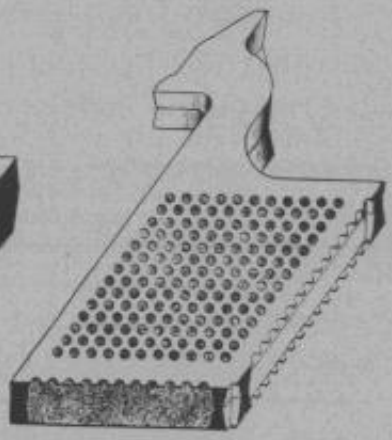


Fig. 131.

La densité de l'électrolyte varie de 24 à 22° Beaumé pendant la décharge.

Les éléments stationnaires se divisent en deux catégories : A) ceux à décharge lente (de dix à trois heures) ; B) ceux à décharge rapide (de deux à une heure). Voici quelques données sur des types de diverses grandeurs (1) :

(1) Les renseignements numériques que l'on trouvera dans le présent paragraphe sont extraits des catalogues des constructeurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Éléments stationnaires.

Capacités en ampères-heures aux régimes de décharge en						Régime de charge en ampères				Poids en kg y compris l'acide, les étagères et les accessoires.
A				B		A		B		
10 h	7,5 h	5 h	3 h	2 h	1 h	normal	maximum	normal	maximum	
30	28	26	22,5	20	16	5	7,5	7,5	10	15
420	392	364	315	280	224	70	105	105	140	103
840	784	728	630	560	448	140	210	210	280	206
1560	1456	1352	1170	1040	832	260	390	390	520	403
2880	2688	2496	2160	1920	1536	480	720	720	960	806
4800	4480	4160	3600	3200	2560	800	1200	1200	1600	1253

Les deux premiers types ci-dessus sont à récipients simples, le troisième à récipients doubles en verre, les autres comportent des récipients en bois doublé de plomb.

Éléments transportables.

Capacités en ampères-heures aux régimes de charge en						Chargement en A	Poids total de l'élément
10 h	7,5 h	5 h	3 h	2 h	1 h		
57,5	54	50	45	40	32	15	14
230	216	200	180	160	128	60	42,5
402,5	378	350	315	280	224	105	71

Ces éléments sont montés dans des récipients en ébonite, avec connexion en plomb par soudure autogène.

Accumulateur de l'Industrielle d'Accumulateurs. — La plaque positive (fig. 132), de formation Planté, est caractérisée par une âme centrale assez épaisse, dont se détachent normalement des lamelles minces. La plaque négative (fig. 133), du type Faure, retient son tartinage entre de minces cloisons verticales, sur lesquelles sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

venues de fonte des barrettes triangulaires horizontales placées en quinconce dans les deux faces.

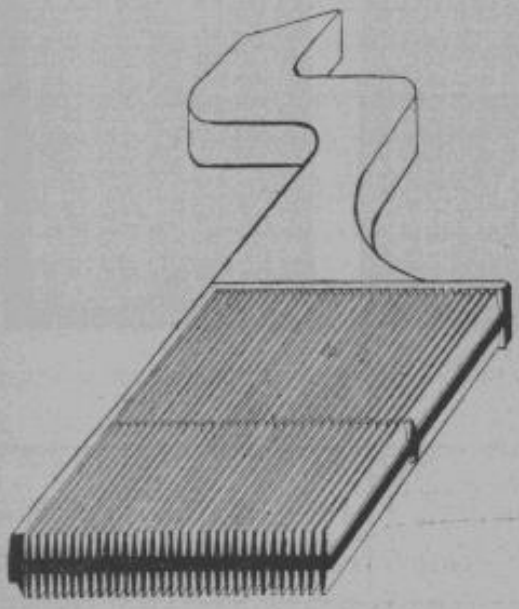


Fig. 132

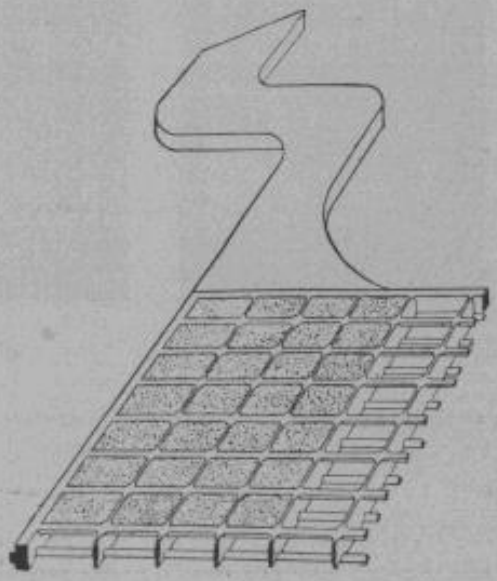


Fig. 133

Capacités en ampères-heures aux régimes de décharge en						Régime de charge en ampères		Poids d'un élément complet acide compris
10 h	7,5 h	5 h	3 h	2 h	1 h	normal	maximum	
36	33	30	27	24	19	9	14	10,7
580	532	485	432	386	310	144	162	109
1010	930	850	755	675	535	250	310	214
2170	2000	1825	1620	1440	1150	530	680	447

Les premiers types sont avec bac en verre, les autres avec bac en bois doublé de plomb.

Accumulateur Gottfried Hagen. — Les électrodes sont constituées par des grilles à barreaux plus ou moins rapprochés suivant leur destination. La fig. 134 donne la vue d'une plaque positive pour décharges rapides (moins de 3 heures); la figure 135, d'une plaque positive pour décharge lente; enfin la figure 136, celle d'une plaque négative. On voit que, dans celle-ci, la formation Faure prédomine. Elle est enveloppée d'ébonite perforée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

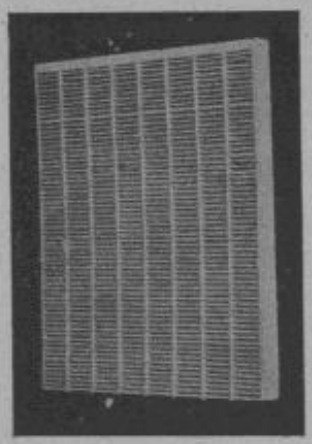


FIG. 134

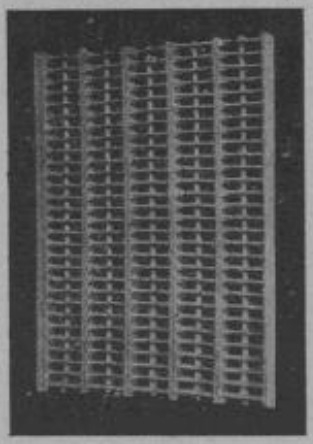


FIG. 135.

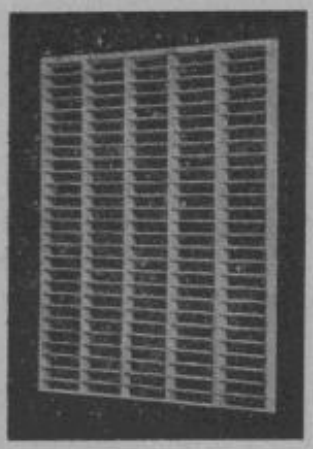


FIG. 136.

Capacités en ampères-heures aux régimes de décharge en				Poids de l'élément tout monté accessoires compris
10 h	7 h	5 h	3 h	
28 à 30	25	22	20	13 à 15 kg
165	145	130	117	40
605	530	480	428	115 à 120
1075 à 1080	940	850	760	190 à 200 kg

§ 4. — Usage des accumulateurs. Puissance. Calcul d'une batterie. Schéma d'installation. Survolteur. Batterie-tampon

Usage des accumulateurs. — La demande de courant dans une usine est en général fort variable. Dans les installations d'éclairage, par exemple, on constate un maximum très accentué vers 17, 18 ou 19 heures, suivant la saison, puis la consommation, après s'être maintenue à un taux élevé pendant quelques heures, tombe à une faible valeur. Les accumulateurs permettent, ressource précieuse, d'éviter la marche coûteuse des machines pendant ces heures de faible débit.

Comme on peut les faire fonctionner en parallèle avec les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

machines, il est en outre possible de diminuer l'importance de celles-ci dont l'utilisation devient meilleure : dans les moments de forte demande, les accumulateurs viennent en aide aux machines en débitant une partie plus ou moins grande du courant ; ils se rechargent, au contraire, quand la diminution de la consommation dépasse un certain taux. C'est le fonctionnement en batterie-tampon dont nous nous occuperons plus loin.

Dans les installations particulières, ils permettent de ne faire marcher les machines qu'à des intervalles plus ou moins longs et pendant le jour.

Enfin, on les utilise pour la traction et l'éclairage des automobiles, pour l'allumage des moteurs à essence, comme batterie de pile des bureaux télégraphiques importants. Ils sont tout indiqués quand on doit pouvoir disposer d'une source puissante et constante ne nécessitant pas une surveillance continuelle.

Puissance massique des accumulateurs. — Le poids d'accumulateurs nécessaire pour produire la puissance électrique disponible d'un kilowatt se détermine aisément, d'après les facteurs des appareils envisagés.

Nous ne nous occuperons que des accumulateurs transportables pour lesquels, seuls, le poids est à considérer.

Si nous prenons des accumulateurs Tudor (voir second tableau ci-dessus), nous constatons que ceux de poids moyen de 71 kg, peuvent fournir 224 A à la décharge en une heure, ou 3,15 A par kg. A ce régime, la force électromotrice moyenne est de 1,725 v, ce qui correspond sensiblement à 5,45 w par kg. Pour produire 1 kw il faudra donc un poids d'accumulateurs de $\frac{1000}{5,45} = 184$ kg.

Ce poids est indépendant du nombre d'éléments. Supposons qu'au lieu d'un seul élément du poids total de 184 kg nous en prenions n pesant chacun $\frac{184}{n}$. Comme ils peuvent donner 3,15 A par kg sous le voltage de 1,725 et que nous les mettons en tension, la puissance obtenue sera

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$\frac{184}{n} \times 3{,}15 \times 1{,}725 \times n = 1 \text{ kw}$$

comme précédemment.

Pour produire P kw il faudra donc, en accumulateurs Tudor transportables de poids moyen, un poids moyen de 184 P kg.

Calcul d'une batterie. — *Supposons qu'il y ait intérêt à utiliser des accumulateurs pour débiter sous 110 volts 49 ampères pendant trois heures, puis 25 ampères et 10 ampères respectivement pendant les deux, et quatre heures suivantes.*

Calcul du poids. — Au total la batterie devra fournir

$$49 . 3 + 25 . 2 + 10 . 4 = 237 \text{ ampères-heures}$$

avec un régime maximum de 49 ampères.

Des accumulateurs stationnaires de poids moyen, ne peuvent guère être déchargés en neuf heures à un taux supérieur à 0,4 ampère par kilogramme total. Il faudra donc, pour satisfaire au problème, des éléments pesant $\frac{49}{0{,}4} = 122{,}5$ kilogrammes. Comme la capacité est, dans ces conditions, d'environ 4 ampères-heures par kilogramme, les éléments auront une capacité totale de $122{,}5 . 4 = 490$ ampères-heures, c'est-à-dire double de celle nécessaire, et l'on pourra n'effectuer le rechargement que tous les deux jours.

Ce calcul n'est qu'approximatif; un coup d'œil jeté sur le catalogue des principaux constructeurs d'accumulateurs permet de déterminer immédiatement quel est le type qui convient.

Nombre d'éléments. — Le voltage minimum des éléments étant 1,83 volt à la décharge (décharge lente), il en faudra au maximum

$$\frac{110}{1{,}83} = 61.$$

Il conviendra de pouvoir continuer à alimenter les circuits d'utilisation sur lesquels la tension ne peut, en général, varier au-delà de 2 à 3 %, soit 112,2 à 113,3 volts, même *pendant la charge*, c'est-à-dire quand le voltage atteint 2,4 volts et même exceptionnellement, en cas de surcharge énergique pour désul-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fater les plaques, 2,7 volts par élément : on devra donc ne mettre en circuit, à ce moment, que $\frac{113,3}{2,7} = 42$ éléments. Les 19 autres éléments, dits de *réduction*, seront ajoutés lors de l'utilisation de la batterie au fur et à mesure que le voltage baissera, au moyen d'un commutateur-*adjoncteur* de décharge.

E étant le voltage maximum des circuits d'utilisation, le nombre minimum d'éléments qui peuvent rester connectés pendant la surcharge est $\frac{E}{2,7}$, comme nous venons de le voir. Si N est le nombre total des éléments, le nombre d'éléments à retirer du circuit est évidemment

$$n = N - \frac{E}{2,7} = \frac{N \cdot 2,7 - E}{2,7}.$$

Quand la charge est effectuée en dehors des heures d'utilisation de la batterie, le nombre des éléments de réduction n'est plus que :

$$n' = \frac{N \cdot 2,1 - E}{2,1},$$

puisque le voltage maximum que peuvent alors fournir les éléments au début de la décharge, et encore pour quelques instants seulement, est de 2,1 volts.

Dans ce cas, l'adjoncteur peut être simple et servir alternativement pour la charge et pour la décharge.

Chargement de la batterie. — A la fin de la première charge, le voltage des éléments, que l'on chargera tous ensemble, sera poussé de 2,5 à 2,7 volts ; la machine devra pouvoir développer $61 \cdot 2,7 = 165$ volts.

Quand la batterie est en service courant, on met en charge tous les éléments ; puis, ceux de réduction, qui n'ont été introduits que progressivement lors de la décharge, pour maintenir le voltage, étant moins déchargés que les autres et par conséquent plus vite rechargés, sont éliminés successivement au moyen de l'adjoncteur de charge, quand ils ont récupéré leur décharge antérieure augmentée du pourcentage de perte. On s'aperçoit qu'il est temps de les éliminer à l'aide des indices signalés plus

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

haut : voltage (pris au moyen d'un petit voltmètre de 1 à 3 volts), densité, bouillonnement.

Schéma d'une installation.—D (fig. 137) dynamo *en dérivation* pour pouvoir faire varier le voltage en augmentant ou diminuant l'excitation des inducteurs I I au moyen du rhéostat R; F_1, ... F_5, fusibles de sûreté; B interrupteur automatique, pour éviter qu'en cas de ralentissement de la machine les accumulateurs se déchargent à travers celle-ci en la faisant fonctionner comme moteur. L'interrupteur automatique est, en général, un simple électro-aimant dont l'armature maintient enclenché un interrupteur, qu'un ressort ou dispositif quelconque tend à ouvrir. Dès que le courant ne possède plus l'intensité voulue, l'armature se déplace et le circuit s'ouvre; V voltmètre permettant, au moyen du commutateur C_1, de prendre le voltage, soit de la dynamo, soit des accumulateurs côté charge, ou côté décharge;

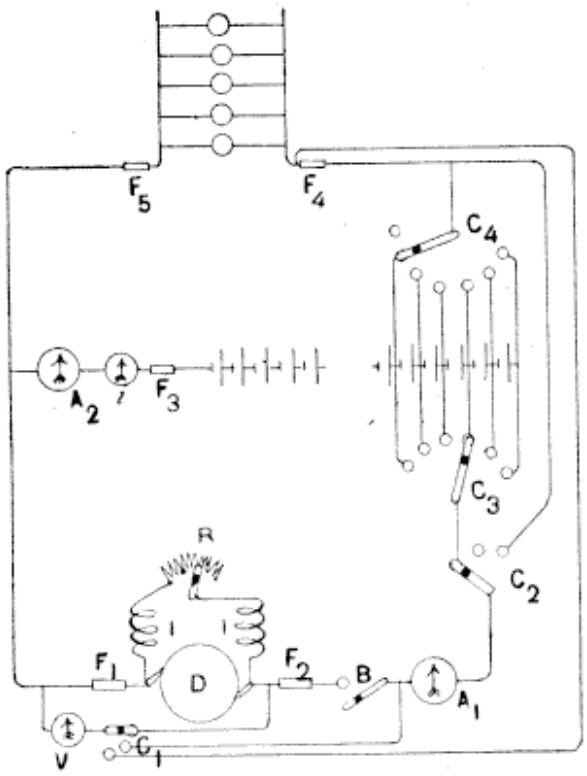


Fig. 137.

A_1 ampèremètre mesurant le débit de la dynamo; C_2 commutateur de la dynamo permettant: soit de la connecter avec les accumulateurs, position de gauche; soit de l'isoler, position médiane; soit de la mettre directement en rapport avec le circuit d'utilisation, position de droite; A_2 ampèremètre marquant l'intensité du courant entrant dans la batterie ou en sortant; *i* indicateur de courant faisant connaître si les accumulateurs sont en charge ou en décharge; C_3 commutateur-adjoncteur pour la charge; C_4 commutateur-adjoncteur pour la décharge.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Remarque sur la construction des adjoncteurs. — L'adjoncteur doit permettre d'ajouter ou de retrancher des éléments sans rupture de circuit, pour éviter la production d'étincelles et d'arrêts dans l'alimentation des récepteurs. La largeur de ses balais frotteurs ou surfaces de contact devra donc être plus grande que l'espace séparant deux touches ou plots consécutifs. S'ils étaient massifs, ils mettraient successivement tous les éléments de réduction en court-circuit. Pour éviter cet inconvénient, on est obligé de subdiviser leur pièce frottante en deux parties réunies par une résistance en maille-chort, souvent enroulée sous forme de boudin RR (fig. 138).

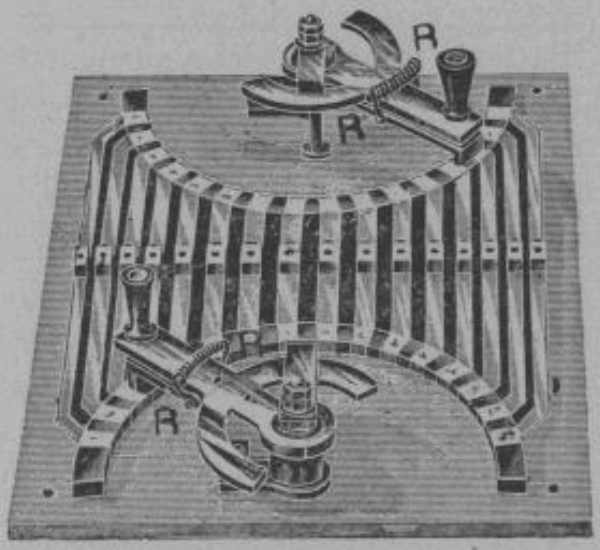


Fig. 138.

Automaticité. — On rend fréquemment automatique le fonctionnement des adjoncteurs. A cette fin, l'aiguille d'un voltmètre vient, quand le voltage atteint les limites prévues, fermer le circuit d'un relais. Celui-ci envoie le courant dans un petit moteur électrique qui fait avancer ou reculer d'une touche le contact de l'adjoncteur.

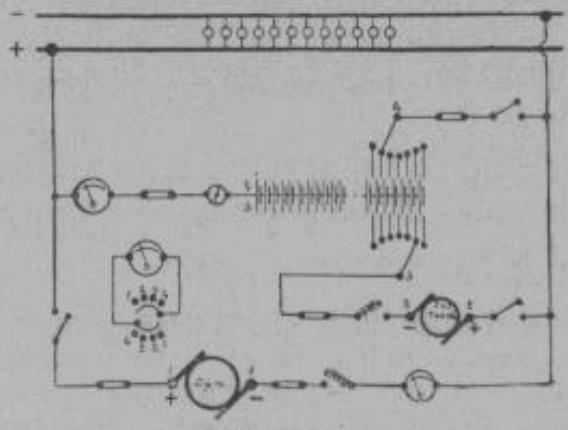


Fig. 139.

Emploi d'un survolteur. — Quand la dynamo ne peut donner le voltage nécessaire pour charger la batterie, on utilise encore un réducteur double, mais on insère du côté de la charge (fig. 139)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'induit d'une dynamo capable de donner la surtension nécessaire. Cette dynamo, actionnée en général par un moteur shunt s'alimentant aux barres omnibus, permet de développer le débit maximum de charge sous un voltage réduit de 40 à 60 volts, s'il s'agit d'une distribution sous 110 volts.

Batterie tampon. — La propriété que présente une batterie d'accumulateurs de pouvoir absorber ou émettre de l'énergie entre des limites étroites de voltage, a fait songer à s'en servir comme régulateur de puissance des génératrices, en les mettant en dérivation sur celles-ci et leur réseau d'utilisation.

Courbe caractéristique d'une batterie. — Mais il naît une difficulté du fait de la passivité de la batterie. Si, en effet, on trace sa *courbe caractéristique* (ampères en fonction des volts : à droite de O fig. 140, le régime de charge, à gauche la décharge) on obtient une courbe C C' indiquant un état d'équilibre O D pour lequel la batterie reste passive. Pour lui faire absorber le courant O A, il faut élever la différence de potentiel jusqu'à la valeur A C, c'est-à-dire l'augmenter de B C. Inversement, pour faire débiter à la batterie le courant OA', il faut amener la différence de potentiel appliquée à la batterie à la valeur A' C', c'est-à-dire la réduire de B' C'.

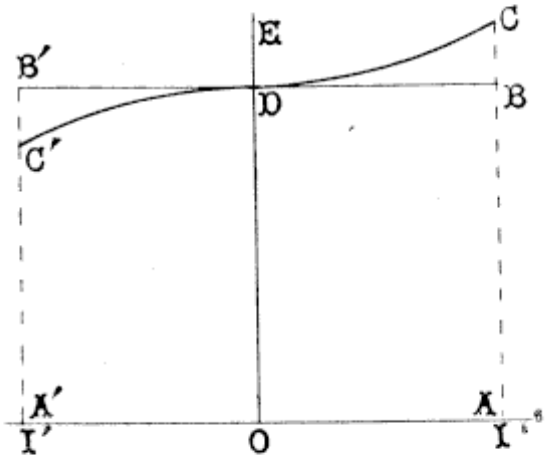


Fig. 140.

Si donc les variations de voltage du réseau sont peu considérables, la batterie, appelée *batterie-tampon*, n'aura qu'un effet utile extrêmement réduit.

Survolteur différentiel à courant constant système Entz. (1) — On peut

(1) Fernand T'Sas. *Quelques notes sur l'installation des batteries tampon.* Publications de l'Association des Ingénieurs de l'Ecole des Mines de Mons, T. I. de 1907, p. 27.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

augmenter beaucoup ses limites d'action en montant en série avec elle l'induit g (fig. 141) d'une dynamo compound à deux circuits série, dont l'un S_1 est en série avec la génératrice et le second S_2 en série avec le réseau. Ces deux enroulements agissent dans le même sens, et en sens contraire du troisième enroulement à fil fin branché aux barres B_1, B_2 du réseau. L'induit est entraîné par un moteur, généralement enroulé en dérivation, alimenté aux barres du tableau.

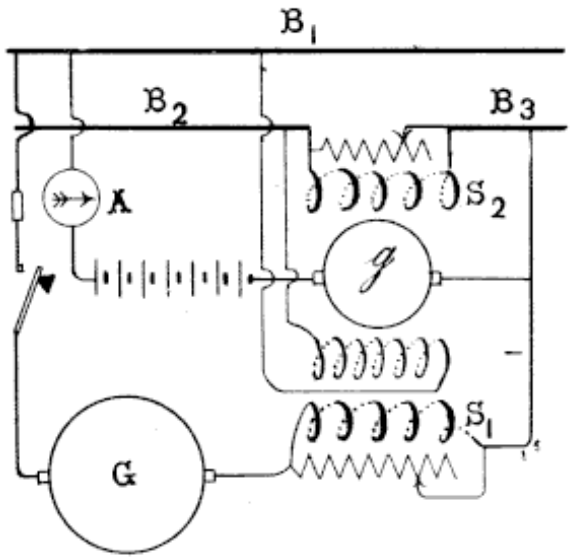


FIG. 141.

Au moment où la charge du réseau est égale au débit moyen, qui est celui de la génératrice, les deux enroulements à gros fil sont traversés par un courant de même intensité. La résultante des actions concordantes de ces enroulements est alors compensée par l'excitation en fil fin et la batterie se trouve à son point d'équilibre. Ce réglage dépend donc du débit moyen du réseau et s'obtient facilement pour d'autres régimes moyens, en shuntant les deux enroulements série par des résistances variables.

Quand la consommation du réseau augmente brusquement, les courants traversant S_2 et S_1 augmentent, tandis que celui traversant l'enroulement dérivé diminue, le voltage tombant au tableau. Pour ce triple motif, g fournit une force électromotrice orientée dans le sens de la batterie et qui met celle-ci en décharge. L'action est encore accentuée par ce fait que le courant de la batterie traverse l'enroulement S_1.

Inversement, elle est automatiquement mise en charge, chaque fois que la consommation de courant du réseau tombe en dessous du régime normal des génératrices.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VII

Divers modes de représentation des courants alternatifs.

§ 1. — Par les vecteurs.

Représentation graphique des fonctions sinusoïdales [1]. — On rencontre à chaque instant, dans l'étude des courants alternatifs, des fonctions sinusoïdales, de même périodicité, de la forme

$$e = \mathrm{E} \sin \omega t, \quad e' = \mathrm{E}' \sin \omega t',$$

dont il s'agit de trouver la fonction, somme, différence, produit ou quotient. Cette recherche ne s'effectue algébriquement qu'au prix d'une certaine difficulté. Par les représentations vectorielles, au contraire, on la résout aisément.

La sinusoïde $e = \mathrm{E} \sin \omega t = \mathrm{E} \sin \frac{2\pi}{\mathrm{T}} t$ est complètement définie dès que l'on connaît son amplitude E, sa période T et l'angle $\omega t = \frac{2\pi}{\mathrm{T}} t = \frac{360}{\mathrm{T}} t = \alpha^\circ$ qu'elle fait au moment t, avec une direction fixe de repère.

Traçons deux axes rectangulaires OX, OY (fig. 142) et une droite OA sur laquelle nous portons une longueur OA = E, faisant avec l'axe des X l'angle α. La projection Oa de OA sur l'axe des Y sera Oa = OA cos AOY = OA sin α, et l'on voit qu'en faisant tourner OA dans le sens de la flèche, de manière qu'elle fasse un tour en T secondes, et la projetant constamment

[1] VOYER. *Traité élémentaire des courants alternatifs*. Carré, Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur l'axe des Y, les projections successives donneront la fonction sinusoïdale considérée. OA est appelée le *vecteur représentatif* de cette fonction. On suppose que le vecteur tourne en sens inverse des aiguilles d'une montre; l'angle α est alors compté positivement; il serait compté négativement en sens contraire, symétriquement à l'axe des X (1).

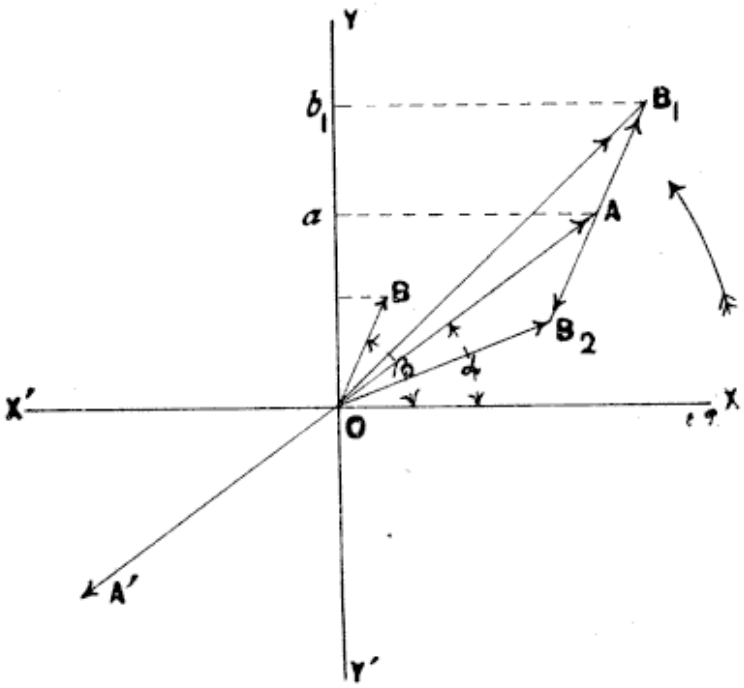


FIG. 142.

Dès que dans sa rotation le vecteur a dépassé l'axe OX', sa projection devient négative. Donc *les vecteurs situés sous l'axe des X représenteront les valeurs négatives de la fonction.* En outre, puisque les sinus d'angles différant de π sont égaux et de signes contraires, en portant à partir de l'origine un vecteur suivant la direction diamétralement opposée, on change son signe. Par exemple OA' représente le vecteur OA pris négativement.

Traçons un second vecteur OB faisant un angle β avec l'axe des X. OB est en avance sur OA de l'angle $\beta - \alpha$, différence de phase ou déphasage des deux sinusoïdes représentées. On a $Ob = OB \sin \beta$.

Menons par le point A une droite AB_1 égale et parallèle à OB

(1) Les Allemands font tourner les vecteurs en sens inverse, c'est-à-dire que la direction positive est celle de la rotation des aiguilles d'une montre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et joignons B_1 à l'origine. En projetant le vecteur OB_1 sur l'axe des Y, nous obtiendrons une longueur

$$Ob_1 = Oa + ab_1 = Oa + Ob,$$

ou, en appelant γ l'angle de OB_1 avec l'axe des X,

$$OB_1 \sin\gamma = OA \sin\alpha + OB \sin\beta,$$

c'est-à-dire que le vecteur OB_1 représentera la sinusoïde somme des sinusoïdes correspondant aux vecteurs OA et OB.

Donc, *pour additionner deux ou plusieurs grandeurs sinusoïdales, il suffit de composer leurs vecteurs représentatifs suivant le parallélogramme des forces ; le vecteur résultant représentera en grandeur et en phase la sinusoïde somme de toutes les autres.*

Tant que le déphasage de deux vecteurs que l'on additionne géométriquement ne dépasse pas 90° ou $\pi/2$ radians, la résultante est plus grande que chacune des composantes et l'on peut dire que celles-ci sont *concordantes*. Dès que le déphasage dépasse $\pi/2$ la résultante se réduit de plus en plus pour atteindre un minimum quand l'opposition est complète. Par exemple, si une force électromotrice est déphasée de plus de $\pi/2$ sur un courant, elle devient contre-électromotrice. En construisant les sinusoïdes, en effet, on verrait que, pendant la majeure partie de la période, elles sont en opposition ou *discordantes*.

S'il s'agit de soustraire des fonctions sinusoïdales, on composera encore de la même manière leurs vecteurs représentatifs, mais en ayant soin de prendre négativement les vecteurs à soustraire, c'est-à-dire de les prendre égaux et diamétralement opposés à ceux qui représentent les valeurs positives.

Pour soustraire la sinusoïde OB de OA, on portera à l'extrémité de A et en sens inverse de OB un vecteur AB_2. Le vecteur résultant OB_2 représentera la sinusoïde différence des deux autres.

Il est à remarquer que la différence OA — OB diffère essentiellement de OB — OA. En effectuant la composition vectorielle, en effet, on voit que l'on obtient dans le second cas une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

valeur égale et opposée à l'autre, c'est-à-dire une fonction sinusoïdale de même amplitude, mais déphasée de π en arrière.

Il en résulte que si l'on doit soustraire vectoriellement un certain nombre de vecteurs l'un de l'autre, il faudra toujours procéder dans le même ordre, c'est-à-dire soustraire par exemple le second du premier, le troisième du second, le quatrième du troisième et ainsi de suite.

Dans le cas où l'on fait la somme de fonctions périodiques, il convient également de remarquer que, contrairement à ce que l'on obtient en additionnant des quantités constantes, la somme «géométrique» peut être plus petite que chacune des deux composantes. Tout dépend de leur déphasage. De même, la différence géométrique de deux fonctions périodiques peut être plus grande que ces dernières.

Ceci se comprend aisément, si l'on considère que deux fonctions de même périodicité, que l'on additionne quand elles sont toujours de sens opposé, doivent nécessairement donner une somme plus petite qu'une au moins des composantes. Si au contraire on les soustrait dans les mêmes conditions, leur différence sera toujours plus grande que les deux composantes.

Il existe un seul cas où la composition géométrique se confond avec l'addition arithmétique, c'est quand les deux fonctions à ajouter ou à soustraire ont la même phase. Dans ce cas, en effet, leurs vecteurs coïncident, de sorte qu'on les porte soit dans le prolongement l'un de l'autre (addition), soit en sens inverse l'un de l'autre (soustraction).

Applications. — I. Comme exemple reprenons le cas de la génération du courant dans une spire tournante (T. I, p. 270). Nous avons trouvé

$$e_a = e_e + e_s + e_c = rI \sin \omega t + \omega \mathfrak{L} I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{I}{\omega c} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Nous obtiendrons la sinusoïde résultante représentant la force électromotrice appliquée, en composant les valeurs maxima ou amplitudes des trois sinusoïdes élémentaires et tenant compte de leurs déphasages.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Soient OM (fig. 143) le vecteur de la force électromotrice effective maximum, obtenu en portant de l'origine la longueur rI, sur une droite OM faisant un angle ωt avec OX; $ON = \omega \mathfrak{L} I$ le vecteur de la force électromotrice maximum de selfinduction et $OP = I/\omega c$ celui de la force électromotrice maximum de capacité. La composition nous donnera pour la force électromotrice résultante E_a, la droite OP' qui représentera en grandeur, direction et phase, la force électromotrice appliquée maximum. En faisant tourner l'ensemble OMN'P'O autour de O en sens inverse des aiguilles d'une montre et projetant les droites OM, MN', N'P' et OP' sur OY, ces projections donneront, à chaque instant, les valeurs des diverses forces électromotrices en jeu.

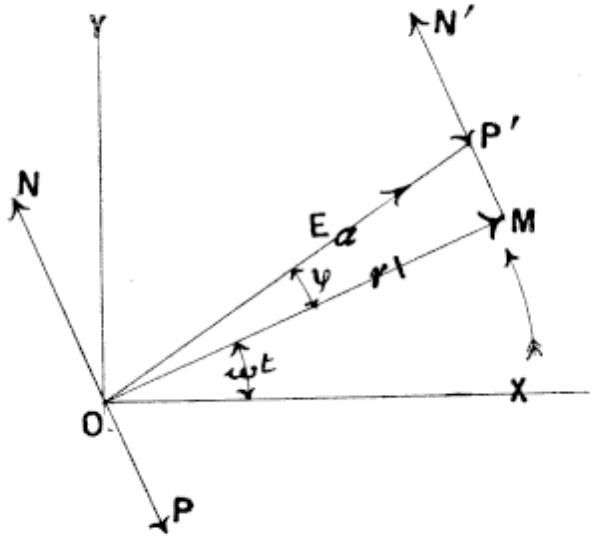


FIG. 143.

On voit immédiatement que si l'inductance l'emporte sur la capacitance, le courant est déphasé en arrière sur la force électromotrice appliquée, d'un angle φ donné par la relation

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \mathfrak{L} I - \dfrac{I}{\omega c}}{rI} = \frac{\omega \mathfrak{L}}{r} - \frac{1}{\omega c r}.$$

D'autre part, le triangle rectangle OMP' nous donne :

$$OM = OP' \cos \varphi \text{ ou } rI = E_a \cos \varphi,$$

on en tire

$$I = \frac{E_a \cos \varphi}{r}.$$

Enfin

$$E_a = \sqrt{(rI)^2 + \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{1}{\omega c}\right)^2 I^2}$$

d'où

$$I = \frac{E_a}{\sqrt{r^2 + \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{1}{\omega c}\right)^2}}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et, en divisant les deux membres par $\sqrt{2}$,

$$i_{\text{eff}} = \frac{e_{a\,\text{eff}}}{\sqrt{r^2 + \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Nous retrouvons donc, directement, la relation fondamentale établie précédemment. On remarquera encore que la construction (fig. 143) montre que la force électromotrice efficace à appliquer aux bornes d'un circuit impédant est l'hypothénuse d'un triangle rectangle ayant, pour côtés de l'angle droit, $i_{\text{eff}}\, r$ force électromotrice effective et $i_{\text{eff}}\,(\omega \mathfrak{L} - 1/\omega C)$ force électromotrice d'induction déphasée à angle droit sur le courant et en avant sur celui-ci, si $\omega \mathfrak{L}$ l'emporte sur $1/\omega C$.

GRANDEURS RELATIVES DES DIVERSES FORCES ÉLECTROMOTRICES COMPOSANTES. — Les forces électromotrices de selfinduction et de capacité étant déphasées, la première de $\pi/2$ en avant sur le courant, l'autre de $\pi/2$ en arrière, sont diamétralement opposées et viennent en déduction l'une de l'autre. Elles pourront avoir des valeurs plus grandes que la force électromotrice appliquée, puisqu'elles sont fonction de la fréquence. Cherchons à nous en rendre compte pratiquement.

Soit un circuit constitué par une bobine ayant une résistance de 500 O et un coefficient de selfinduction de 1 H, mise en série avec un condensateur de 10 microfarads. On applique aux extrémités de l'ensemble une force électromotrice efficace de 1 000 volts sous la fréquence de 125. Calculer les forces électromotrices efficaces qui existeront aux bornes de la bobine et du condensateur.

La force électromotrice que l'on trouvera aux bornes de la bobine sera la résultante des forces électromotrices effective et de selfinduction. Nous allons les calculer successivement.

Le courant traversant le circuit aura, en vertu de la formule générale, une intensité

$$i_{\text{eff}} = \frac{1\,000}{\sqrt{500^2 + (785 - 127{,}3)^2}} = 1{,}21 \text{ A}.$$

La valeur maximum $I = i_{\text{eff}}\sqrt{2} = 1{,}71$ A.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La force électromotrice effective maximum est $E_e = rI = 855$ volts; elle est en concordance avec le courant.

La force électromotrice maximum de selfinduction est

$$E_s = \omega \mathfrak{L} I = 785 \cdot 1{,}71 = 1\,340 \text{ volts.}$$

Ces deux forces électromotrices étant déphasées d'un angle droit, leur force électromotrice résultante maximum sera

$$E_b = \sqrt{855^2 + 1340^2} = 1\,590 \text{ volts,}$$

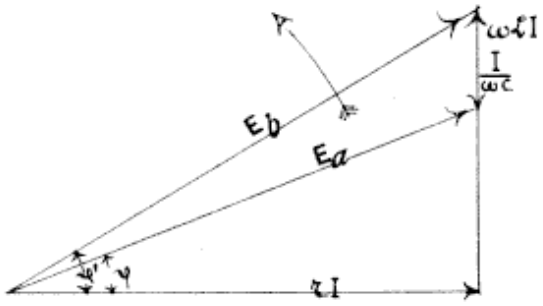


Fig. 144.

ce qui correspond à une valeur efficace de 1 123 volts que l'on mesurerait aux bornes de la bobine, au moyen d'un voltmètre. Le déphasage en avant de cette force électromotrice sur le courant est donné par

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{\omega \mathfrak{L}}{r} = \frac{785}{500} = 1{,}572,$$

soit un angle φ' de 57°.

Aux bornes du condensateur règnera une force électromotrice maximum de

$$E_c = -\frac{I}{\omega c} = -\frac{1{,}71 \cdot 10^5}{785} = -218 \text{ volts}$$

correspondant à une valeur efficace de 152 volts.

On arrive donc à ce résultat paradoxal en apparence, que 1 000 volts étant appliqués aux bornes d'un circuit comprenant une résistance douée de selfinduction, en série avec une capacité, on trouve aux bornes de la résistance une force électromotrice *plus grande* que celle appliquée. La disproportion irait en s'accentuant avec la fréquence.

II. **Évaluation graphique de la puissance d'un courant alternatif.** — *Soit un courant de pulsation* ω, *d'intensité efficace* i_{eff}, *déphasé de* φ *sur sa force électromotrice efficace* e_{eff}. *Le circuit étant dépourvu de capacité, nous savons que* e_{eff} *est la résultante de la force élec-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tromotrice effective $r\,i_{\text{eff}}$ *et de la force électromotrice de selfinduction* $\omega\,\mathfrak{L}\,i_{\text{eff}}$.

Construisons les vecteurs représentatifs. Ils font l'angle φ.

Le côté $OA = r\,i_{eff}$ (fig. 145) nous donnera la grandeur et la direction du courant et OB la grandeur et la direction de la force électromotrice appliquée.

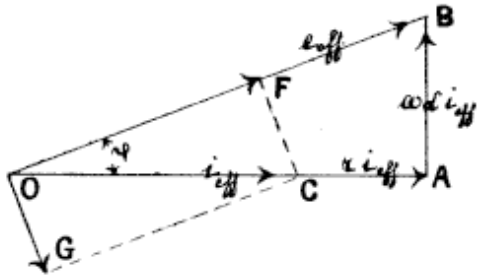


FIG. 145.

Portons sur OA une longueur OC représentant i_{eff} (même échelle pour les ampères que pour les volts), puis décomposons i_{eff} suivant les directions de e_{eff} et de sa normale OG. Les vecteurs OF et OG représenteront les composantes wattées et déwattées du courant, dont les valeurs sont respectivement

$$i_{eff}\cos\varphi \text{ et } i_{eff}\sin\varphi.$$

La puissance du courant sera donc

$$e_{eff}\,i_{eff}\cos\varphi = OB \times OF.$$

Donc, *pour évaluer la puissance développée par un courant alternatif, il suffit de projeter l'un des vecteurs représentatifs de sa force électromotrice ou de son intensité efficaces sur l'autre et de faire le produit du vecteur sur lequel on projette par la projection de l'autre.*

REMARQUE. — Tant que φ est plus petit qu'un angle droit, les vecteurs à multiplier ont le même sens, le produit est positif, la puissance électrique fournie est positive.

Si φ dépasse un angle droit, les deux vecteurs sont dans le prolongement l'un de l'autre, ils sont toujours de signes contraires, leur produit est négatif et la puissance électrique développée est négative aussi : le circuit absorbe de l'énergie au lieu d'en fournir.

III. **Partage du courant entre des dérivations quelconques.** — *Entre deux points* A *et* B (fig. 146) *soumis à une différence de potentiel*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

efficace e_{eff} sous la fréquence f se trouvent 3 dérivations contenant la première une résistance de R *ohms, la seconde un condensateur de* C *farads, la 3e une bobine de r ohms et de coefficient de selfinduction* $\mathfrak{L}$ *henrys. On demande quelle est l'intensité circulant dans chaque branche, le déphasage des courants sur la force électromotrice, la puissance dépensée dans chaque branche, enfin la valeur du courant total et son déphasage sur la force électromotrice appliquée.*

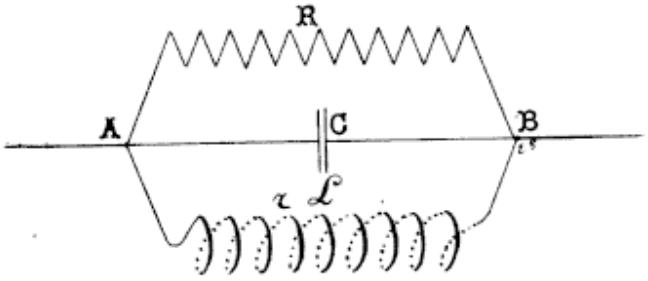


Fig. 146.

L'intensité dans la branche de résistance R est :

$$i_{1eff} = \frac{e_{eff}}{R}$$; le déphasage 0, la puissance $i_1^2{}_{eff}$ R.

Dans la branche contenant le condensateur : $i_{2eff} = e_{eff}\,\omega\, c$, le déphasage du courant est $\pi/2$ en avant, la puissance 0.

Enfin dans la branche inductive :

$$i_{3eff} = \frac{e_{eff}}{\sqrt{r^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2}}$$, avec $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega \mathfrak{L}}{r}$, la puissance $= i_3^2{}_{eff}\, r$.

Le courant total s'obtiendra en sommant vectoriellement les trois intensités composantes. Sur une droite OA (fig. 147) tracée suivant la direction de la force électromotrice appliquée, portons une longueur OA représentant le courant i_{1eff} en phase avec elle, qui traverse la résistance simple R. Le courant dans le condensateur étant déphasé de $\pi/2$ en avant, nous élèverons en A une perpendiculaire à OA sur laquelle nous porterons une longueur A B $= i_{2eff}$. Enfin, sur une droite faisant un angle φ en arrière avec la direction O A, nous porterons une longueur B C

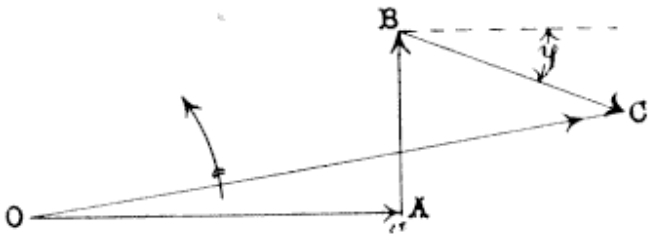


Fig. 147.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

représentant $i_{3\,eff}$. En joignant C à l'origine, le vecteur O C représentera en grandeur et en phase le courant pénétrant et sortant en A et B.

IV. **Impédance combinée.** — *Déterminer la résistance et le coefficient de selfinduction d'une bobine pouvant remplacer un certain nombre de bobines placées en dérivation l'une par rapport à l'autre, possédant les résistances* R_1, R_2,. . *et les coefficients* $\mathfrak{L}_1$, $\mathfrak{L}_2$,..., *la fréquence de la force électromotrice appliquée étant f?*

La fréquence étant f, la pulsation $\omega = 2\pi f$. Les déphasages des courants dérivés sur la force électromotrice appliquée sont donnés par

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\omega \mathfrak{L}_1}{R_1}, \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\omega \mathfrak{L}_2}{R_2}, \ \ldots$$

nous les connaissons, de même que l'intensité dans les diverses bobines, en appliquant la formule générale des courants alternatifs.

Par rapport à une droite A B (fig. 148) qui représente la direction et la grandeur de la force électromotrice appliquée aux dérivations, traçons les vecteurs des courants dérivés i_1, i_2..., faisant avec cette direction les angles en arrière φ_1, φ_2,... et sommons les. La résultante représentera le courant total I bifurquant entre elles ; il est déphasé de φ sur A B. Joignons avec B le point C où la résultante coupe la demi-circonférence tracée sur A B comme diamètre.

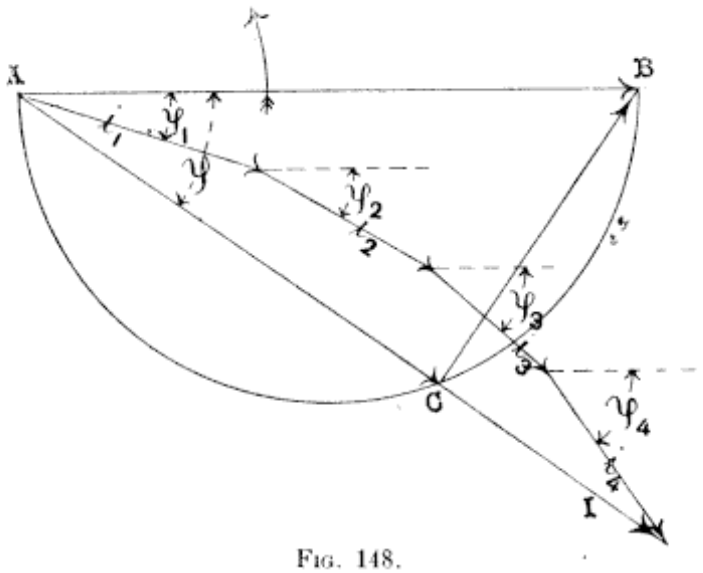


FIG. 148.

Si nous nous rappelons que la force électromotrice appliquée est la résultante des forces électromotrices effective et de self portées à angle droit, nous voyons que la force électromotrice

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

appliquée, représentée par AB, est équilibrée par une force électromotrice effective en phase avec I, proportionnelle à AC et par une force électromotrice de self proportionnelle à CB.

Par conséquent, la bobine qui aura une résistance A C/I et une selfinduction B C/ω I satisfera au problème.

Cas d'impédances dérivées égales. — Un cas intéressant à considérer est celui de *n résistances r égales, de self* $\mathfrak{L}$ *égales placées en dérivation.*

Toutes les intensités partielles, qui sont égales et de mêmes phases, s'ajoutent arithmétiquement. $I = ni$. Les intensités partielles valent

$$i = \frac{E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2}},$$

de sorte que

$$I = ni = \frac{n\,E}{\sqrt{r^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2}} = \frac{E}{\sqrt{\left(\frac{r}{n}\right)^2 + \omega^2 \left(\frac{\mathfrak{L}}{n}\right)^2}}.$$

Tout se passe donc comme si une seule dérivation de résistance r/n et de coefficient $\mathfrak{L}/n$ existait seule ; semblable bobine pourra remplacer toutes les autres.

On remarquera également que tous les déphasages sont les mêmes, aussi bien des courants partiels que du courant total.

Remarque sur les forces contre-électromotrices développées dans le circuit par le passage d'un courant alternatif. — Il est essentiel de bien se représenter la signification physique des divers facteurs auxquels nous avons affaire.

Les forces électromotrices de selfinduction et de capacité que nous avons envisagées jusqu'ici sont les portions de la force électromotrice appliquée, destinées à vaincre continuellement les forces *contre-électromotrices* de selfinduction et de capacité se développant dans le circuit. Celles-ci sont donc égales et opposées à celles-là et par conséquent déphasées respectivement de $\pi/2$ en arrière et en avant sur le courant.

Lorsque ce sont ces forces contre-électromotrices que l'on considère, la force électromotrice effective est la résultante de la force électromotrice appliquée et des forces contre-électro

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

motrices de selfinduction et de capacité, ainsi qu'il résulte directement de l'équation

$$ri = e_a - \mathfrak{L}\frac{di}{dt} - e_c$$

établie précédemment.

On voit d'ailleurs sur la fig. 143, que l'on arrive identiquement au même résultat, en renversant les directions de ON, OP, puis composant leur résultante avec OP'.

Cette construction peut être utile dans certains cas. Retenons donc qu'*en composant la force électromotrice appliquée avec les forces contre-électromotrices de selfinduction et de capacité qui sont respectivement déphasées de* $\pi/2 + \varphi$ *en arrière et de* $\pi/2 - \varphi$ *en avant sur la force électromotrice appliquée, on obtient la force électromotrice effective.*

Réciproquement, *si l'on décompose la force électromotrice effective suivant deux directions faisant avec la sienne l'angle* φ *en avant ou en arrière et* $\pi/2 \pm \varphi$ *en avant ou en arrière, on obtient en grandeurs et directions la force électromotrice appliquée et la force contre-électromotrice de réactance du circuit.*

De même, connaissant la force électromotrice appliquée, ainsi que le déphasage du courant, on obtiendra la force électromotrice effective, en projetant le vecteur de la force électromotrice appliquée, sur une droite faisant avec ce vecteur un angle φ, en arrière ou en avant, suivant que l'inductance l'emporte ou non sur la capacitance. Le troisième côté du triangle ainsi formé donne la force électromotrice résultante de self et de capacité ou, si l'on renverse sa direction, la résultante des forces contre-électromotrices correspondantes.

Par analogie on peut appeler *force contre-électromotrice effective ou de résistance*, une force électromotrice égale et opposée à la force électromotrice effective.

Aux bornes d'un circuit présentant résistance, selfinduction et capacité, nous avons à chaque instant

$$e_a = ri + e_s + e_c.$$

Faisons passer tous les termes dans le premier membre

$$e_a - ri - e_s - e_c = o$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et nous pourrons dès lors dire que : *La résultante de toutes les forces électromotrices et contre-électromotrices d'un circuit fermé est à chaque instant nulle.*

La valeur de la force contre-électromotrice effective est donc $-rI \sin \omega t$.

Lois de Kirchhoff pour les ondes alternatives. — 1re LOI. *La résultante des intensités de tous les courants se dirigeant vers un nœud, obtenue par le parallélogramme des fonctions sinusoïdales, est nulle.*

2e LOI. *La résultante de toutes les forces électromotrices dans un circuit fermé, obtenu par le parallélogramme des fonctions sinusoïdales est nulle, si l'on fait intervenir les forces contre-électromotrices de résistance et de réactance.*

Autre mode de représentation vectorielle. — Une grandeur sinusoïdale peut encore se représenter par la corde d'une circonférence ayant pour diamètre l'amplitude du vecteur.

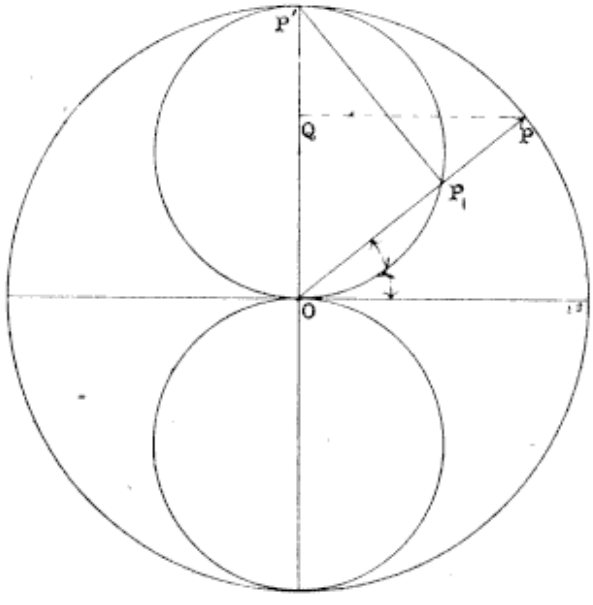


FIG. 149.

Il faut démontrer que $OQ = OP_1$ (fig. 149). Or dans le triangle rectangle OP_1P' on a $OP_1 = OP' \cos P'OP = OP' \sin \alpha = OQ$. Par conséquent, les segments du vecteur tournant interceptés par les deux cercles intérieurs, représentent les valeurs instantanées d'une grandeur sinusoïdale d'amplitude OP'.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 2. — Représentation symbolique des courants alternatifs ou par les imaginaires.

Un vecteur O A (fig. 150) de longueur $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ est complètement défini géométriquement par ses deux coordonnées x et y ou par sa longueur ρ et l'angle θ qu'il fait avec un axe fixe OX. Analytiquement on peut, en posant $\sqrt{-1} = j$, le représenter par la seule expression imaginaire

$$x + yj \text{ ou } \rho \cos\theta + \rho \sin\theta \times j = \rho(\cos\theta + j \sin\theta).$$

Le triangle O A X donne en effet

$$x = \rho \cos\theta, \quad y = \rho \sin\theta$$

d'où

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \operatorname{tg}\theta = \frac{y}{x}.$$

La connaissance de l'imaginaire $x + yj$ définit donc entièrement le vecteur en grandeur et en phase, puisqu'on peut immédiatement en déduire la grandeur du vecteur égale à la racine carrée de la somme des carrés de la partie réelle et du coefficient de $\sqrt{-1}$, tandis que l'angle qu'il fait avec l'axe des x a pour tangente le rapport du coefficient de $\sqrt{-1}$ au terme indépendant.

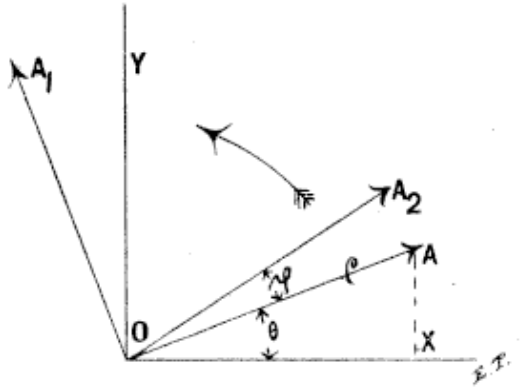


FIG. 150.

Si le vecteur est dans le second quadrant, l'imaginaire représentative devient $-x + yj$

et

$$\rho = \sqrt{(-x)^2 + y^2}, \quad \operatorname{tg}\theta = -\frac{y}{x}.$$

Dans le 3e quadrant, imaginaire $-x - yj$,

$$\rho = \sqrt{(-x)^2 + (-y)^2}, \quad \operatorname{tg}\theta = \frac{y}{x}.$$

Enfin dans le 4e quadrant, imaginaire $x \quad yj$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$\rho = \sqrt{x^2 + (-y)^2} \quad , \operatorname{tg} \theta = -\frac{y}{x} \cdot$$

Supposons que nous ayons à additionner deux fonctions harmoniques représentées par les imaginaires $a + bj$ et $a' + b'j$. Si nous nous reportons à la composition vectorielle, nous voyons que les coordonnées du vecteur résultant seront $a + a'$, $b + b'$. Le vecteur additif sera donc représenté par l'imaginaire $(a + a') + (b + b')j$. Or c'est précisément le résultat que l'on trouve en additionnant les quantités complexes qui représentent les vecteurs à ajouter. Donc, *pour trouver le vecteur résultant de la somme ou de la différence d'un certain nombre de fonctions périodiques représentées par des imaginaires, il suffit d'additionner ou de soustraire ces dernières.*

La grandeur du vecteur résultant sera fournie par la racine carrée de la somme des carrés de la partie réelle et du coefficient de j, tandis que la tangente de l'angle avec l'axe des X sera donnée par le rapport de la dernière quantité à la première.

Si l'on multiplie une quantité complexe par une quantité réelle, on multiplie simplement la grandeur du vecteur par cette quantité. Mais si on la multiplie par une quantité imaginaire bj, non seulement on multiplie la grandeur par b, mais on la déphase de $\pi/2$ en avant. En effet

$$j(x + yj) = \quad -y + xj$$

c'est-à-dire que le vecteur O A est remplacé par O A_1.

On verrait de même qu'*en la multipliant par $-j$, on déphase le vecteur de $\pi/2$ en arrière*, puisque

$$-j(x + yj) = y - xj.$$

Pour faire tourner un vecteur O A (fig. 150) *d'un angle φ en avant, il suffit de multiplier la quantité imaginaire qui le représente par* $\cos\varphi + j \sin\varphi$.

En effet, le vecteur O A est donné par $\rho(\cos\theta + j \sin\theta)$ et OA_2 par

$$\rho[\cos(\theta + \varphi) + j \sin(\theta \times \varphi)] = \rho[\cos\theta \cos\varphi - \sin\theta \sin\varphi + j(\sin\theta \cos\varphi + \cos\theta \sin\varphi)] =$$
$$\rho[\cos\theta(\cos\varphi + j \sin\varphi) + j \sin\theta(\cos\varphi - 1/j \sin\varphi)]$$

Mais $\quad -1/j = j.$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Donc le vecteur OA_2 est représenté par

$$\rho\,(\cos\theta + j\sin\theta)\,(\cos\varphi + j\sin\varphi).$$

On démontrerait de même que, *pour faire reculer le vecteur de φ en arrière, il suffit de multiplier son imaginaire par* $\cos\varphi - j\sin\varphi$.

Puisque le vecteur dont la longueur $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, est représenté par l'imaginaire $x + jy$, inversement une impédance $z = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$ correspond aussi à un vecteur dont les coordonnées sont r et $\omega L = s$. On la définira donc par l'imaginaire $r + js$. Quand r est négligeable, il ne reste pour l'impédance que $js = j\omega L$. Si l'impédance n'est caractérisée que par une capacitance, on aura

$$z' = \sqrt{r'^2 + \left(-\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Elle sera alors définie, en posant $1/\omega C = s'$ par l'imaginaire $r' - js'$. Quand la résistance r' en série avec la capacité est négligeable, il ne reste pour l'imaginaire que $-js' = -j/\omega C$.

Nous avons vu précédemment que, pour faire traverser une impédance r_{app} par une intensité i_{eff}, il faut appliquer aux bornes de l'impédance une force électromotrice $i_{eff} \times r_{app}$. Le courant étant représenté par $x + jy$ et la résistance apparente ou impédance par $r + js$, il faudra donc appliquer aux bornes de l'impédance une force électromotrice représentée par l'imaginaire

$$(x + jy)\,(r + js).$$

Nous en concluons que l'intensité efficace imaginaire du courant $[i]$ sera représentée par la force électromotrice imaginaire $[e]$ divisée par $r + js$.

Posons $r + js = [R]$ que nous appellerons impédance imaginaire. Nous aurons

$$[i] = \frac{[e]}{[R]}.$$

C'est précisément la loi d'Ohm pour les courants continus. Et ici nous voyons la facilité que peut présenter l'emploi de la méthode des imaginaires : *c'est de permettre de traiter le courant*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

alternatif comme le courant continu, ce qui évite des intégrations longues et difficiles.

Application. — Nous allons d'ailleurs le montrer par un exemple.

Soit un circuit AB (fig. 151) *comportant un condensateur C placé en série avec une bobine d'inductance* $\omega\mathfrak{L}$ *et de résistance négligeable, sur laquelle se trouve dérivée une résistance* R_3. *On applique aux extrémités A et B une force électromotrice efficace constante* $e_{a\,eff}$ *et l'on demande de déterminer la valeur du courant traversant la résistance* R_3.

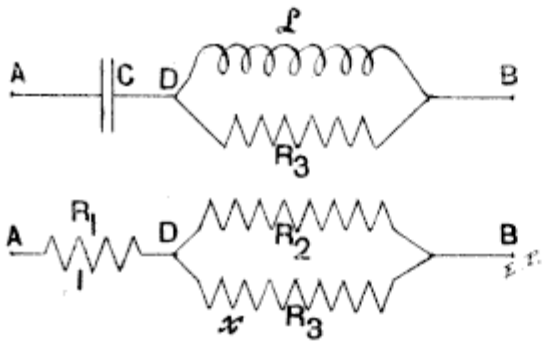


Fig. 151 et 152.

Les impédances imaginaires des portions ACD et D$\mathfrak{L}$B seront $[R_1] = -j/\omega c$ et $[R_2] = \omega\mathfrak{L}j$.

Traitons le même problème en courant continu (fig. 152), supposons qu'entre A et B existe la différence de potentiel E ; assimilons les impédances imaginaires à des résistances réelles, ce que nous pouvons faire en vertu de l'équation d'Ohm établie précédemment. Appelons i le courant cherché et I le courant total

$$I = \frac{E}{R_1 + \dfrac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}$$

$$x_{\text{continu}} = \frac{I R_2}{R_2 + R_3} = \frac{E R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}.$$

Remplaçons maintenant R_1 et R_2 par leurs valeurs $[R_1] = -j/\omega c$ et $[R_2] = \omega\mathfrak{L}j$

$$x_{\text{imag.}} = \frac{E\omega\mathfrak{L}j}{\dfrac{\mathfrak{L}}{c} - \dfrac{R_3 j}{\omega c} + \omega\mathfrak{L}R_3 j} = \frac{E\omega\mathfrak{L}j}{\dfrac{\mathfrak{L}}{c} + R_3\left(\omega\mathfrak{L} - \dfrac{1}{\omega c}\right)j}$$

quantité de la forme

$$x = \frac{\alpha j}{\beta + \gamma j} = \frac{\alpha j(\beta - \gamma j)}{\beta^2 + \gamma^2} = \frac{\alpha\gamma + \alpha\beta j}{\beta^2 + \gamma^2}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'intensité efficace réelle vaut

$$\sqrt{\frac{\alpha^2\gamma^2+\alpha^2\beta^2}{(\beta^2+\gamma^2)^2}}=\frac{\alpha}{\sqrt{\beta^2+\gamma^2}}$$

ou

$$i_{\text{eff}}=\frac{\omega\mathfrak{L}e_{\text{a eff}}}{\sqrt{\frac{\mathfrak{L}^2}{c^2}+R_3^2\left(\omega\mathfrak{L}-\frac{1}{\omega c}\right)^2}}.$$

Cette intensité est, en général, fonction de la résistance R_3 mise en dérivation sur la bobine de self ; mais on voit que l'on peut s'en affranchir si la capacité du condensateur et le coefficient de self de la bobine sont tels que $\omega\mathfrak{L}=1/\omega c$, c'est-à-dire qu'il y ait résonnance dans le circuit principal ACD$\mathfrak{L}$B. On arrive ainsi à cette propriété extrêment curieuse : *Il est possible d'alimenter au moyen d'une différence de potentiel constante, une dérivation sans réactance* DR_3B par un courant constant $i_{\text{eff}}=\frac{\omega\mathfrak{L}e_{\text{eff}}}{\mathfrak{L}/c}=\omega ce_{\text{eff}}$, *quelle que soit sa résistance.*

Exercice. — Déduire par les imaginaires l'intensité du courant traversant le circuit formé par une capacité et une résistance avec self, mises en série.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE VIII.

§ I. — Les alternateurs monophasés.

Le cas d'une spire tournant sur elle-même ne se rencontre que dans les petites machines produisant du courant alternatif ou alternateurs. En général, la spire toute entière est déplacée d'une pièce autour d'un axe de rotation qui lui est extérieur ou, ce qui revient au même, le champ se déplace devant la spire immobile. On identifie aisément ces cas avec le premier, en remarquant que tout se passe de la même manière vis-à-vis du flux embrassé. En 1 (fig. 153), le flux est maximum; il est nul en 2; maximum mais de sens inverse dans la position 3, enfin nul en 4.

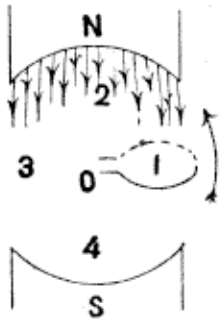


FIG. 153.

On trouverait également que la force électromotrice développée $e = \mathrm{E} \sin \omega t = \mathrm{E} \sin \frac{2\pi}{\mathrm{T}} t$, ω étant la vitesse angulaire mécanique de la spire et T le temps exigé par une rotation complète.

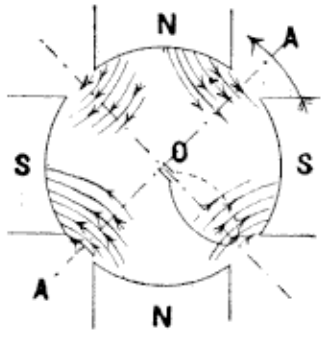


FIG. 154.

Si, au lieu d'une paire de pôles, nous en avons deux de même intensité que précédemment, de A en A′ (fig. 154), la spire passe par les mêmes valeurs de variation de flux et nous aurons une période; de A′ en A une seconde période. La spire possédant la même vitesse angulaire que précédemment, les variations se feront

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

deux fois plus vite, et la force électromotrice induite sera double :

$$e' = 2\,E \sin \omega' t = E' \sin \frac{2\pi}{T'} t = E' \sin \frac{2\pi}{\frac{T}{2}} t$$
$$= E' \sin 2 . \frac{2\pi}{T} t = E' \sin 2\omega t.$$

c'est-à-dire qu'à égale vitesse angulaire mécanique de la spire, la vitesse angulaire ou pulsation de la force électromotrice est devenue deux fois plus grande : $\omega' = 2\omega$. La fréquence aura doublé.

S'il y a p paires de pôles disposés comme l'indique la dernière figure, $\omega'' = p . 2\pi/T = p\omega$, toujours à égale vitesse angulaire mécanique ω de la spire La fréquence est multipliée par p.

Si, par exemple, une spire ou une série de spires fait 700 tours par minute ou 11,66 tours par seconde et qu'il y ait 8 paires de pôles, la fréquence est de 8. 700/60 = 93,33, la durée d'une période sera 1/93,33 de seconde et la vitesse angulaire de la force électromotrice

$$\omega' = \frac{2\pi}{\frac{1}{93,33}} = 2\pi . 93,33 = 586,11 \text{ radians par seconde.}$$

Nous serons donc dans les mêmes conditions que si les mêmes spires tournaient à la vitesse de 93,33 tours par seconde, 8 fois plus grande que dans le premier cas, dans un champ homogène unique ayant la même intensité qu'un des champs multiples.

Les machines industrielles sont, en général, destinées à la production de courants de haute tension (on atteint aujourd'hui directement 10 à 12 000 volts) et de courte période, la fréquence variant de 25 à 133. Il est nécessaire, pour atteindre ces hauts voltages et ce grand nombre d'alternances par seconde, sans arriver à des vitesses de rotation exagérées, de sommer les forces électromotrices induites dans les spires par leur montage en tension et d'employer des machines multipolaires. La puissance maximum est de 5 à 8 000 kw.

Nous trouvons dans tout alternateur, un inducteur engendrant le ou les champs magnétiques nécessaires et un induit coupant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ce ou ces champs, ou coupé par lui ou eux, dont le bobinage sera, comme dans les machines à courant continu à anneau, à tambour ou à disque.

Abstraction faite du genre de bobinage de l'induit, on distingue trois classes d'alternateurs : 1° *à inducteur fixe et induit mobile*; 2° *à inducteur mobile et induit fixe;* 3° *à inducteur et induit fixes ou à enroulements fixes ou à fer tournant.*

Les diverses bobines induites peuvent être montées, soit en tension, soit en quantité. La seule précaution à prendre est de n'associer que des bobines siège de forces électromotrices de mêmes phases, c'est-à-dire semblablement placées par rapport aux noyaux inducteurs de même polarité, ou siège de forces électromotrices exactement opposées, c'est-à-dire semblablement placées par rapport aux noyaux inducteurs de polarités inverses et, dans ce cas, il faut renverser les connexions d'une à l'autre. Si l'on ne procédait pas ainsi, à certains moments les forces électromotrices des bobines réunies seraient orientées les unes dans un sens, les autres dans l'autre, et viendraient en déduction l'une de l'autre au lieu de s'additionner.

1° **Inducteur fixe et induit mobile.**—Première machine d'induction de Siemens. — C'est une des machines le plus simples. L'excitation se fait au moyen d'aimants permanents en fer à cheval

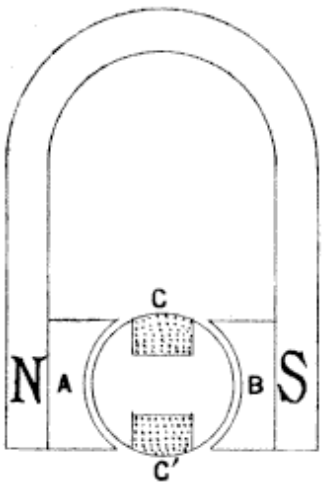


Fig. 155.

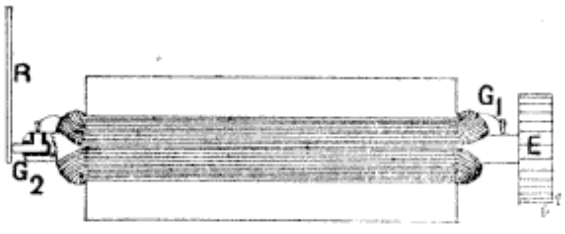


Fig. 156.

placés parallèlement, dont les pôles de même nom sont réunis par des armatures en fer doux A et B (fig. 155) rodées cylindri-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quement dans leurs parties en regard. Entre celles-ci tourne l'induit (fig. 157) composé d'un noyau en fer doux, dont la section est en double T. Il se termine par un engrenage E (fig. 156). Dans les évidements diamétraux C, C', vient s'enrouler du fil isolé dont une extrémité est soudée à une goupille G_1 fixée dans l'axe et l'autre à une goupille G_2 terminant l'axe du côté opposé à l'engrenage, isolée de ce dernier par un manchon en ébonite et sur laquelle vient appuyer une lame ressort R de prise de courant, raccordée à une borne. Le second pôle de la machine est fourni par une borne raccordée à sa partie massive.



FIG. 157.

Dans la position représentée figure 155, le flux embrassé est maximum, la force électromotrice est nulle; dans la position à angle droit, le flux embrassé est nul, le nombre de lignes de force coupées est maximum ainsi que la force électromotrice. Nous avons donc un 1/4 de période par 1/4 de tour ou une période par tour de la bobine.

MACHINE SIEMENS A DISQUE. — Deux séries d'électro-aimants inducteurs N, S (fig. 158), parcourus par des courants permanents, à polarités alternées, sont disposées suivant deux couronnes parallèles. L'intervalle régnant entre les noyaux d'une même couronne est égal à la largeur des pôles. L'induit a ses bobines en nombre égal à celui des paires de pôles inducteurs, enroulées sur un disque tournant dans l'entrefer étroit existant entre les deux couronnes d'électros. Les bobines du disque sont jointives; leur ouverture est égale à la section polaire des induc-

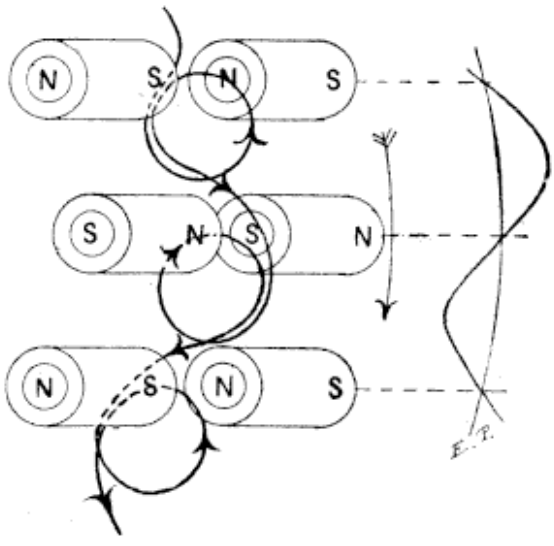


FIG. 158.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teurs et leur largeur totale double de la largeur polaire. De cette manière il n'y a aucun espace perdu. Les champs successifs étant alternés, chaque bobine induite est le siège d'une force électromotrice de sens opposé à celle développée dans les bobines adjacentes. Pour que ces forces électromotrices ne soient pas en opposition, les connexions sont renversées d'une bobine à l'autre, comme l'indique la figure. Les extrémités de l'enroulement induit viennent se terminer à deux bagues en cuivre isolées, sur lesquelles appuient les balais collectant le courant.

Considérons une bobine en particulier. Avant d'embrasser le flux magnétique émis par un noyau, le flux qui la traverse va en augmentant, la force électromotrice induite est négative. Quand son axe coïncide avec l'axe du noyau, le flux est maximum, la force électromotrice est nulle. Le flux décroît ensuite, d'où force électromotrice positive, pour croître de nouveau en sens inverse et redevenir maximum en face du pôle suivant, avec nouveau passage par zéro de la force électromotrice.

Deux pôles successifs correspondent conséquemment à une onde de courant et la période entière comporte l'espace compris entre deux pôles consécutifs de même nom, sur la circonférence polaire. Le parcours d'une couronne polaire munie de $2p$ paires de pôles, correspondra à p périodes, et si l'induit fait N tours par seconde, la fréquence sera

$$f = p\ \mathrm{N},$$

d'où pour la durée d'une période

$$\mathrm{T}' = \frac{1}{p\mathrm{N}} = \frac{1}{p\mathrm{N}}.$$

et pour la vitesse angulaire de la force électromotrice

$$\omega = 2\pi f = 2\pi p\mathrm{N}.$$

Dynamo bipolaire a anneau. — En raccordant à deux bagues isolées sur lesquelles frottent des balais, deux spires diamétralement opposées d'un induit bipolaire à anneau à courant continu,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on recueillera aux bagues un courant alternatif dont la force électromotrice maximum est égale à celle E de la dynamo et par conséquent dont la valeur efficace a pour expression $\frac{E}{i\ 2}$.

2° **Inducteur mobile et induit fixe.** — MACHINE GRAMME A ANNEAU. — L'inducteur tournant présente un axe en fer (fig. 159) pourvu de projections radiales chaussées de bobines parcourues par un courant continu donnant aux extrémités des noyaux des polarités successivement inverses. Le courant est amené à l'inducteur par l'intermédiaire de balais frottant sur des bagues isolées, connectées aux extrémités de l'enroulement.

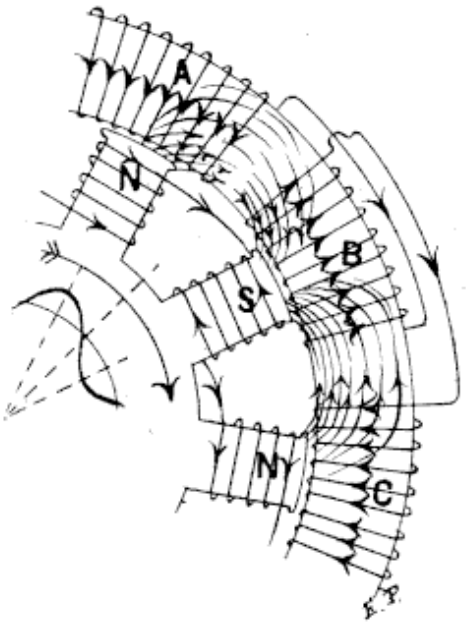


FIG. 159.

L'induit a la forme d'un anneau enroulé d'un nombre pair de bobines contiguës et entourant l'inducteur.

Supposons les projections polaires symétriquement placées entre les bobines. Celles-ci embrassent alors un flux maximum et la force électromotrice y est nulle. Au contraire, quand les extrémités polaires se trouveront au droit du milieu des bobines (cas de la figure), le nombre de lignes de forces coupées sera le plus grand, il en résultera une force électromotrice maximum.

Si le nombre de bobines est égal au nombre de pôles, on voit que les conducteurs de A couperont le champ issu de N dans le même sens que ceux de B couperont le champ rentrant dans S. La direction de ces champs étant inverse, les forces électromotrices seront opposées et il faudra connecter inversement les bobines successives, ainsi qu'il est représenté sur la figure 159.

Le parcours de l'arc de l'induit occupé par une bobine correspondra à une onde positive ou négative, de sorte que la formule établie pour l'alternateur précédent est applicable.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Induit en tambour. — Actuellement on emploie de préférence, comme pour les dynamos, l'enroulement en tambour. L'inducteur est formé par un croisillon en fonte sur la périphérie duquel viennent se fixer, au moyen de rainures spéciales ou par des boulons, des paquets de tôles d'acier doux constituant par leur assemblage les pôles de l'inducteur (fig. 161).

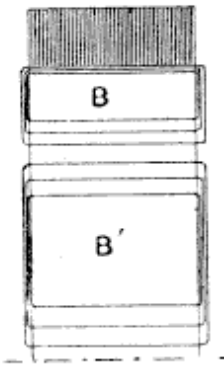


Fig. 160.

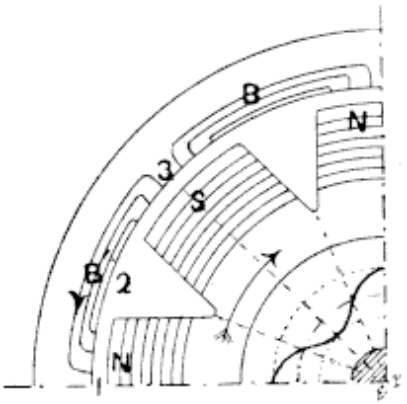


Fig. 161.

Les bobines inductrices, montées en série, sont façonnées mécaniquement sur des gabarits et constituées par des fils ou des rubans de cuivre enroulés de champ et soigneusement isolés. Elles épousent la forme des masses polaires sur lesquelles elles sont maintenues par des cadres ou des cales de bronze.

Le courant leur est amené au moyen de bagues isolées de l'axe et sur lesquelles frottent des balais.

L'enroulement induit se fait sur la face interne opposée aux extrémités polaires sous forme de bobines plates B, B', (fig. 160 et 161) dont les conducteurs sont placés dans des rainures suivant les génératrices intérieures de l'armature et raccordées par des boucles rabattues sur les côtés de celle-ci. Quand ces conducteurs présentent une forte section, ils sont enveloppés d'épaisses couches de papier ou de micanite sous forme de fourreaux de sabre et calés dans les rainures des tôles de l'induit. Ces dernières viennent, d'autre part, s'assembler solidement dans la carcasse extérieure en fonte. Des intervalles vides sont ménagés de distance en distance, pour faciliter la ventilation que le mouvement de l'inducteur assure d'une manière complète.

Enfin la visite de l'induit est facilitée par son montage sur des glissières qui permettent de l'écarter complètement des inducteurs par un déplacement parallèle à l'arbre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° **Inducteur et induit fixes ou alternateur à fer tournant.** — MACHINE D'ŒRLIKON. — L'induit comporte une culasse en fonte C (fig. 162) dans laquelle viennent s'encastrer deux couronnes A, A, en tôles de fer doux, pourvues chacune d'un enroulement en tambour représenté schématiquement (fig. 163). Entre les deux couronnes, s'enroule une bobine inductrice unique B. Enfin, à l'intérieur de l'induit tourne l'inducteur constitué par une masse en fer doublement dentée I (fig. 164), dont les dents viennent successivement compléter le circuit magnétique de chaque paire de bobines situées en face l'une de l'autre dans les deux enroulements. Il en résulte des variations de flux engendrant un courant alternatif dans chacune des moitiés de l'induit. On groupe ces deux circuits soit en tension, soit en dérivation.

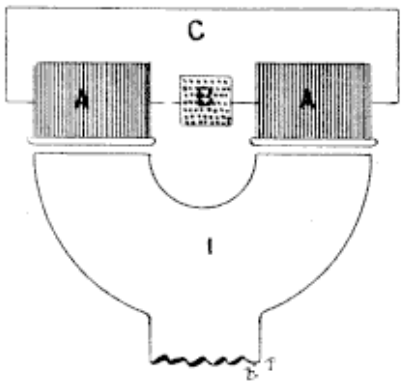
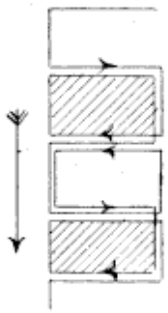


FIG. 162.


FIG. 163.

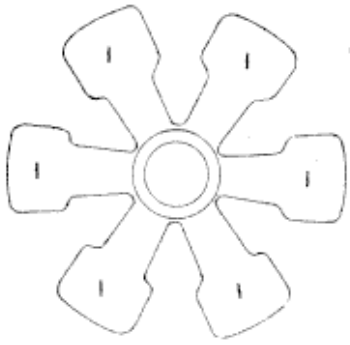


FIG. 164.

On remarque que tous les pôles situés d'un même côté du plan vertical de symétrie de l'induit sont de mêmes noms, d'où l'appellation de machines *homopolaires*, par opposition aux autres dans lesquelles nous rencontrons successivement des pôles de noms contraires d'où la désignation générique de machines *hétéropolaires*.

Comparaison des trois systèmes. — On ne rencontre plus le premier système que dans les machines de faible ou moyenne puissance. Si le disque a l'avantage de restreindre les parties, siège d'hystérèse et de courants de Foucault, il présente, par contre, l'inconvénient d'avoir ses parties mobiles, les plus difficiles à bien isoler, traversées par le courant à haute tension. Il est abandonné.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le troisième système, qui est le plus récent, présente l'avantage de n'avoir qu'une bobine magnétisante unique et fixe ; il n'y existe aucun enroulement mobile et par conséquent ni bagues, ni frotteurs. La machine est donc d'une grande simplicité et d'une conduite facile. Mais l'aimantation du fer de l'induit n'étant pas renversée, les variations de flux acquièrent une importance relative beaucoup moindre à cause du magnétisme rémanent. Pour une même puissance, ces alternateurs sont donc beaucoup plus volumineux que les autres, la chute de tension y est plus grande, leur rendement moindre, c'est pourquoi on les abandonne. En somme c'est le second système qui est universellement employé, aujourd'hui, pour les machines de moyenne et de grande puissance.

Bobinage des induits en tambour (1). — Le système d'enroulement le plus simple est représenté par l'enroulement ondulé de la fig. 165 dans lequel nous trouvons une barre par pôle. La surface de l'induit est supposée développée dans un plan, de même que l'extrémité des pôles inducteurs.

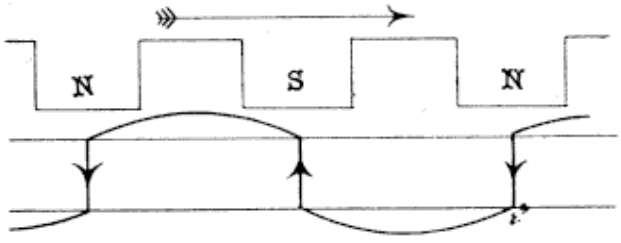


Fig. 165.

Dans la position représentée, la force électromotrice est maximum dans toutes les barres. Lorsque les pôles se seront déplacés d'une demi-distance polaire elle sera nulle ; une demi-distance plus loin, elle sera redevenue maximum mais de sens inverse ; une demi-distance plus loin elle vaudra zéro, pour revenir au même maximum de départ une demi-distance polaire plus loin. La période correspond donc à deux pas polaires.

On conçoit qu'avec un tel enroulement, le nombre des conducteurs serait trop restreint. Pour obtenir une force électromo-

(1) Lebois. *Electricité industrielle*, 2e partie. Librairie Ch. Delagrave, Paris, 1908.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trice élevée, on devrait faire tourner trop vite la couronne polaire. On pourrait, il est vrai, arrivé au bout de l'enroulement, rebobiner soit à côté de l'autre, soit dans les mêmes encoches, un second, un troisième ... enroulement semblable, ce qui majorerait la force électromotrice à proportion. Mais un tel dispositif présenterait le grand inconvénient d'exiger le sectionnement total ou partiel des enroulements en cas d'avarie. D'autre part, des conducteurs à différence de potentiel élevée seraient voisins.

Bobines longues, bobines courtes. — Aussi préfère-t-on, après emprunt du second conducteur dans l'encoche 4 (fig. 166),

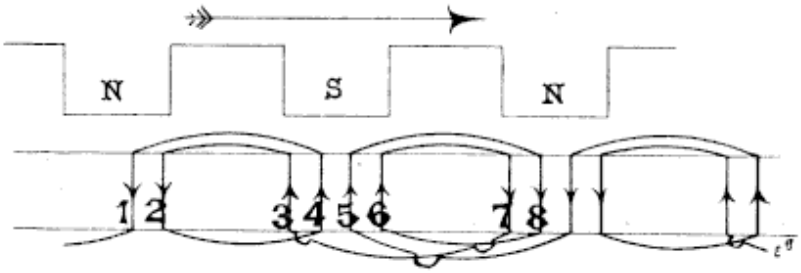


Fig. 166.

revenir à un conducteur placé dans l'encoche 2, formant ainsi une première boucle ou spire, puis à l'encoche 3 formant une seconde boucle ... en tout une bobine de 1, 2, 3 ... spires pour de là se raccorder, encoche 7, à la sortie de la bobine suivante semblablement composée. Les bobines ainsi disposées sont dites *longues*, parce que leur ouverture se rapproche d'une distance polaire.

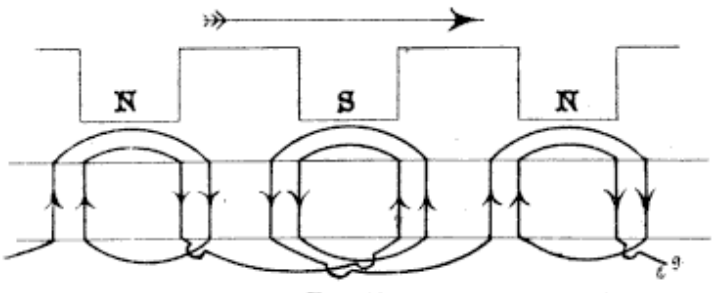


Fig. 167.

Quand, au contraire, leur ouverture est à peu près d'un demi-pas polaire (fig. 167), elles sont dites courtes.

On admet généralement plusieurs conducteurs dans une même encoche, suivant le voltage que l'on veut obtenir.

Tambour tournant. — Comme nous l'avons dit, on adopte ce type

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour les alternateurs de faible ou de moyenne puissance et de tension peu élevée.

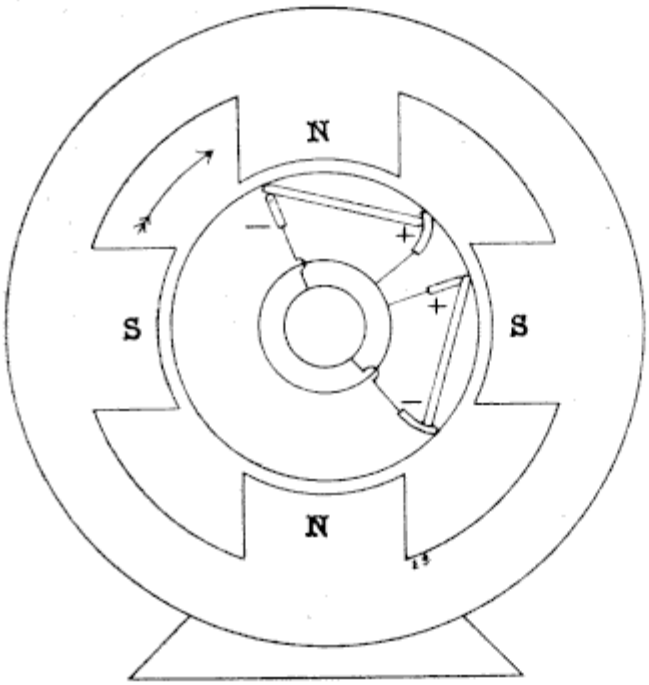


Fig. 168.

Montage en dérivation. — Les bobines (fig. 168) viennent se raccorder à deux bagues isolées sur lesquelles pressent les balais. On aura soin de raccorder, à la même bague, alternativement les entrées et les sorties des bobines successives, puisque les forces électromotrices engendrées dans les diverses bobines sont successivement de sens inverse.

Montage en série. — Ici (fig. 169), la sortie d'une bobine est raccordée à la sortie de la suivante, l'entrée de celle-ci à l'entrée de la suivante et ainsi de suite, les deux extrémités de l'enroulement étant reliées à deux bagues isolées.

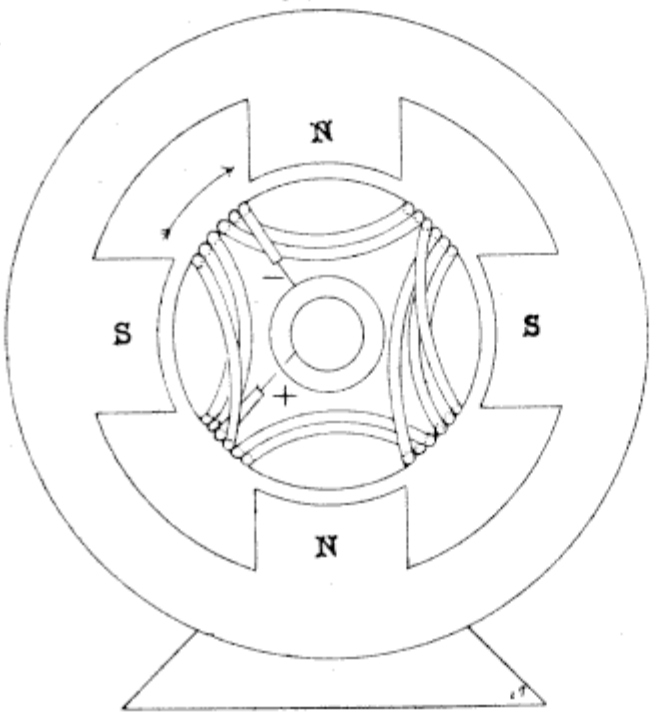


Fig. 169.

Il convient de ne pas admettre dans une même rainure les côtés adjacents de deux bobines consécutives, pour éviter d'avoir entre deux conducteurs voisins toute ou presque toute la différence de potentiel que la machine est susceptible de développer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tambour fixe. — Tous les alternateurs de grande puissance ou de force électromotrice élevée sont de ce type. Comme nous l'avons vu précédemment (p. 212), les inducteurs, tournant, occupent la partie centrale de la machine, tandis que les enroulements viennent s'adapter dans les rainures de la surface interne en tôle dentée du tambour.

Les bobines, s'il s'agit d'un conducteur mince, sont formées au moyen de gabarits rainurés, en bois, placés contre le tambour ; on passe le conducteur dans les encoches les mêmes nombres de fois.

Force électromotrice des alternateurs. — Nous appliquerons la formule générale $e = -d\mathfrak{N}/dt$. Soit un alternateur à $2p$ pôles alternés, faisant N tours par seconde et portant n conducteurs sur son induit. Le nombre de spires est de $n/2$. Supposons l'inducteur fixe.

Pendant une période, une bobine se transportant d'un intervalle polaire où elle n'absorbait aucune ligne de force en face d'un pôle qui lui envoie le flux $\mathfrak{N}$, revient dans un intervalle polaire, puis devant un pôle de nom contraire et enfin dans un intervalle polaire. Elle est donc le siège d'une variation de flux de $4\,\mathfrak{N}$.

Cherchons la durée de cette variation, c'est-à-dire d'une période. Par tour nous avons p périodes et $p\,\mathrm{N}$ par seconde. La durée d'une période est ainsi $1/p\mathrm{N}$. Dès lors, la force électromotrice *moyenne* développée est de

$$\frac{4\,\mathfrak{N}}{\frac{1}{p\,\mathrm{N}}} = \frac{4\,p\,\mathrm{N}\,\mathfrak{N}}{10^8} \text{ volts.}$$

Dans les $n/2$ spires en série on aura $e_m = \dfrac{2\,n\,p\,\mathrm{N}\,\mathfrak{N}}{10^8}$.

Si la force électromotrice que développe la machine est de forme rigoureusement sinusoïdale, nous avons vu (T. I, p. 276) qu'on a entre les forces électromotrices moyenne et efficace la relation $e_m/e_{eff} = 0{,}9$.

Remplaçant e_m par cette valeur, dans la formule précédente nous obtenons

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$e_{eff} = \frac{2\,n\,p\,N\,\mathfrak{N}}{10^8 \times 0{,}9} = \frac{2{,}22\,n\,p\,N\,\mathfrak{N}}{10^8}.$$

Mais dans les alternateurs industriels, la courbe de force électromotrice n'est pas exactement une sinusoïde, bien qu'on puisse souvent la considérer pratiquement comme telle. D'autre part, les côtés d'une même bobine presque toujours répartis dans plusieurs encoches, ne passent pas simultanément devant les mêmes points des pôles, de sorte que leurs maximums ne coïncidant pas, la force électromotrice résultante n'atteint jamais la valeur écrite ci-dessus.

Ce n'est donc pas par 2,22 qu'il faut multiplier le produit $n\,p\,N\,\mathfrak{N}$, mais par un certain coefficient k dit de *Kapp*, qui dépend essentiellement du type de la machine et principalement de la largeur des pôles, de la largeur, en fonction du pas polaire, du faisceau de conducteurs actifs qui forment un des côtés des bobines ; on le détermine par le calcul, ou mieux, par l'expérience.

On a donc

$$e_{eff} = \frac{k\,n\,p\,N\,\mathfrak{N}}{10^8}$$

dans le cas du montage en série. On modifierait comme il convient cette formule dans le cas d'un montage en dérivation ou mixte.

Si l'on a un montage en dérivation par exemple, le nombre de bobines étant $2\,p$, nous avons p fois moins de spires en tension et

$$e_{eff} = \frac{k\,n\,N\,\mathfrak{N}}{10^8}.$$

Le tableau suivant, extrait de l'ouvrage de Kapp [1], donne la valeur k dans quelques cas particuliers.

[1] *Les machines dynamo-électriques.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

		Conducteurs actifs de chaque côté des bobines logés dans				
		une rainure	2 rainures		3 rainures	
Nombre de phases [1] . .		1, 2 et 3	1 et 2	1 et 3	1 et 2	1 et 3
$\frac{\text{Largeur d'un faisceau de conducteurs constituant un des côtés de chaque bobine}}{\text{Pas polaire}} = \frac{c}{L} =$		0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{9}$
$\frac{\text{Ecartement des rainures}}{\text{Pas polaire}} = \frac{d}{L} =$		1	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{9}$
$\frac{\text{Largeur des pôles}}{\text{Pas polaire}} = \frac{l}{L} =$	$\frac{2}{3}$	$k =$ 2,46	2,18	2,3	2,16	2,26
	$\frac{1}{2}$	2,83	2,45	2,59	2,26	2,54

Réaction d'induit. — La réaction d'induit d'un alternateur, c'est-à-dire la modification qu'exerce sur le champ inducteur le courant qui traverse l'induit, est fonction de l'intensité du courant, de son déphasage et, naturellement aussi, de la forme et de la constitution de l'alternateur. Considérons par exemple la machine figure 161, et supposons que le courant soit en concordance de phase avec la force électromotrice.

Dans la position figurée, où le premier noyau N est en face de 1, le courant dans la bobine B' a le sens de la flèche. Ce courant envoie un flux directement opposé au flux inducteur, et cet effet perdure jusqu'à extinction du courant, ce qui arrive quand le milieu de N est en face de 2. A partir de ce moment, le courant change de sens, et son flux concorde avec le flux inducteur jusqu'en 3 et ainsi de suite. Les mêmes effets se produisent dans toutes les bobines. Une demi-onde est donc réduite d'autant que la demi-

(1) Bien que n'ayant pas encore étudié les alternateurs polyphasés, nous donnons les chiffres relatifs à ces machines pour compléter le tableau. Pour le moment, il suffira de retenir que les chiffres de toutes les colonnes s'appliquent aux alternateurs simples, ne fournissant qu'un courant alternatif unique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

onde consécutive est augmentée. Au total, *quand le courant est en concordance avec la force électromotrice, la réaction d'induit est nulle* A noter que la selfinduction de la machine atténue considérablement les déformations qui tendent à se produire.

Supposons maintenant le courant en retard sur la force électromotrice. Dans ce cas, la force électromotrice induite sera annulée (position 2), alors que le courant aura encore le sens de la flèche. Par conséquent, il enverra pendant plus longtemps qu'avant un flux opposé au flux inducteur, et la force électromotrice engendrée dans l'induit se trouvera réduite.

Or nous avons fait remarquer (T. I, p. 292) qu'un courant déphasé de φ sur sa force électromotrice est, à chaque instant, la somme de deux courants : l'un $I \cos \varphi \sin \omega t$ en concordance avec la force électromotrice; l'autre $I \sin \varphi \sin (\omega t - \pi/2)$ déphasé en arrière de $\pi/2$ par rapport à celle-là. D'après ce que nous venons de voir, la portion wattée du courant $I \cos \varphi \sin \omega t$ n'interviendra pas dans la réaction d'induit, laquelle sera entièrement due à l'autre et, en conséquence, proportionnelle à $I \sin \varphi$ ou à $i_{eff} \sin \varphi$.

Si l'alternateur dessert un circuit inductif, il sera donc nécessaire, pour compenser la réaction d'induit, d'appliquer sur l'inducteur un nombre d'ampères-tours supplémentaires $m = K i_{eff} \sin \varphi$.

Si, au contraire, le courant est déphasé en avant, l'inverse se produit et la réaction d'induit a pour effet de renforcer le voltage développé par la machine.

On peut aisément mettre graphiquement en évidence l'effet de la réaction d'induit. φ étant le déphasage du courant sur la force électromotrice e_{eff} aux bornes, la force électromotrice totale E_{eff} (fig. 170) est la résultante de e_{eff} force électromotrice aux bornes, de ri_{eff} force électromotrice effective de l'induit en phase avec le courant, et de $\omega \mathfrak{L} i_{eff}$ force électromotrice de self perpendiculaire et en avant sur le courant.

Remarquons d'autre part que la force électromotrice engendrée se calcule par l'équation générale $E \sin \omega t = -\frac{d\mathfrak{N}}{dt}$ d'où $d\mathfrak{N} = -E \sin \omega t \, dt$ et $\mathfrak{N} = E/\omega \cos \omega t = E/\omega \sin (\omega t + \pi/2)$.

Le flux est donc déphasé de $\pi/2$ en avant sur la force électro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

motrice. Par conséquent la force électromotrice totale E_{eff} est due à un flux utile $\mathfrak{N}_u$ en quadrature en avant sur elle et ce flux est la somme géométrique des flux fictifs $\mathfrak{N}'$ dû à l'inducteur et $\mathfrak{N}''$ dû à la réaction d'induit. Ce dernier a la direction OI du courant, lui est proportionnel et l'on voit que l'effet de la réaction d'induit est de forcer d'établir un nombre d'ampères-tours inducteurs proportionnel à $\mathfrak{N}'$, alors que ceux développant $\mathfrak{N}_u$ eussent été suffisants.

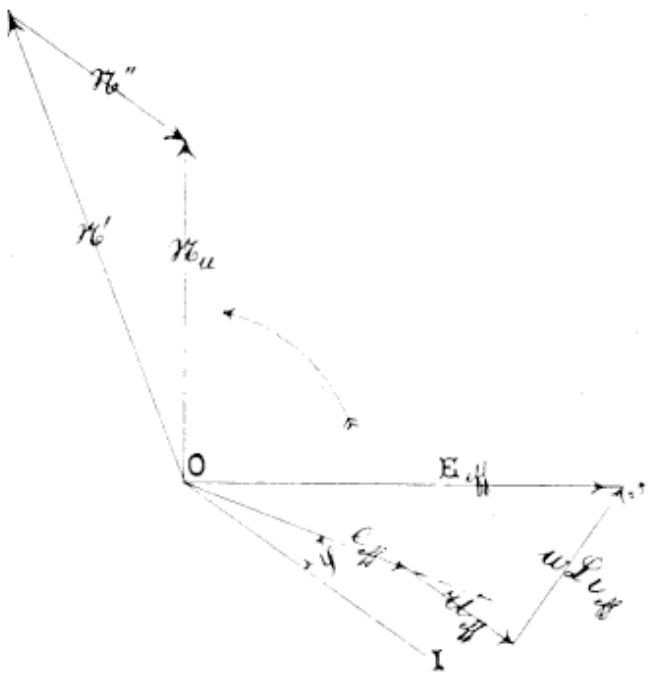


FIG. 170.

Excitation des inducteurs. — Dans les très petites machines, nous rencontrons des aimants permanents; parfois on utilise, à l'aide d'un commutateur circulaire sur lequel frottent des balais, une dérivation du courant alternatif principal; mais en général, l'excitation se fait par courant continu au moyen d'une petite dynamo dite *excitatrice*, le plus souvent calée sur l'extrémité de l'axe de l'alternateur opposée à la poulie de commande.

Dans les grandes usines, où l'on dispose au tableau de barres sous tension constante, l'excitation se fait par une dérivation prise à ces barres, c'est-à-dire qu'elle est indépendante. Quand il y a plusieurs alternateurs couplés en dérivation, leurs rhéostats d'excitation sont souvent commandés simultanément par un dispositif mécanique, de manière à modifier conjointement leurs voltages par une seule manœuvre.

Courant maximum. — Un alternateur peut être mis en court-circuit, à condition que celui-ci ne dure pas trop longtemps.

Dans les alternateurs à faible chute de tension, l'intensité

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

maximum ne dépasse pas six fois l'intensité normale et est généralement moindre. Dans les alternateurs à forte chute de tension, l'intensité du courant de court-circuit est tout au plus le double ou le triple de l'intensité normale.

Ce fait tient à ce que, dans un alternateur en court-circuit, le déphasage en arrière de l'intensité sur la force électromotrice atteignant presqu'une demi-période ($\operatorname{tg}\varphi = \omega\mathfrak{L}/r$, r petit, $\mathfrak{L}$ grand) l'affaiblissement du champ inducteur ki_{eff} sin φ est alors maximum et la force électromotrice se trouve réduite.

Caractéristiques d'un alternateur. — De même que pour les dynamos, *les caractéristiques sont les courbes, relevées à vitesse constante, des forces électromotrices en fonction des intensités.*

La *caractéristique à circuit ouvert* s'obtient en portant en abscisses les intensités du courant d'excitation et, en ordonnées, les voltages lus aux bornes à circuit ouvert. La *caractéristique extérieure* se trace en portant en abscisses, les intensités efficaces débitées par la machine, et en ordonnées, les différences de potentiel efficaces aux bornes. A ces deux courbes on joint généralement une troisième, la *caractéristique de court-circuit* donnant, en fonction des intensités du courant d'excitation, les intensités débitées par l'alternateur mis en court-circuit sur l'ampèremètre de mesure.

Etude graphique d'un alternateur. — Méthode de Behn-Eschenburg. Considérons un alternateur dont l'induit (fig. 171) possède une inductance $\omega\mathfrak{L}$, une résistance r, et qui débite un courant i_{eff} dans un circuit d'inductance ωl, de résistance R. La force électromotrice totale qu'il développe est E_{eff}, celle aux bornes e_{eff}. L'inductance totale du circuit étant $\omega(l + \mathfrak{L})$ et la résistance totale $R + r$, E_{eff} est la résultante de $(R + r)\, i_{eff}$ et de $\omega(l + \mathfrak{L})\, i_{eff}$ (fig. 172).

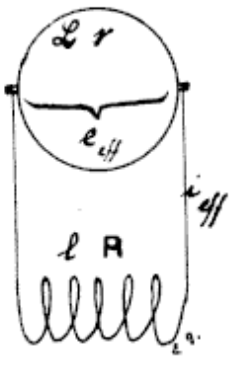


Fig. 171

Si nous composons maintenant la force électromotrice effective Ri_{eff} agissant dans le circuit extérieur avec la force électromotrice de selfinduction du même circuit, nous

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

obtenons comme résultante la force électromotrice nécessaire pour faire traverser le circuit extérieur par le courant i_{eff}, force électromotrice extérieure ou aux bornes, ou utile e_{eff}. De même, en composant la force électromotrice effective ri_{eff} agissant dans l'induit avec la force électromotrice de selfinduction du même circuit, nous obtenons en grandeur et en phase la force électromotrice e'_{eff} nécessaire pour faire traverser l'induit par le courant i_{eff}. C'est la chute de tension dans l'induit. Et la force électromotrice totale E_{eff} est la résultante de ces deux forces électromotrices : perte de tension dans l'induit et différence de potentiel aux bornes.

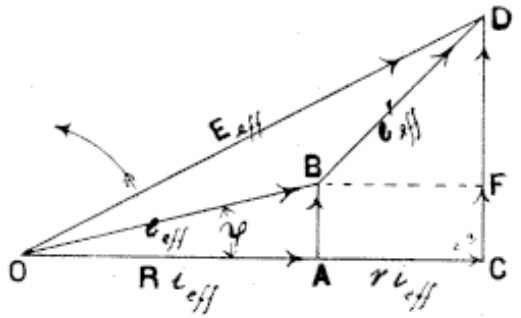


FIG. 172.

Le fonctionnement d'un alternateur est complètement déterminé, si l'on peut construire ce graphique pour n'importe quel régime. Le triangle OAB se trace aisément dès que l'on connaît la force électromotrice aux bornes e_{eff}, l'intensité du courant traversant le circuit i_{eff} et la résistance du circuit extérieur R, ou bien e_{eff} et φ. La construction du triangle BFD est plus délicate, attendu qu'il est formé de côtés dont l'un a une longueur dépendant du coefficient de selfinduction $\mathfrak{L}$ de l'alternateur. Or ce coefficient se modifie avec la position relative des pôles inducteurs par rapport à l'induit et avec l'intensité du courant traversant le circuit. Il est variable et, tout ce que l'on pourra faire, sera d'en déterminer la valeur moyenne. On y parvient au moyen de la méthode de Behn-Eschenburg ou du court-circuit. On commence par tracer la caractéristique à circuit ouvert $E_{0\,eff}$ en fonction du courant d'excitation que l'on augmente progressivement, l'induit tournant à la vitesse choisie (fig. 173). Puis on met l'alternateur en court-circuit sur un ampèremètre et, augmentant graduellement l'excitation, toujours à la vitesse constante choisie, on note les intensités correspondantes. Il faut opérer rapidement, en raison de la forte intensité des courants traversant l'induit. On obtient ainsi

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une courbe I_{cc} qui se confond sensiblement avec une droite et l'on peut dès lors, en appelant résistance apparente de l'induit le rapport $E_{o\,eff}/I_{cc}$, tracer la courbe des résistances apparentes pour les diverses excitations. En posant $R_{app} = \sqrt{r^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2}$, on déterminera $\omega \mathfrak{L}$ et par suite $\omega \mathfrak{L}\, i_{eff}$ pour les divers régimes, ce qui permet, connaissant également r, donc $r\, i_{eff}$, de construire le triangle B F D et de compléter le diagramme pour n'importe quel régime.

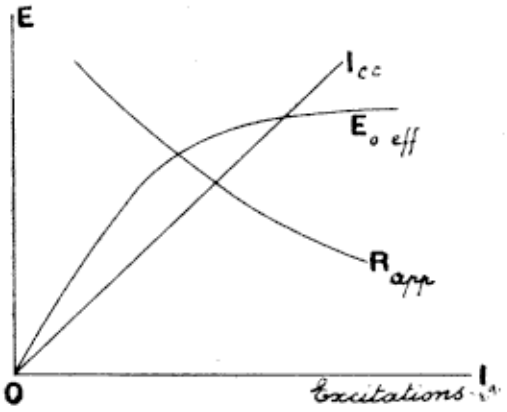


Fig. 173.

En somme, la méthode revient à supposer que la force électromotrice agissant pendant le court-circuit, est celle existant à circuit ouvert pour l'excitation considérée, ou à poser $E_{o\,eff} = E_{eff}$ à égalité d'excitation; on peut donc simplifier la construction de la manière suivante : connaissant $E_{eff} = E_{o\,eff}$ pour le régime que l'on veut étudier, le diagramme des résistances apparentes donne, pour la même excitation, la résistance apparente de l'induit. En multipliant par le débit on obtient e'_{eff}. Dès lors, traçant des arcs de cercle des points O et B comme centres avec E_{eff} et e'_{eff} comme rayons, leur point d'intersection donne le point D, ce qui permet de compléter le diagramme et d'en déduire les valeurs de r et $\mathfrak{L}$.

Diagramme simplifié.—Dans les alternateurs de construction moderne, la résistance r de l'induit est en général négligeable, de sorte que le diagramme se simplifie comme l'indique la figure 174.

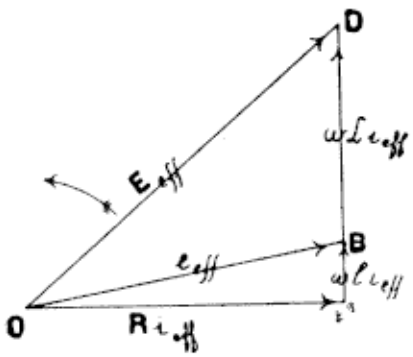


Fig. 174.

En d'autres termes, en joignant à l'origine, l'extrémité du vecteur de la force électromotrice de selfinduction de l'alternateur on obtient le vecteur de force électromotrice to-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tale de l'alternateur et, d'autre part, le vecteur de force électromotrice totale peut alors être considéré comme étant la résultante du vecteur de force électromotrice aux bornes (ou au tableau) OB et du vecteur de force électromotrice de selfinduction BD.

---

§ 2. — Couplage des alternateurs monophasés.

On ne peut évidemment coupler que des alternateurs de même fréquence, puisqu'avec des fréquences différentes, les forces électromotrices se trouveraient périodiquement en opposition.

Couplage en série. — *Le couplage en série n'est réalisable que si les machines sont réunies rigidement.*

Soient, en effet, deux alternateurs montés en série, entraînés par des intermédiaires élastiques comme des courroies, ou par des moteurs indépendants; $e_1 = E \sin \omega t$, $e_2 = E \sin (\omega t - \varepsilon)$ les forces électromotrices qu'ils développent à l'instant t, ε/ω étant le retard en temps du second alternateur sur le premier; r la résistance totale du circuit et φ le déphasage en *arrière* du courant.

La force électromotrice totale sera, à l'instant t :

$$e_1 + e_2 = 2E \sin \left(\omega t - \frac{\varepsilon}{2}\right) \cos \frac{\varepsilon}{2}$$

et le courant

$$i = \frac{2E \cos \frac{\varepsilon}{2} \cos \varphi}{r} \sin \left(\omega t - \frac{\varepsilon}{2} - \varphi\right),$$

ce qui donne pour la valeur efficace

$$i_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{2}E \cos \frac{\varepsilon}{2} \cos \varphi}{r}.$$

Nous allons calculer quelle est la puissance développée par nos deux appareils. Le déphasage du courant

$$I \sin \left(\omega t - \frac{\varepsilon}{2} - \omega\right)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur la force électromotrice E sin ωt du premier est

$$\omega t - \left(\omega t - \frac{\varepsilon}{2} - \varphi\right) = \frac{\varepsilon}{2} + \varphi.$$

La puissance produite par le premier alternateur ressort donc à

$$P_1 = e_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \cos\left(\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right) = K \cos\frac{\varepsilon}{2} \cos\left(\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right).$$

Le déphasage du courant sur la force électromotrice développée par le second alternateur sera de même :

$$\omega t - \varepsilon - \left(\omega t - \frac{\varepsilon}{2} - \varphi\right) = -\frac{\varepsilon}{2} + \varphi,$$

ce qui donne pour la puissance

$$P_2 = e_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \cos\left(-\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right) = K \cos\frac{\varepsilon}{2} \cos\left(-\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right);$$

de sorte que

$$P_2 - P_1 = K \cos\frac{\varepsilon}{2}\left[\cos\left(-\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right) - \cos\left(\frac{\varepsilon}{2} + \varphi\right)\right] = K \sin\varepsilon \sin\varphi,$$

quantité positive pour toutes les valeurs de $\varepsilon < \pi$, φ étant positif par hypothèse.

Nous voyons que dès qu'un alternateur retarde, la conséquence de ce retard est de lui faire développer plus d'énergie électrique. Il absorbe par conséquent plus d'énergie mécanique et retardera davantage, en glissant sur sa courroie. Cette tendance persistera jusqu'à ce que $\varepsilon = \pi$, puisqu'alors les alternateurs produiront la même énergie, d'ailleurs nulle, le courant lui-même étant nul. Dès que $\varepsilon > \pi$, l'excès devient négatif ; le second alternateur développe moins d'énergie électrique que l'autre ; il absorbe conséquemment moins d'énergie mécanique et revient au synchronisme. La stabilité serait assurée, mais la puissance est nulle.

Influence d'un déphasage en avant. — Il est à remarquer qu'avec le courant déphasé en avant, c'est-à-dire φ négatif, la marche en série ne présenterait aucune difficulté, puisque l'excès $P_2 - P_1$ devenant négatif, l'alternateur en arrière rattraperait son retard. Mais ce cas ne se rencontre pour ainsi dire jamais en pratique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Etude graphique. — La représentation vectorielle nous permet de nous rendre immédiatement compte de ces conditions de fonctionnement. Quand les alternateurs sont en phase, les vecteurs de leurs forces électromotrices coïncident; la force électromotrice résultante est $OS = 2OE_1 = 2OE_2$ (fig. 175) et chaque alternateur doit vaincre la puissance électrique résistante que représente le produit du vecteur de sa force électromotrice par la projection sur celui-ci du vecteur de l'intensité; ces puissances sont égales.

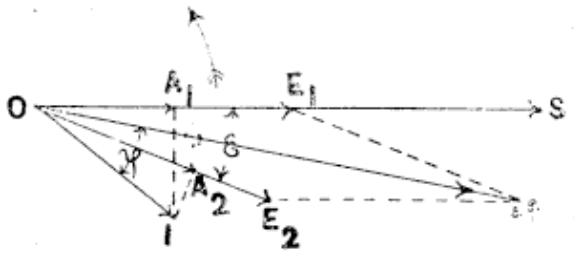


Fig. 175.

Si le deuxième alternateur vient à retarder d'ε, la projection du courant sur la direction de sa force électromotrice devient plus grande et la puissance résistante augmente aussi. Il retardera donc davantage. Le courant restant par hypothèse déphasé de φ sur la résultante des deux forces électromotrices du circuit, le vecteur OI, dont la grandeur diminue, recule progressivement et la marche ne devient stable que quand les deux alternateurs sont en opposition, mais alors leur puissance est nulle.

Couplage en parallèle. — Au contraire, *la marche en parallèle d'alternateurs identiques, tournant à la même vitesse et dont les forces électromotrices sont concordantes, est stable.*

Considérons d'abord deux alternateurs marchant à circuit extérieur ouvert (fig. 176). Admettons qu'ils sont identiques, tournent à vitesse angulaire égale et ont la même excitation, de manière que leurs forces électromotrices soient égales. En outre, supposons-les en concordance de phase. Si nous suivons le circuit fermé qu'ils forment, nous trouvons que les forces électromotrices qu'ils développent sont à chaque instant égales et opposées. Les vec-

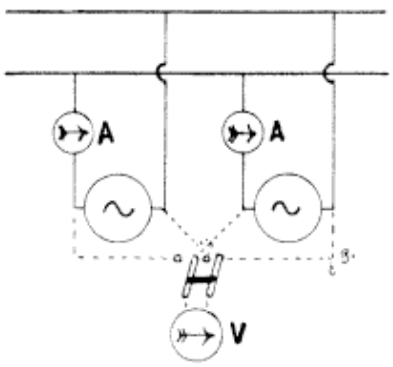


Fig. 176.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teurs O E_1, O E_2, (fig. 177) de leurs forces électromotrices efficaces seront donc égaux et opposés, et aucun courant ne traverse le circuit. Si le second alternateur vient à retarder, son vecteur O E_2 recule par rapport au sens admis comme positif et dès lors, il existe dans le circuit une force électromotrice résultante O E qui va donner naissance à un courant. Le circuit, qui ne comprend que les induits des alternateurs, présente une faible résistance $2r$ et un grand coefficient de selfinduction $2\mathcal{L}$. Le courant y sera déphasé de près de $\pi/2$ sur la force électromotrice et son vecteur pourra être représenté par OI. Projetons-le sur la direction des forces électromotrices O E_1 et OE_2'. La projection sur O E_1 étant de même sens que ce vecteur, nous avons affaire à une puissance positive. En d'autres termes, le premier alternateur fonctionne comme générateur de courant. Au contraire, la projection sur la direction OE_2' se trouvant dans le prolongement du vecteur O E_2', la puissance est négative et le second alternateur fonctionne comme moteur. La seconde machine devenant motrice est sollicitée à avancer ; le synchronisme tend à se rétablir sous l'effet des courants dits *synchronisants*, qui s'échangent entre les deux induits, et la marche est stable.

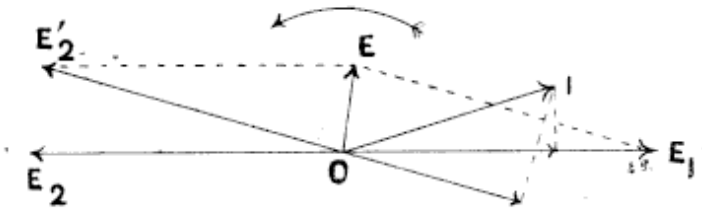


Fig. 177.

Fermons maintenant le circuit extérieur sur une résistance. Par rapport au courant débité dans ce circuit, les forces électromotrices des alternateurs sont plus ou moins concordantes. La différence de potentiel e aux bornes du tableau est commune. Représentons-la par O B (fig. 178). Rappelons que c'est la résultante de la force électromotrice effective R i_{eff} agissant dans le circuit extérieur et de la force électromotrice de selfinduction du même circuit $\omega l\, i_{eff}$. Soient O D_1 et O D_2 les vecteurs des forces électromotrices totales des alternateurs. Nous savons que les vecteurs B D_1 et B D_2 représenteront les forces électromotrices de selfinduction respectives des deux alternateurs ou

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

leurs chutes de tension, les résistances des induits étant supposées négligeables. Leurs valeurs étant $\omega \mathfrak{L} i_{1\,eff}$ et $\omega \mathfrak{L} i_{2\,eff}$, ils pourront, à la constante $\omega \mathfrak{L}$ près, représenter la grandeur des courants débités par les induits. Les directions de ces courants leur seront d'ailleurs perpendiculaires et en retard sur les forces électromotrices correspondantes. Composons B D_1 et B D_2. La diagonale B D $= \omega \mathfrak{L} i_{eff}$ représentera la force électromotrice de selfinduction d'un alternateur pouvant remplacer les deux autres et débitant le courant résultant des deux courants d'induits, c'est-à-dire le courant extérieur.

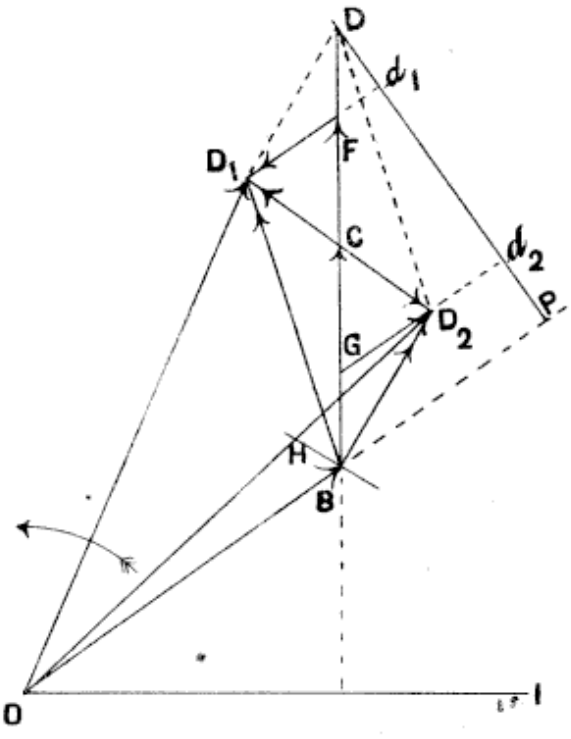


FIG. 178.

Il est facile de démontrer que la puissance utile développée par chaque alternateur est proportionnelle à la longueur de la perpendiculaire abaissée de l'extrémité du vecteur de sa force électromotrice sur le vecteur O B. En effet, élevons en B une perpendiculaire B H sur B D_2, qui se trouvera dans le prolongement de la direction du courant débité par le second alternateur. Abaissons d'autre part la perpendiculaire D P sur O B et projetons sur elle les points D_1 et D_2.

La puissance du second alternateur

$$P_2 = O\,D_2 \times \frac{B\,D_2}{\omega \mathfrak{L}} \times \cos B\,H\,D_2 = E_2 \times \frac{B\,D_2}{\omega} \times \sin B\,D_2O.$$

Mais dans le triangle O B D_2

$$\frac{B\,D_2}{\sin B\,O\,D_2} = \frac{O\,B}{\sin B\,D_2\,O} \quad \text{ou} \quad B\,D_2 \sin B\,D_2O = O\,B \sin B\,O\,D_2;$$

remplaçant il vient :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$P_2 = \frac{OB}{\omega \mathfrak{L}} \times E_2 \sin BOD_2 = \frac{e \times Pd_2}{\omega \mathfrak{L}}.$$

La puissance du second alternateur est donc proportionnelle à Pd_2. De même la puissance du premier est proportionnelle à Pd_1 *et la somme de leurs puissances à DP*, puisque $Pd_2 = Dd_1$ par contruction.

Tirons D_1D_2, prolongeons jusqu'en G la perpendiculaire d_2D_2. Les droites BD_1 et BD_2 peuvent, avons-nous vu, représenter à une certaine échelle les courants débités par les alternateurs. Leur résultante, ou BD, représente à la même échelle l'intensité du courant dans le circuit extérieur. Or, les directions vraies des vecteurs des courants étant à angles droits avec celles que les vecteurs BD_1, BD_2 occupent, la direction vraie de leur résultante est aussi à angle droit avec la diagonale BD. Abaissons donc de O une perpendiculaire sur BD, ce sera la direction du vecteur du courant extérieur. Nous pouvons toutefois, pour ne pas compliquer le dessin, garder les directions figurées. En admettant que BD soit la direction vraie du courant dans le circuit extérieur, nos conclusions ne seront pas altérées, tous les vecteurs des courants ayant simplement tourné de 90°.

Cela posé, nous voyons d'abord que *l'alternateur en avance débite un plus fort courant* BD_1 *que celui* BD_2 *émis par l'alternateur en retard*. C'est là la condition de stabilité, car chaque variation de vitesse relative sera corrigée immédiatement et automatiquement par une variation de puissance tendant à ramener le synchronisme.

Lecourant BD_1, développé par le premier alternateur, se compose de deux parties : l'une BC, en phase avec le courant extérieur; l'autre CD_1, qui est le courant synchronisant échangé par les deux machines et envoyé par l'alternateur en avance dans celui en retard.

De même le courant BD_2, développé par le second alternateur, se compose du même courant BC, en phase avec le courant extérieur et du courant représenté par le vecteur CD_2, égal et opposé à CD_1 qui est le courant synchronisant absorbé par le second alternateur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le courant synchronisant peut lui-même se décomposer en CF, courant en phase avec le courant extérieur et FD_1, courant d'échange, sans énergie utilisable dans le circuit extérieur, puisque son vecteur est, dans sa direction vraie, perpendiculaire au vecteur OB de force électromotrice aux bornes. Ce courant, dont la puissance est représentée par le produit de OD_1 par la projection de D_1F sur OD_1, n'est pas utile et se transforme simplement en chaleur dans les induits des deux machines. Il faut donc chercher à le détruire et, pour cela, faire marcher les deux points D_1 et D_2 sur les droites normales à PD jusqu'à ce qu'ils se portent en F et G.

Le régime n'est toutefois pas encore satisfaisant. L'idéal est de faire fonctionner les deux alternateurs exactement dans les mêmes conditions. Leurs vecteurs coïncident alors en OC (fig. 179), ils fournissent la même force électromotrice et débitent le même courant. Voyons comment on peut obtenir tout ceci en pratique.

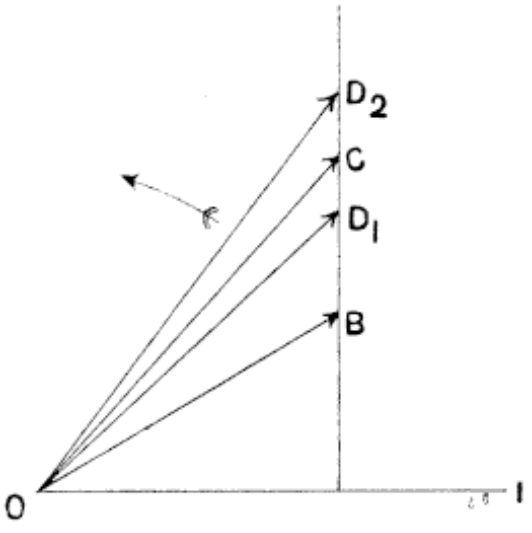


FIG. 179.

Pour reconnaître quel est de deux alternateurs en travail celui qui est en avance, il suffit de consulter leurs ampèremètres : *c'est celui dont le débit est le plus élevé.*

Il faut alors réduire le courant qui échauffe inutilement les induits et, pour cela, augmenter l'excitation de l'alternateur en avance et diminuer celle de l'alternateur en retard, de manière que la somme des indications des deux ampèremètres diminue (1). Quand la somme minimum est obtenue, on a atteint les points

(1) En effet, on tend vers le régime pour lequel les indications des ampèremètres sont BG (fig. 178) et BF dont la somme = BD diagonale qui, dans le triangle BD_2D est plus petite que la somme des deux autres côtés BD_2 et $DD_2 = BD_1$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

F et G. Il faut alors retarder l'alternateur en avance, sans changer sa vitesse de synchronisme, qui est invariable, en modifiant l'admission de son moteur et avancer celui en retard. En même temps on diminue l'excitation du premier et on renforce celle du second, jusqu'à ce que les deux ampèremètres indiquent le même courant et que la différence de potentiel aux bornes reste constante.

Adjonction d'un alternateur. — Pour mettre en circuit un alternateur nouveau, il faut que : 1° *l'alternateur donne une différence de potentiel égale à celle du tableau ;* 2° *que la fréquence soit la même que celle-ci ;* 3° *que les phases coïncident.*

On met l'alternateur en marche, puis on règle son excitation jusqu'à ce que la différence de potentiel ait la valeur indiquée au tableau. On couple au moment où le synchroniseur de phase (que nous étudierons ci-après) accuse la coïncidence. A ce moment le vecteur de la force électromotrice de l'alternateur coïncide avec OB (fig. 177). On augmente alors graduellement la puissance du moteur entraînant l'alternateur et l'excitation de celui-ci, de manière à faire monter le vecteur de force électromotrice jusqu'en OC.

Parfois un servo-moteur, commandé du tableau de distribution, permet de déplacer légèrement le contre-poids des régulateurs de façon à faire varier la vitesse momentanée de rotation et faciliter ainsi la mise en synchronisme des alternateurs.

Suppression d'un alternateur. — Pour supprimer un alternateur, on commencera par diminuer son excitation et en même temps la puissance de son moteur jusqu'à ce qu'il ne donne plus de courant. On pourra alors le retirer du circuit.

Cas de plus de deux alternateurs. — Les règles déterminées ci-dessus pour deux alternateurs peuvent se généraliser pour plusieurs. Les conditions de stabilité ne sont cependant pas les mêmes. En effet, si nous effectuons la même construction graphique, (fig. 178), dans le cas de n alternateurs, nous trouverons encore que la droite DP est proportionnelle à leur puissance totale, de sorte qu'ils développent chacun K DP/n, s'ils sont également chargés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si l'un des alternateurs retarde d'un angle α, sa puissance diminue de $K' DP/n$; tous les autres devront avancer et fournir un excédent de puissance de $\frac{K' DP}{n(n-1)}$. Au cas où le même alternateur retarde suffisamment pour devenir moteur, les autres se partagent la surcharge, qui sera d'autant plus faible que leur nombre est plus grand.

Si, au contraire, un des alternateurs avance, on ne peut admettre que tous les autres retardent et deviennent moteurs, ce qui surchargerait dangereusement le premier. Un excès de puissance des moteurs est donc plus à craindre que son défaut. On reconnaît qu'un alternateur accélère, par le ronflement spécial qu'il fait alors entendre.

Remarque I. — Lorsque le vecteur $O D_2$ figuratif de la force électromotrice d'un alternateur s'approche de O B, force électromotrice aux bornes du tableau, la puissance développée par l'alternateur décroît, pour devenir nulle quand il y a coïncidence des vecteurs de ces deux forces électromotrices. Si le vecteur $O D_2$ dépasse O B, l'alternateur absorbe du courant et devient moteur. La puissance sera encore figurée par la longueur de la perpendiculaire abaissée sur O B de l'extrémité du vecteur, mais celui-ci a passé de l'autre côté de P.

Remarque II. — On voit que la conduite rationnelle de la marche exige, outre l'emploi du rhéostat d'excitation, celui d'un régulateur mécanique permettant de faire varier, *pour un état de vitesse donné et constant*, la puissance individuelle de chaque machine. Cette nécessité ne paraît pas, jusqu'en ces dernières années tout au moins, avoir été prise en considération par les constructeurs, de sorte que la presque totalité des machines existantes ne comportent, comme organe pouvant permettre un réglage individuel, que la valve d'admission, sur laquelle on est dès lors forcé d'opérer pour graduer convenablement les pressions dans les cylindres de l'un ou de l'autre moteur. (1)

(1) Chevrier. *La Pratique industrielle des courants alternatifs*, p. 133. Paris, Carré Naud, 1900.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'autre part, l'étude des conditions du maintien rigoureux de l'isochronisme des alternateurs couplés, conduit à cette conclusion paradoxale : c'est que *les régulateurs de vitesse des machines motrices ne doivent pas être trop sensibles.* Certains auteurs ont même été jusqu'à dire qu'ils devaient être supprimés sauf un seul. On conçoit, en effet, que si, lorsqu'une avance d'un des alternateurs se manifeste, la machine motrice a un régulateur assez sensible pour fournir immédiatement le supplément de puissance exigé par cette avance, le mécanisme purement électrique du maintien de l'isochronisme ne pourra se produire et l'écart angulaire de l'alternateur ira en s'exagérant de plus en plus.

Indicateur de phase. — Couplage a l'extinction. — L'appareil est constitué par deux lampes calibrées au voltage des canalisations, montées en tension entre les côtés semblables des machines à coupler. En fermant le circuit C D, (fig. 180) au moyen de l'interrupteur F, si les phases des deux machines coïncident, les potentiels en A et B étant à chaque instant égaux, les lampes resteront éteintes. C'est au moment de l'extinction que l'on fermera le circuit de la machine à coupler, sur le tableau. On peut remplacer les lampes par un voltmètre.

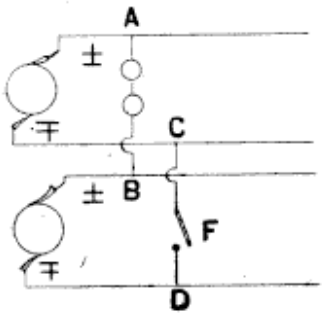
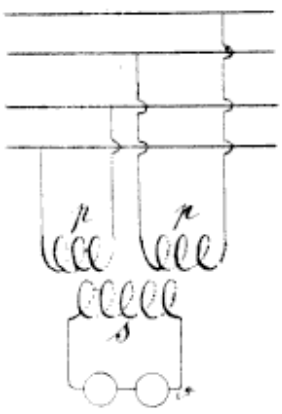


Fig. 180.

Couplage a l'allumage. — Si l'on réunit A non pas au point B du circuit à coupler, mais à la borne opposée D, on obtient l'inverse : les lampes brillent le plus vivement quand les machines sont en phase.


Fig. 181.

La seconde méthode est préférable à la première, parce qu'*une certaine variation de voltage est bien plus aisément accusée par l'éclat des lampes que par leur extinction.*

Cas du haut voltage. — Dans le cas où

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'on a affaire à de hauts voltages, la dérivation établie par les lampes pourrait présenter un certain danger. On les monte alors dans le secondaire d'un transformateur (1) possédant deux primaires respectivement raccordés à chacun des alternateurs (fig. 181).

Synchroniseur. — Indépendamment de l'indicateur, on utilise parfois un synchroniseur constitué d'un transformateur T (fig. 182), dont les deux primaires p sont dérivés sur les circuits à réunir. Les secondaires s, montés en opposition, peuvent être mis en rapport, par l'intermédiaire d'un interrupteur C, avec un rhéostat variable R et un ampèremètre A. Au moment où les lampes brillent de leur éclat le plus vif, on ferme C. Si la coïncidence est parfaite, des forces électromotrices égales et contraires sont créées dans le circuit secondaire et l'ampèremètre reste au zéro.

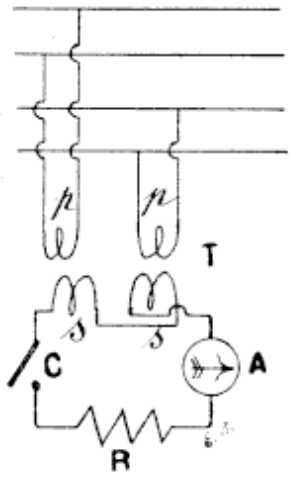


FIG. 182.

En cas de discordance, l'annulation n'a pas lieu et le courant, transporté d'un circuit sur l'autre par le transformateur (2), agit comme courant synchronisant pour mettre les machines en parfaite coïncidence. Dès que l'ampèremètre est arrivé au zéro, le synchronisme est obtenu.

---

(1) Rappelons qu'en principe un tranformateur (T. I, p. 217) comporte deux bobines enroulées sur un noyau magnétique : le circuit primaire et le circuit secondaire. n_1 et n_2 étant leurs nombres de spires respectifs et e_1 la force électromotrice efficace appliquée au primaire, on trouvera aux bornes du secondaire une force électromotrice $e_2 = e_1\, n_2/n_1$.

(2) En outre, l'énergie dépensée dans le primaire se retrouve presqu'intégralement dans le secondaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 3. — Essai et rendement des alternateurs monophasés (1).

Il y a deux catégories d'essais : 1° Essais de rendement; 2° essais de régulation.

1° **Essais de rendement.** — Mesure directe. — Pour les alternateurs de faible puissance, on peut faire la mesure directe du rendement, comme d'ailleurs pour les dynamos à courant continu, en entraînant l'alternateur par un moteur taré et mesurant au wattmètre la puissance recueillie.

Méthode des pertes séparées. — Pour les grands alternateurs on ne peut, en général, disposer d'un moteur taré. On peut alors utiliser la méthode par pertes séparées, qui s'applique à tous les cas. Les pertes comprennent : celles par hystérèse, par courants de Foucault et par frottements, celles par effet Joule dans l'inducteur, enfin celles par effet Joule dans l'induit.

On détermine les pertes par hystérèse, courants de Foucault et frottements, en entraînant l'alternateur par un moteur taré de faible puissance. Si l'excitatrice est calée directement sur l'arbre de l'alternateur, on peut l'utiliser comme moteur. Une première mesure faite sans excitation donne les pertes mécaniques: frottements, ventilation. Une seconde mesure, avec l'excitation et la vitesse normales, donne le total des pertes dont nous nous occupons; la différence fournit les pertes par hystérèse et courants de Foucault. On entendra par excitation normale celle pour laquelle l'alternateur, tournant à circuit ouvert, fournit à ses bornes la différence de potentiel de régime, augmentée vectoriellement de la chute ohmique dans l'induit et de la force électromotrice de selfinduction.

Les pertes par effet Joule, dans l'inducteur et dans l'induit, se déterminent en mesurant leur résistance à chaud et leur affectant les courants correspondants.

---

(1) P. Bourguignon. *Essais des machines à courant continu et alternatif.* Ch. Béranger, Paris et Liége.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La méthode des pertes séparées donne, pour les pertes totales, des valeurs inférieures à celles que l'on trouve par les mesures directes, de sorte que les rendements obtenus sont trop élevés. Les pertes supplémentaires, dues à la charge, peuvent s'évaluer comme suit : on entraîne l'alternateur par un moteur auxiliaire taré, en l'excitant de manière à lui faire débiter le courant de pleine charge en court-circuit. Soit p la puissance fournie par le moteur auxiliaire. On calcule $r_a i^2_{eff}$ et p_f puissance perdue par frottements. La différence $p - r_a I^2 - p_f$ représente *approximativement* les pertes dues à la charge.

2° **Essais de régulation.** — Le coefficient de régulation d'un alternateur est le rapport, dépendant du cos φ du courant débité :

$$\frac{\text{chute de voltage}}{\text{tension en charge}} = \frac{\text{tension à vide} - \text{tension en charge}}{\text{tension en charge}}.$$

On peut opérer soit par des essais directs, soit par des procédés indirects.

Procédés directs. — On trace d'abord la caractéristique à vide de l'alternateur, tant montante que descendante (fig. 183). On représente la droite correspondant au nombre d'ampères-tours inducteurs. Pour déterminer celui-ci, on dispose provisoirement autour de l'inducteur un enroulement auxiliaire de N spires, que l'on fait traverser par un courant I fournissant la même différence de potentiel aux bornes que l'enroulement réel comportant x spires traversées par i_e. D'où $x i_e = NI$ et x est ainsi connu.

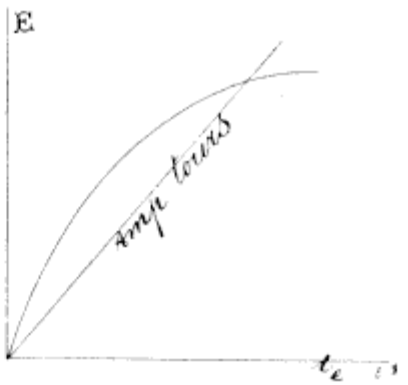


FIG. 183.

COURBES DE RÉGULATION. — On trace alors les trois caractéristiques suivantes : 1° *La courbe (fig. 184) représentant la valeur du courant d'excitation i_e en fonction du courant total i_{eff} pour cos φ = constante;* 2° *la courbe donnant la variation du courant*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'excitation avec le facteur de puissance cos φ pour $i_{eff} = c^{te}$ (fig. 185). On met la machine en charge sur un ensemble de résistances non-inductives L (fig. 187) et de bobines de selfinduction S placées en dérivation sur les premières.

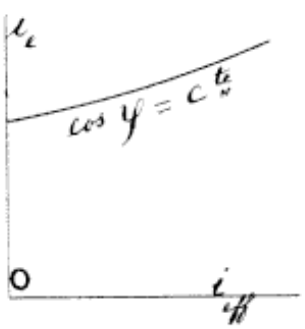


Fig. 184.

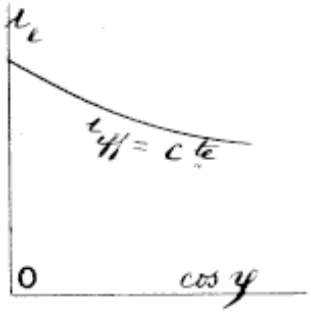


Fig. 185.

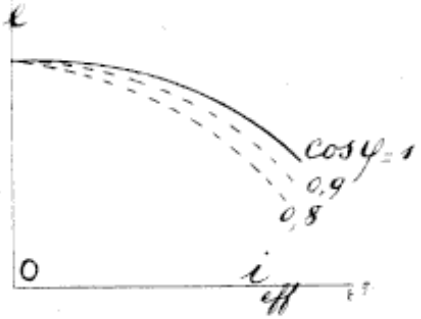


Fig. 186.

Les résistances non-inductives comportent des lampes à incandescence pour les faibles débits et des bandes en fer immergées dans l'eau pour les grands débits.

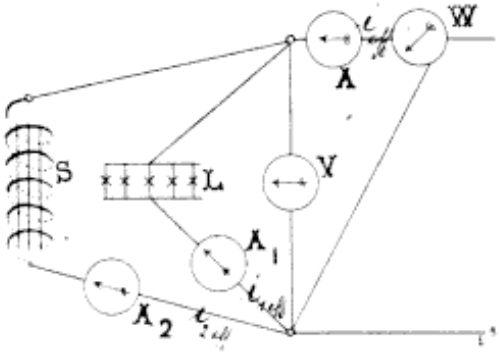


Fig. 187.

Comme résistances inductives, on peut prendre des bobines de selfinduction à noyau de fer mobile et de résistances très faibles. Dans ces conditions, le courant y est pratiquement déphasé de $\pi/2$.

On fait varier le déphasage en enfonçant plus ou moins le fer dans la ou les bobines de self et on retranche des lampes pour maintenir i_{eff} constant. On déterminera $\cos\varphi$ en faisant des relevés simultanés au wattmètre W, à l'ampèremètre A et au voltmètre V.

$$\cos\varphi = W/e_{eff}\, i_{eff}.$$

On peut aussi, plus simplement, se basant sur le fait que le courant total est la résultante des courants wattés et dewattés (fig. 188), déterminer $\cos\varphi$ par le rapport des indications des ampèremètres A_1 et A, puisque

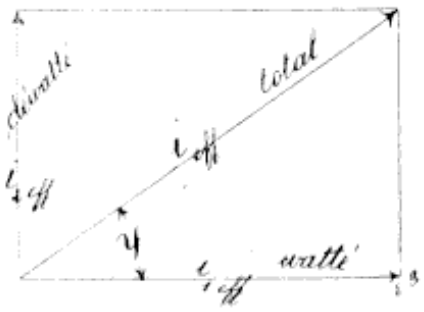


Fig. 188.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$\cos\varphi = \frac{\text{courant watté}}{\text{courant total}} = \frac{i_{1\,eff}}{i_{eff}}.$$

3° *La courbe donnant la relation entre la différence de potentiel e_{eff} aux bornes et le courant total débité i_{eff} pour* $\cos\varphi = c^{te}$.

L'obtention de la caractéristique avec cos φ = constante (fig. 186) exige un assez grand nombre de mesures avant d'arriver au cos φ voulu. Pour simplifier, on place un ampèremètre dans le circuit des résistances non inductives et l'on applique la formule précédente.

Quand les déphasages sont faibles, la valeur de cos φ est mal déterminée. Il est préférable alors de recourir à sin φ en utilisant les indications données par l'ampèremètre A_2 (fig. 187). On a, en effet, $\sin\varphi = i_{2\,eff}/i_{eff}$.

Procédés indirects. — La méthode de Behn-Eschenburg nous a donné un exemple d'un procédé de l'espèce.

Rendements. — Le tableau suivant (1) donne les renseignements les plus intéressants relatifs à des alternateurs de diverses puissances :

Puissance en kilovoltampères	Tours par minute	Tension en volts	Rendement avec cos φ = 1, y compris l'énergie dépensée dans l'enroulement d'excitation	Poids de l'alternateur avec poulie	
				$f = 25$	$f = 50$
40 40	750	500 3 000	0,89	1 800	1 300
100	750	500 3 000	0,91	3 300	2 900
150	500	500 3 000	0,915	5 400	4 800
250	375	500 3 000	0,9125 (2)	11 500	10 500
375	300	500 3 000	0,9175	17 000	15 500

(1) Extrait des catalogues des Ateliers de Constructions électriques de Charleroi.

(2) Rendement moindre que la machine précédente, parce qu'elle comporte 3 paliers au lieu de 2.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 4. — Les courants polyphasés.

Lorsqu'un barreau 1 (fig. 189), de longueur l, tourne autour d'un axe O situé à une distance b, dans un champ magnétique uniforme de $\mathcal{H}$ unités C.G.S. dont la direction lui est perpendiculaire, avec une vitesse angulaire constante de ω radians par seconde, il est le siège, d'une force électromotrice égale à chaque instant au nombre de lignes de force coupées par seconde, en vertu de la règle de Faraday. Comptons les temps, à partir du moment où le barreau a passé en a, sur la verticale de l'axe et décomposons l'intensité du champ, au point où se trouve le barreau, en deux composantes rectangulaires dirigées l'une $\mathcal{H}' = \mathcal{H} \sin \omega t$ suivant le rayon, l'autre $\mathcal{H}'' = \mathcal{H} \cos \omega t$ perpendiculairement à celui-ci. Cette dernière étant constamment tangente à la trajectoire décrite par le barreau, n'aura aucune de ses lignes de force coupée par celui-ci; celles de l'autre, au contraire, seront intégralement coupées par le barreau, de sorte que la force électromotrice développée à l'instant t et dirigée de l'avant vers l'arrière possède la valeur

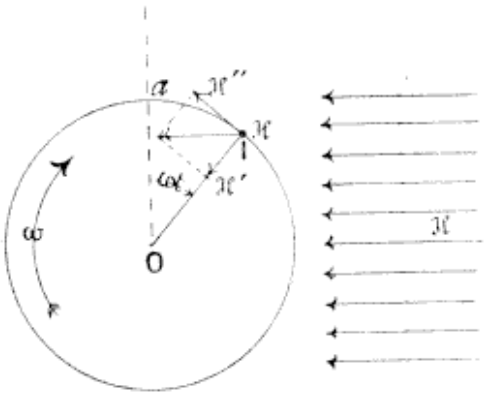


Fig. 189.

$$e_1 = \omega b l \mathcal{H} \sin \omega t.$$

Si nous avons n barreaux régulièrement distribués sur la circonférence décrite, et situés par conséquent à la distance angulaire $2\pi/n$ l'un de l'autre, lorsque le barreau 1 occupe la position représentée à ωt radians de l'axe Oa, les autres barreaux se trouvent aux distances angulaires respectives du premier

$$\omega t - \frac{2\pi}{n}, \quad \omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{n}, \quad \ldots$$

En vertu de la formule écrite ci-dessus, il s'y développera au même moment t les forces électromotrices

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$e_2 = \omega bl\mathcal{H} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right)$$

$$e_3 = \omega bl\mathcal{H} \sin\left(\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{n}\right)$$

. . . . . .

$$e_p = \omega bl\mathcal{H} \sin\left[\omega t - (p-1)\frac{2\pi}{n}\right]$$

. . . . . .

$$e_n = \omega bl\mathcal{H} \sin\left[\omega t - (n-1)\frac{2\pi}{n}\right]$$

de fréquence $\omega/2\pi$, déphasées l'une par rapport à l'autre de l'angle $2\pi/n$.

L'ensemble de ces forces électromotrices constitue ce que l'on appelle un système polyphasé complet de forces électromotrices alternatives.

Remarquons que l'oscillation de ces diverses forces électromotrices commence au moment où les barreaux traversent la verticale Oa, leurs passages successifs par zéro se faisant au bout de temps $2\pi/n\omega$ seconde.

En numérotant nos barreaux 1, 2, 3, ... n, les forces électromotrices développées passeront donc par zéro dans les barreaux 1, 2, 3, ... n au bout des temps 0, $2\pi/n\omega$, $2.2\pi/n\omega$, ...

En réunissant séparément les barreaux à des circuits semblables, ceux-ci deviendront le siège de courants alternatifs de même amplitude, tous déphasés d'un même angle φ par rapport à leurs forces électromotrices, donc déphasés entre eux de la même quantité $2\pi/n$. *Ils formeront aussi un système polyphasé complet de courants alternatifs.*

Propriété fondamentale des systèmes polyphasés. — *La somme des n quantités constituant un système polyphasé complet est nulle à chaque instant.*

Soit, en effet, le système :

$$k \sin \omega t,\ k \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{n}\right),\ \ldots,\ k \sin\left(\omega t + p\,\frac{2\pi}{n}\right)$$

$$\ldots\ k \sin\left[\omega t + (n-1)\frac{2\pi}{n}\right].$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On aura :

$$k \sum_{p=0}^{p=n-1} \sin\left(\omega t + p \cdot \frac{2\pi}{n}\right) = k \cdot 0 = 0.$$

Considérons un polygone plan régulier, étoilé ou non, ABC... de n côtés et deux axes rectangulaires situés dans son plan. Si α (fig. 190) désigne l'angle que fait un des côtés du polygone choisi arbitrairement, avec le premier axe, le côté suivant fera avec ce même axe l'angle α plus l'angle β du polygone, au sommet B formé par ces deux côtés et indiqué par une flèche courbe; pour le côté suivant, on aura (en C) α plus deux fois l'angle β et ainsi de suite. En décrivant successivement ces angles β qui s'additionnent, on vérifiera aisément que, lorsqu'on est revenu au côté de départ AB, on a décrit autant de fois 2π que l'on aura fait de tours complets autour du polygone, soit $q \cdot 2\pi$ si q est ce nombre de tours. Puisqu'il y a n angles égaux à β, chacun d'eux vaut $q \cdot 2\pi/n$, et les angles faits par les côtés successifs avec l'axe considéré seront

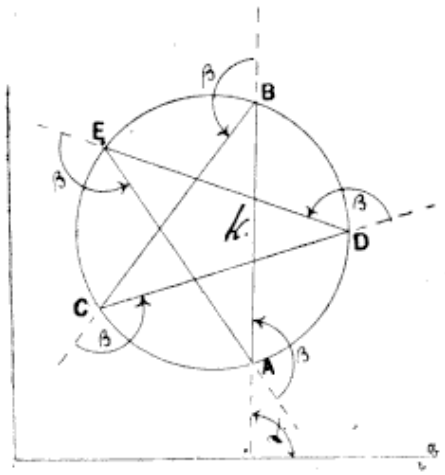


FIG. 190.

$$\alpha,\ \alpha + q \cdot \frac{2\pi}{n},\ \alpha + 2 \cdot q\,\frac{2\pi}{n},\ \ldots\ \alpha + p \cdot q\,\frac{2\pi}{n},\ \ldots\ \alpha + (n-1)\,q\,\frac{2\pi}{n},$$

Le polygone étant fermé par hypothèse, la somme des projections de ses côtés de longueur k, sur chacun des deux axes, est nulle.

On a donc

$$k \sum_{p=0}^{p=n-1} \sin\left(\alpha + pq\,\frac{2\pi}{n}\right) = 0 \text{ et } k \sum_{p=0}^{p=n-1} \cos\left(\alpha + pq\,\frac{2\pi}{n}\right) = 0. \quad (1)$$

Mettons q en évidence :

$$k \sum_{p=0}^{p=n-1} \sin q\left(\alpha' + p\,\frac{2\pi}{n}\right) = 0 \text{ et } k \sum_{p=0}^{p=n-1} \cos q\left(\alpha' + p\,\frac{2\pi}{n}\right) = 0. \quad (2)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces relations sont vraies quelle que soit la valeur entière assignée à q. On a donc, pour $q = 1, 2, \ldots$

$$k \sum_{p=0}^{p=n-1} \sin\left(\alpha + p\,\frac{2\pi}{n}\right) = 0 \quad \text{et} \quad k \sum_{p=0}^{p=n-1} \cos\left(\alpha + p\,\frac{2\pi}{n}\right) = 0 \qquad (3)$$

$$k \sum_{p=0}^{p=n-1} \sin 2\left(\alpha + p\,\frac{2\pi}{n}\right) = 0 \text{ et } k \sum_{p=0}^{p=n-1} \cos 2\left(\alpha + p\,\frac{2\pi}{n}\right) = 0 \qquad (4)$$

. . . . . .

Les équations (3) sont précisément celles qu'il fallait démontrer.

Ainsi, si l'on fait aboutir en un même point, n courants polyphasés, la somme de ces courants étant nulle à tout instant, il n'est pas nécessaire de leur ménager un exutoire à partir de ce point.

Divers modes de montage. — MONTAGE EN ÉTOILE. — Appelons entrée et sortie des barreaux ou bobines, les extrémités situées d'un même côté de l'induit. Au lieu de réunir chacune d'elles à des circuits distincts, ce qui exige $2n$ fils de connexion ou de ligne, on peut raccorder ensemble toutes les entrées des barreaux (fig. 191). Les sorties seront mises en rapport avec les circuits

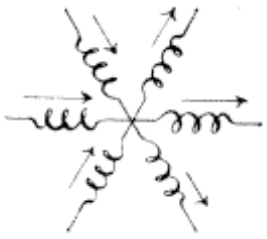


FIG. 191.

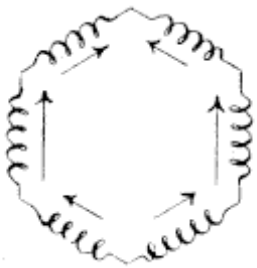


FIG. 192.

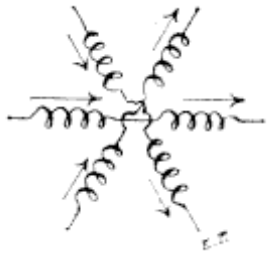


FIG. 193.

d'utilisation au moyen de n fils de ligne seulement. *C'est le montage en étoile.* (Les flèches indiquent la direction des courants instantanés à l'instant t.)

MONTAGE EN POLYGONE. — Puisque la somme des forces électromotrices développées à chaque instant est nulle, on peut raccorder la sortie d'un barreau à l'entrée du suivant et ainsi de suite (fig. 192), sans qu'il y ait production d'aucune force électromotrice résultante dans la chaîne ainsi formée. *C'est le mon-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tage en polygone. Les circuits d'utilisation sont dérivés, par n fils de ligne, sur les sommets du polygone, entre lesquels règne la différence de potentiel engendrée dans les bobines qui y aboutissent.

On remarquera que rien n'empêche de raccorder à des générateurs montés en étoile, des récepteurs montés en polygone ou vice versa. La seule condition à remplir est d'avoir une symétrie complète de part et d'autre.

Système semi-polyphasé. — Lorsque deux barreaux ou bobines sont décalés de π radians, les forces électromotrices qui s'y trouvent développées $e = E \sin \omega t$ et $e' = E \sin (\omega t \pm \pi) = -E \sin \omega t = -e$, sont à chaque instant égales et opposées dans l'espace. On pourra donc réunir en série ces deux bobines, en raccordant ensemble leurs entrées ou sorties (fig. 193), et disposer ainsi d'une force électromotrice double. Si toutes les bobines ont leur correspondante diamétralement opposée, en d'autres termes, si n est pair, on obtiendra de cette manière $n/2$ sections distinctes, régulièrement distribuées sur la circonférence et à la distance angulaire $2\pi/n$. *On formera ainsi un système semi-polyphasé*, qui ne jouira plus de la propriété fondamentale de la nullité de la somme des quantités analogues à un instant quelconque. Il ne sera conséquemment plus possible d'adopter le montage en étoile, puisque les courants dans les divers circuits n'ont plus une somme nulle, ni le montage en polygone, puisque les $n/2$ forces électromotrices n'ont pas une résultante nulle. Toutefois, pour réunir les extrémités des bobines aux appareils d'utilisation, il suffira de n fils de connexion, qui pourront même être réduits à $n/2 + 1$, en réunissant $n/2$ d'entre eux.

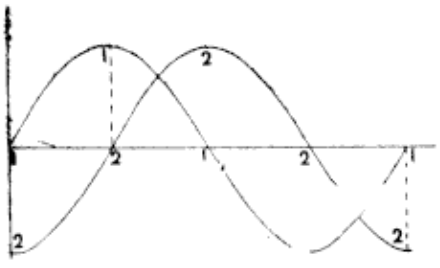


Fig. 194.

Courants polyphasés usuels : biphasé et triphasé. — Biphasé. — Dans le système biphasé nous trouvons deux courants de même amplitude déphasés d'un quart de période l'un par rapport à l'autre (fig. 194).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Triphasé. — Le système triphasé, de beaucoup le plus employé, comporte trois courants de même amplitude, successivement déphasés l'un par rapport à l'autre d'un tiers de période (fig. 195).

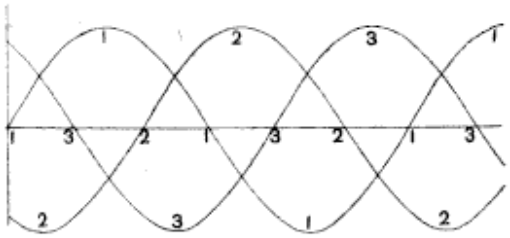


Fig. 195.

Représentations schématiques. — On convient de représenter les appareils montés en étoile par n bobines réunies à un bout et équidistantes. L'inspection du schéma, montre ainsi immédiatement, à quelle espèce de courant on a affaire. La figure 191 est le schéma d'un système étoilé hexaphasé.

Pour le montage en polygone, les bobines sont placées en série et affectent la forme d'un polygone régulier de n côtés. La figure 192 donne le schéma d'un système hexaphasé en polygone.

Nous avons indiqué, sur ces figures, la direction des courants *instantanés* développés.

Les systèmes polyphasés peuvent encore se représenter plus simplement par les *vecteurs de leurs forces électromotrices* ou de leurs *courants efficaces*.

Dans le cas de l'étoile, les vecteurs partant d'un même point

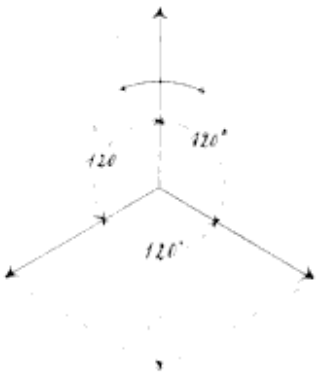


Fig. 196.

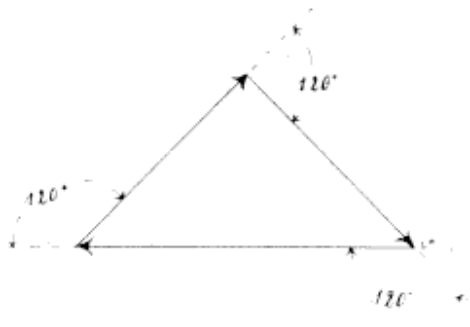


Fig. 197.

font entre eux les angles $2\pi/n$. La figure 196 se rapporte au système triphasé en étoile. Il est facile de voir que la résultante de deux quelconques de ces vecteurs est égale et opposée au troisième.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le cas du polygone, les vecteurs sont placés bout à bout et font encore entre eux l'angle $2\pi/n$. Leur résultante est d'ailleurs nulle. La figure 197 représente un système triphasé en polygone

Un bon exemple du montage en polygone nous est fourni par un anneau Gramme (fig. 198). Considérons une spire en particulier et supposons la fermée sur elle-même. Elle sera le siège d'une force électromotrice alternative pendant une révolution complète (machine bipolaire). La force électromotrice développée dans cette spire peut être représentée par un vecteur. Il en sera de même pour les autres spires. Les vecteurs représentatifs sont égaux et tous déphasés d'un angle égal à celui des plans moyens de deux spires consécutives. Ce sont toutes les forces électromotrices simultanément développées dans les diverses spires qui, en s'additionnant à chaque instant dans les deux moitiés de l'anneau, vont fournir la force électromotrice continue recueillie aux balais. En d'autres termes, toutes les forces électromotrices développées dans les diverses spires d'un demi-anneau compris entre les deux balais ont pour résultante la tension continue existant entre ceux-ci.

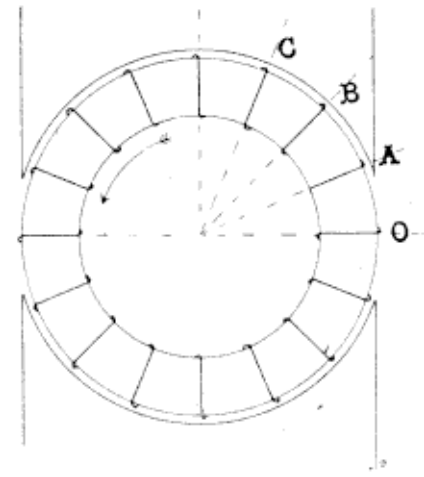


Fig. 198.

La force électromotrice de la spire située en O sur l'horizontale est au zéro. Elle sera représentée par un vecteur Z O (fig. 199) dont la grandeur correspond à l'amplitude de la force électromotrice engendrée dans la spire pendant une révolution ; celle de la suivante en A, en avant de l'angle $2\pi/n$, sera représentée par le vecteur égal OA, en avant du même angle sur Z O et ainsi

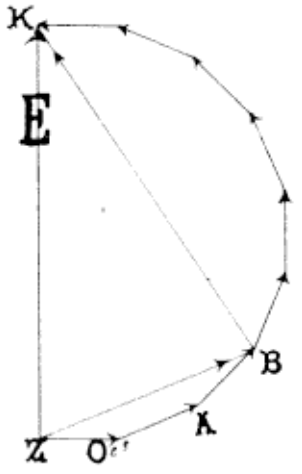


Fig. 199.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de suite. La résultante E correspondra, puisque tous les vecteurs sont égaux et font le même angle entre eux, au diamètre E d'une circonférence inscrivant le demi-polygone régulier de $n/2$ côtés ainsi formé, à condition que le nombre n soit suffisamment grand.

Toutes les spires étant reliées en série, la résultante des forces électromotrices développées dans un nombre quelconque de spires, composée avec la résultante des forces électromotrices développées dans le restant des spires du demi-anneau, donne la force électromotrice totale E continue de l'anneau. Par exemple toutes les forces électromotrices comprises de O en B ont comme résultante Z B ; toutes celles des spires restantes de B en K ont pour résultante B K. La résultante totale est Z K, diamètre du demi-cercle. Ou encore : la force électromotrice maximum engendrée dans l'enroulement compris de O à B est représentée par le vecteur Z B ; la force électromotrice maximum de B à K par B K ; leur résultante Z K = E.

Le champ magnétique tournant. — Les courants polyphasés permettent de développer aisément un champ magnétique tournant.

Pour simplifier, considérons d'abord des courants biphasés. Envoyons chacun de ces courants dans deux spires circulaires placées perpendiculairement l'une à l'autre autour d'un diamètre commun, et situées l'une dans un plan horizontal, l'autre dans un plan vertical.

Les champs magnétiques développés aux centres de ces spires sont proportionnels aux intensités des courants qui les traversent. Dans la spire horizontale, le champ vertical engendré est à chaque instant proportionnel aux ordonnées de la sinusoïde $i_1 = I \sin \omega t$ représentée par A B C D E (fig. 200); dans la spire verticale, le champ horizontal produit est à chaque instant proportionnel aux ordonnées de la sinusoïde $i_2 = I \sin (\omega t - \pi/2)$ représentée par F G H I J. Ces sinusoïdes étant orientées à angle droit, représenteront les deux champs magnétiques non seulement en grandeur, mais encore en direction et il suffira d'en composer les valeurs instantanées successives pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

obtenir le champ résultant. En A nous aurons un champ horizontal dirigé de droite à gauche, d'amplitude proportionnelle à l'amplitude I de nos courants biphasés. Après 1/8 de période, la spire horizontale fournira un champ proportionnel à

$$I \sin \frac{2\pi T}{T\,8} = I \sin \frac{\pi}{4} = \frac{I}{\sqrt{2}}$$

et la bobine verticale un champ proportionnel à

$$I \sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}\right) = - I \sin \frac{\pi}{4} = - \frac{I}{\sqrt{2}}.$$

Ces deux champs fourniront un champ résultant proportionnel à I, égal au précédent, mais à 45° de celui-ci, flèche 2 (fig. 201); 1/8 de période plus tard, c'est-à-dire au bout d'1/4 de période, le champ, de même intensité, sera devenu vertical, flèche 3; il aura donc parcouru un angle droit et ainsi de suite, faisant un tour par pulsation complète des courants.

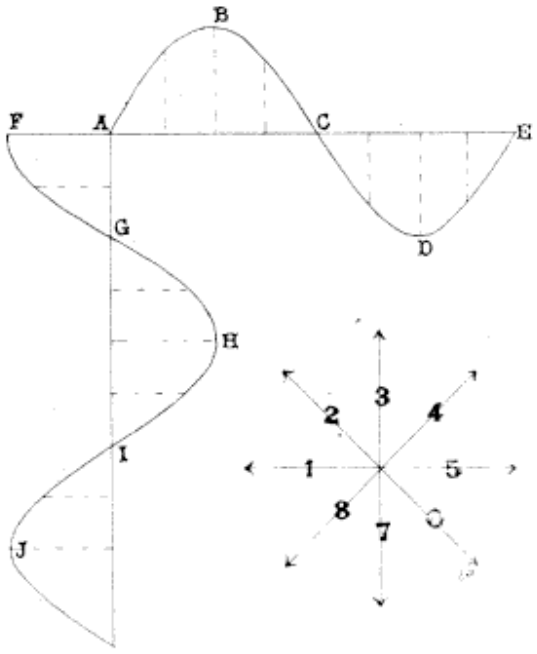


Fig. 200.

Fig. 201.

Généralisation. — Reprenons fig. 202, n barreaux tournant autour d'un axe O avec une vitesse angulaire uniforme ω et dans lesquels *nous envoyons*, cette fois, les courants polyphasés dont ils étaient le siège.

En supposant nul le déphasage de ces courants sur leurs forces électromotrices, ils commenceront leur oscillation quand les barreaux passent en *a* (fig. 202), c'est-à-dire, avec la numérotation indiquée, que le passage par zéro se fera successivement dans les barreaux $1, n, n-1, \ldots$, après des temps égaux à $2\pi/n\omega$ secondes. Le conducteur 1, situé à la distance angulaire ωt de O*a*, est traversé par un courant alternatif $i = I \sin \omega t$ dirigé de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'avant à l'arrière et créant autour de lui un champ magnétique dont l'intensité h en O, perpendiculaire au plan du barreau et de l'axe, a pour valeur $k\mathrm{I}\sin\omega t$, k étant une constante positive dépendant de la perméabilité et des dimensions du système considéré. Nous avons vu que, dans l'air, $k = 2/r$, r étant la distance du barreau au centre (T. I, p. 170).

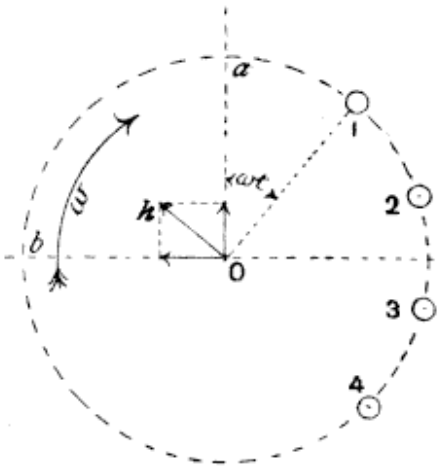


FIG. 202.

Projetée suivant Oa, cette intensité sera

$$k\mathrm{I}\sin^2\omega t = \frac{k\mathrm{I}}{2} - \frac{k\mathrm{I}}{2}\cos 2\omega t;$$

projetée suivant la perpendiculaire Ob à Oa, elle donne la composante

$$k\mathrm{I}\sin\omega t\cos\omega t = \frac{k\mathrm{I}}{2}\sin 2\omega t.$$

Chaque barreau fournit ainsi deux composantes. Par exemple, le $(p+1)^{\text{ième}}$ barreau, situé à la distance angulaire $p.\,2\pi/n$ du barreau 1, est parcouru par un courant alternatif dont l'intensité au moment considéré

$$i = \mathrm{I}\sin\left(\omega t + p\,.\,\frac{2\pi}{n}\right)$$

fournit deux composantes

$$\frac{k\mathrm{I}}{2} - \frac{k\mathrm{I}}{2}\cos 2\left(\omega t + p\,.\,\frac{2\pi}{n}\right) \quad \text{et} \quad \frac{k\mathrm{I}}{2}\sin 2\left(\omega t + p\,.\,\frac{2\pi}{n}\right).$$

En additionnant les composantes dirigées suivant l'axe Oa, nous trouvons

$$\frac{nk\mathrm{I}}{2} - \frac{k\mathrm{I}}{2}\sum_{p=0}^{p=n-1}\cos 2\left(\omega t + p\,.\,\frac{2\pi}{n}\right) = \frac{nk\mathrm{I}}{2}$$

et, suivant l'axe Ob,

$$\frac{k\mathrm{I}}{2}\sum_{p=0}^{p=n-1}\sin 2\left(\omega t + p\right) = 0.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'intensité au moment t est donc $nk\mathrm{I}/2$ et dirigée suivant Oa. Aux instants $t+\Delta t, t+2\Delta t, \ldots$ nous trouverions les mêmes résultats, de sorte que : l'intensité au milieu de l'axe est constante, égale à $nk\mathrm{I}/2$ et dirigée vers le point où les courants polyphasés commencent successivement leur oscillation. En résumé : *n barreaux siège de courants polyphasés de pulsation* ω, *tournant à la vitesse mécanique angulaire* ω, *donnent naissance à un champ magnétique fixe dans l'espace, dirigé vers le point où les courants polyphasés commencent leur oscillation.*

Si la vitesse de pulsation ω des courants varie et devient $\omega' > \omega$, la vitesse de rotation des barreaux doit aussi devenir ω'. Le déphasage des courants étant supposé nul, le champ, d'intensité constante si l'amplitude des courants n'a pas varié, *reste fixe dans l'espace* et dirigé suivant Oa.

En pratique, il existe toujours un certain déphasage φ, en général positif, de sorte que les courants commencent leur oscillation après que les barreaux ont passé dans la verticale et au bout d'un temps φ/ω secondes.

La valeur de φ, donnée par $\mathrm{tg}\,\varphi = \omega\mathfrak{L}/r$, dépend de la vitesse angulaire. Si celle-ci devient ω', l'intensité du champ $nk\mathrm{I}/2$ reste bien constante en grandeur, dans l'hypothèse où nous nous sommes placés, mais sa direction dans l'espace s'incline plus ou moins, de manière que φ prenne la valeur φ' satisfaisant à l'équation $\mathrm{tg}\,\varphi' = \omega'\mathfrak{L}/r$. Le champ reste ensuite immobile, tant que ω' ne varie plus, pour reprendre sa position primitive à φ radians de Oa, dès que la vitesse angulaire, tant des barreaux que des courants, redevient ω.

En nous plaçant sur les barreaux, le champ s'éloignera de nous avec la vitesse $-\omega$. Mais, dans ces conditions, c'est comme si nous avions rendu les barreaux fixes. Si donc nous immobilisons les barreaux, le champ développé, dont les relations électromagnétiques avec les barreaux n'ont pas varié, va garder vis-à-vis d'eux la même vitesse relative, c'est-à-dire qu'il se déplacera avec la vitesse $-\omega$. Nous en concluons que : *n conducteurs fixes uniformément distribués autour d'un axe et parcourus par un système de courants polyphasés d'intensité maximum* I, *de*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fréquence $\omega/2\pi$, donnent naissance à un champ magnétique d'intensité $nkI/2$, tournant dans l'espace avec une vitesse absolue ω et dans un sens tel, que la direction de ce champ passe par les divers barreaux au moment où le courant y commence son oscillation.

Changement du sens de rotation d'un champ tournant. — Il est évident que, si l'on renverse l'ordre de succession des phases des courants alimentant les barreaux fixes, c'est-à-dire que, si au lieu de se succéder dans les barreau 1, n, $n-1$, ..., cas de la figure 202, les passages par zéro s'effectuent dans les barreaux 1, 2, 3, ..., le champ tournant se déplacera en sens contraire. On atteindra ce but, en actionnant en sens inverse la génératrice débitant les courants; mais ce moyen est inapplicable en pratique.

Courants biphasés. — En nous reportant à la production du champ tournant au moyen de courants biphasés, il est facile de nous rendre compte que si l'un des deux courants est renversé, c'est-à-dire déphasé de π, sa composante change de sens et le champ tourne en sens inverse. Donc : *pour renverser la rotation d'un champ tournant dû à des courants biphasés, il suffit de renverser l'un des courants, c'est-à-dire de permuter l'entrée et la sortie de celui-ci.*

Courants triphasés. — *Avec des courants triphasés, il suffit de permuter deux des phases sans toucher à la troisième.*

En effet, faisons le tour de l'induit dans l'ordre des passages par zéro en supposant que ceux-ci aient lieu suivant les barreaux 1, 2, 3. Permutons l'arrivée des courants en 2 et 3 ; l'ordre de succession des passages par zéro sera dès lors 1, 3, 2. Les barreaux n'ayant pas changé de place, le champ tourne maintenant dans le sens 1, 3, 2 qui, relativement à la circonférence de l'induit, est de sens inverse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 5. — Les alternateurs polyphasés.

En pratique, on recourt toujours aux machines multipolaires, afin de ne pas devoir exagérer la vitesse angulaire. On monte en tension les sections ayant la même situation par rapport aux pôles de mêmes noms de l'inducteur, de manière que leurs forces électromotrices s'additionnent, en raccordant la sortie de l'une a l'entrée de la suivante et ainsi de suite. On peut aussi, comme nous l'avons déjà indiqué, monter en série les sections ayant la même situation par rapport aux pôles de noms contraires de l'inducteur, ce qui utilise mieux la surface induite, en raccordant la sortie de l'une à la sortie de la suivante, puis l'entrée de celle-ci à l'entrée de la troisième et ainsi de suite. Les alternateurs polyphasés diffèrent seulement de l'alternateur ordinaire en ce qu'au lieu d'un seul circuit induit, on en trouve plusieurs décalés l'un par rapport à l'autre d'une certaine quantité variant avec la nature des courants que l'on veut obtenir.

Constance du couple résistant. — Nous avons vu précédemment que le couple résistant d'un alternateur débitant un courant déphasé de φ sur sa force électromotrice est essentiellement variable et devient même moteur deux fois par période. Ici il n'en est plus de même. En effet, la première section développe le couple résistant

$$e_1 i_1 = \mathrm{E} \sin \omega t . \mathrm{I} \sin (\omega t - \varphi) = \mathrm{E\,I}/2 \, [\cos \varphi - \cos (2 \omega t - \varphi)]$$

la seconde le couple résistant

$$e_2 i_2 = \mathrm{E} \sin (\omega t + 2\pi/n) . \mathrm{I} \sin (\omega t + 2\pi/n - \varphi) = \mathrm{EI}/2 \, [\cos \varphi - \cos (2 \omega t + 2 . 2\pi/n - \varphi)]$$

la troisième le couple résistant

$$e_3 i_3 = \mathrm{E} \sin (\omega t + 2 . 2\pi/n) . \mathrm{I} \sin (\omega t + 2 . 2\pi/n - \varphi) = \mathrm{EI}/2 \, [\cos \varphi - \cos (2\omega t + 2 . 2 . 2\pi/n - \varphi)]$$

et ainsi de suite.

Au total

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$\frac{n\,E\,I}{2}\cos\varphi - \frac{E\,I}{2}\sum_{p=0}^{p=n-1}\left[\cos\left(2\omega t + p.\,2.\,\frac{2\pi}{n} - \varphi\right)\right] = \frac{n\,E\,I}{2}\cos\varphi,$$

puisque le second terme est nul, *le couple est constant.*

On ne rencontre guère jusqu'ici, dans l'industrie, que deux espèces d'alternateurs polyphasés produisant les courants bi- et triphasés, les seconds admettant deux variantes suivant que le montage est en étoile ou en polygone.

Alternateur biphasé. — En appelant e_{eff}, i_{eff} la force électromotrice et l'intensité efficaces de chacun des courants et φ leur déphasage sur les forces électromotrices, la puissance de la machine sera $P = 2\,e_{eff}\,i_{eff}\cos\varphi$. Comme construction, c'est un alternateur ordinaire présentant deux séries de bobines induites 1 et 2 (fig. 203), symétriquememt distribuées sur la couronne intérieure de l'induit. Dans la position figurée, la force électromotrice est nulle dans l'enroulement 1 et maximum dans l'enroulement 2.

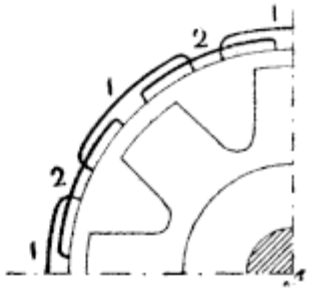


FIG. 203.

Les extrémités de chacun des enroulements induits se raccordent à des bornes où se font les reliements des circuits d'utilisation.

Si un seul fil de retour est utilisé, deux des bornes, soit d'entrée, soit de sortie, sont métalliquement réunies entre elles, constituant la troisième borne de la machine.

De la formule écrite ci-dessus, on conclut qu'à égalité d'encombrement, la machine biphasée aura une puissance double de la machine alternative ordinaire développant les mêmes valeurs efficaces, ce qui, indépendamment d'autres éléments de supériorité que nous étudierons plus loin, constitue un avantage marqué sur la seconde.

REMARQUE. — En réalité le système biphasé est tétraphasé. Car, si nous considérons les quatre fils de ligne dans leur ordre successif 1, 2, 3, 4, nous y trouvons 4 courants égaux en valeur efficace et tous déphasés l'un par rapport à l'autre de $\pi/2 = 2\pi/4$. Dans les conducteurs 1 et 3, 2 et 4, les courants sont déphasés

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de $2 \times \pi/2 = \pi$, c'est-à-dire qu'ils sont égaux et opposés, mais ils s'ajoutent par suite du montage des circuits, ce qui fait qu'au total on peut n'envisager que deux courants d'amplitude double, déphasés de $\pi/2$.

Nous pouvons encore dire que c'est un système semi-polyphasé avec $n = 4$ ou *semi-tétraphasé*. La figure 204 donne le schéma du bobinage d'un induit biphasé tétrapolaire avec 4 encoches par bobine. Il y a donc 8 bobines et $8 \times 4 = 32$ encoches. 1, 2, 1′, 2′ sont les quatre bornes de ligne.

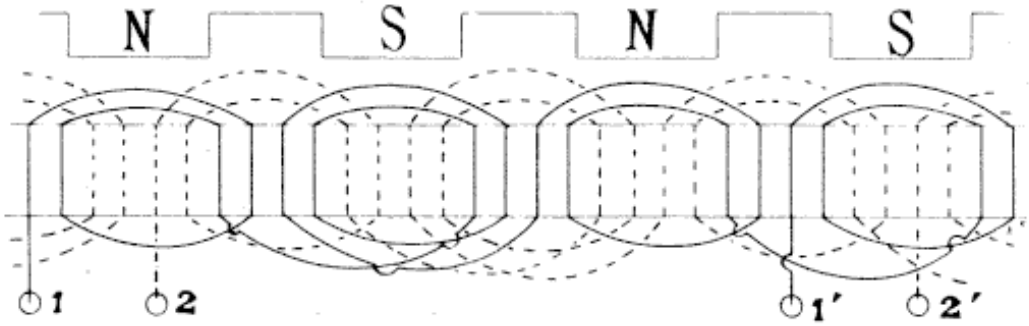


Fig. 204.

Mesure d'une puissance biphasée. — Cette évaluation ne présente aucune difficulté. Si les circuits sont séparés, on mesure, à l'aide de deux wattmètres, la puissance dépensée simultanément dans chacun d'eux.

Si les circuits ont un retour commun, ces deux appareils sont encore nécessaires. On intercale les bobines ampèremétriques dans les fils de ligne, les bobines voltmétriques étant dérivées entre chaque fil de ligne et celui de retour. Au cas où les charges seraient les mêmes dans chaque fil de ligne, un seul wattmètre suffirait.

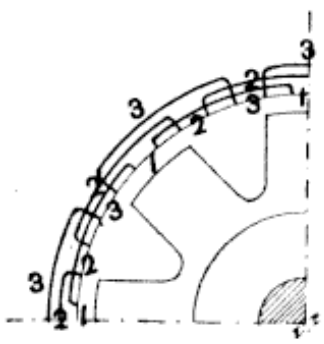


Fig. 205.

Alternateur triphasé. — Comme différence de construction, nous trouvons (fig. 205) trois groupes égaux de bobines induites décalés l'un par rapport à l'autre du tiers de la longueur périphérique correspondant à une période, c'est-à-dire du tiers de l'intervalle séparant la distance de *deux pôles consécutifs de mêmes noms* de l'inducteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La figure 206 donne le schéma d'enroulement d'un induit triphasé tétrapolaire à 4 encoches par bobine ; il y a 4 bobines par phase, soit $4 \times 4 \times 3 = 48$ encoches.

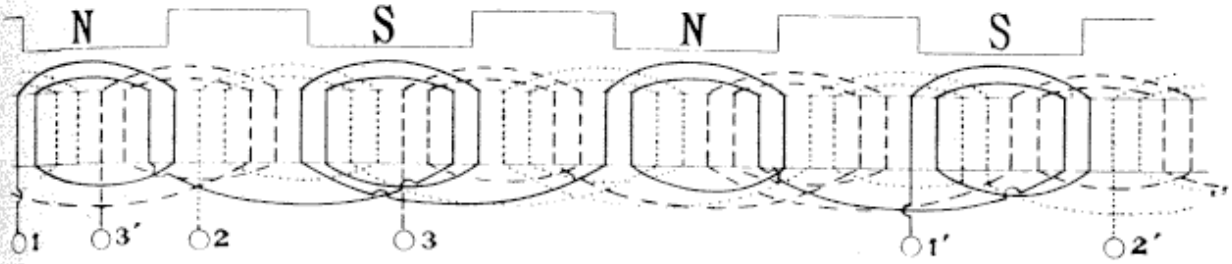


FIG. 206.

On y rencontre donc 24 encoches par deux pôles complets correspondant à une période. Il en résulte que si la phase 1 commence à l'encoche 1, la phase 2 commencera à l'encoche $1 + 24/3 = 9$ et la phase 3 à l'encoche $1 + 2 \cdot 24/3 = 17$, cas de la figure 206.

Montage en étoile. — Quand les entrées 1, 2, 3 des trois circuits sont réunies entre elles, nous obtenons le montage en étoile, la borne commune étant le *point neutre*. Cette borne se rencontre rarement, le centre de l'étoile étant généralement inaccessible.

En appelant u_{eff} la force électromotrice efficace développée dans chacune des branches de l'étoile et i_{eff} l'intensité efficace du courant qui les traverse, la puissance de la machine aura évidemment pour valeur $3\, u_{eff}\, i_{eff} \cos \varphi$.

Il est utile de transformer cette expression en fonction de la différence de potentiel existant entre les 3 bornes de ligne, puisque celle-ci commandera le degré d'isolation qu'il conviendra d'admettre dans les circuits, et que c'est la seule que l'on puisse mesurer au voltmètre, si le point neutre est inaccessible, à moins de recourir à un point neutre artificiel.

Soient v le potentiel au centre de l'étoile et U la force électromotrice maximum qui se développe dans chaque enroulement. Le potentiel à la première borne sera au moment t : $v + U \sin \omega t$; au même moment il atteindra à la borne suivante la valeur :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$v + U \sin(\omega t - 2\pi/3)$. On aura pour la différence de potentiel ou force électromotrice régnant entre ces bornes :

$$(1)\quad v + U \sin \omega t - v - U \sin(\omega t - 2\pi/3) = 2U \sin \pi/3 \cos(\omega t - \pi/3).$$

Nous voyons donc que : une force électromotrice maximum U régnant dans chacune des branches de l'étoile, la différence maximum de potentiel entre deux fils consécutifs de ligne est égale à $2U \times \sin \pi/3$.

Si la force électromotrice efficace dans une des branches est u_{eff}, la force électromotrice entre deux bornes de ligne sera

$$e_{eff} = 2 \sin \pi/3 \; u_{eff} = \sqrt{3} \; u_{eff}.$$

On peut arriver plus aisément à cette relation au moyen des vecteurs. La formule (1) montre que, le potentiel du centre de l'étoile n'intervenant pas, il suffira de soustraire l'un de l'autre les vecteurs représentant les forces électromotrices développées dans les branches de l'étoile.

Soit donc OA (fig. 207), le vecteur représentant la force électromotrice efficace u_{eff} développée dans une des branches de l'étoile. Les forces électromotrices efficaces des deux autres branches sont représentées par le même vecteur ayant tourné respectivement de 120° et 240°, OB et OC. La différence de potentiel ou tension composée e_{eff} existant entre les bornes extérieures A et B, sera obtenue en soustrayant le vecteur OB du vecteur OA. Nous porterons donc à l'extrémité de OA un vecteur égal, parallèle et de sens contraire à OB, et nous joindrons au point O. Le vecteur résultant

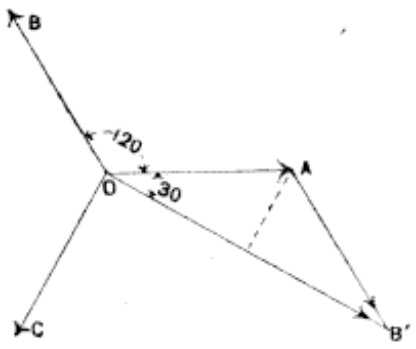


FIG. 207.

$$OB' = e_{eff} = 2\,OA \cos 30^\circ = \frac{2\,u_{eff}\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}\; u_{eff}.$$

d'où $u_{eff} = e_{eff}/\sqrt{3}$. En remplaçant u_{eff} par cette valeur dans l'expression de la puissance, il vient :

$$P = 3\,u_{eff}\,i_{eff} \cos\varphi = 3\,e_{eff}/\sqrt{3}\,i_{eff} \cos\varphi = \sqrt{3}\,e_{eff}\,i_{eff} \cos\varphi = 1{,}73\,e_{eff}\,i_{eff} \cos\varphi,$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'où la règle : *la puissance d'un alternateur triphasé en étoile est égale à* $\sqrt{3}$ *fois le produit de la différence de potentiel entre les fils de ligne par l'intensité du courant les traversant et par le cosinus de l'angle de déphasage des courants sur les forces électromotrices engendrées dans chacune des phases.*

On remarquera que la tension composée se trouve déphasée respectivement de 30° et 150° sur les tensions étoilées correspondantes.

Mesure d'une puissance triphasée étoilée. — MÉTHODE DES TROIS WATTMÈTRES. — Appelons i_1, i_2, i_3 les courants et u_1, u_2, u_3 les forces électromotrices engendrées dans les trois enroulements à l'instant t. La puissance instantanée vaudra

$$dP = i_1 u_1 dt + i_2 u_2 dt + i_3 u_3 dt \qquad (2)$$

correspondant à une puissance moyenne

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T i_1 u_1 dt + \frac{1}{T}\int_0^T i_2 u_2 dt + \frac{1}{T}\int_0^T i_3 u_3 dt.$$

Chacun de ces termes peut se mesurer séparément au moyen d'un wattmètre. On intercale le gros fil de chaque wattmètre dans le conducteur d'une phase et la bobine de fil fin entre ce conducteur et le centre de l'étoile ou, si ce centre est inaccessible, entre ce conducteur et un centre artificiel obtenu au moyen de trois résistances égales. On totalise les trois mesures.

Quand les trois phases sont également chargées, on se contente d'une seule mesure que l'on triple $P = 3\, u_{eff}\, i_{eff} \cos\varphi$.

MESURE DE φ. — En complétant la lecture précédente par celle d'un voltmètre donnant la tension entre phases e_{eff} ou directement u_{eff} et d'un ampèremètre intercalé dans le fil de ligne et donnant i_{eff}, on peut en déduire $\cos\varphi$ et par suite φ.

En effet, $e_{eff} = u_{eff}\sqrt{3}$ ce qui détermine u_{eff}. $P/3$ étant donné par la lecture du wattmètre, i_{eff} étant connu, la formule $P = 3\, u_{eff}\, i_{eff} \cos\varphi$ donne par suite $\cos\varphi$.

MÉTHODE DES DEUX WATTMÈTRES. — La formule (2) peut se mettre sous la forme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$dP = i_1 u_1 dt + i_2 u_2 dt + u_3 (-i_1 - i_2) dt = i_1 (u_1 - u_3) dt + i_2 (u_2 - u_3) dt$$

puisqu'à chaque instant $\Sigma i = 0$. D'où nouvelle expression de la puissance moyenne

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 (u_1 - u_3) dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_2 (u_2 - u_3) dt.$$

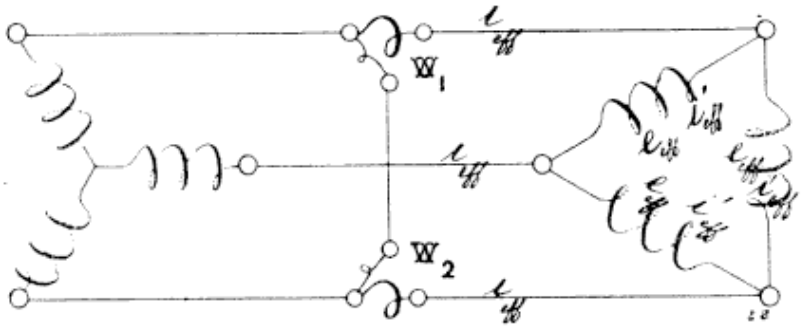


Fig 208.

On intercalera dans deux des phases, les enroulements à gros fil de deux wattmètres W_1, W_2 (fig. 208 partie de gauche), les enroulements voltmétriques étant rattachés à la troisième phase. On sommera les deux lectures.

Montage en polygone. — Quand les trois groupes de bobines sont raccordés en polygone, c'est-à-dire la sortie de l'un à l'entrée de l'autre et ainsi de suite, les bornes de la machine étant dérivées sur les conducteurs de jonction, la force électromotrice e_{eff} (fig. 208 partie droite), existant entre deux bornes quelconques, sera celle développée dans le groupe des bobines considérées, mais les courants i_{eff}, passant dans les fils de ligne, auront pour valeur la différence des courants i'_{eff} produits dans les bobines consécutives de l'enroulement.

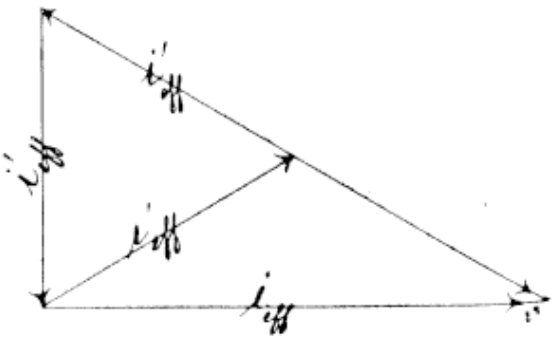


Fig. 209.

Ces courants étant triphasés (fig. 209), leur différence $i_{eff} = 2\, i'_{eff} \cos 30^\circ = \sqrt{3}\, i'_{eff}$. De sorte que la puissance $P = 3\, e_{eff}\, i'_{eff} \cos \varphi = \sqrt{3}\, e_{eff}\, i_{eff} \cos \varphi$ comme précédemment.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Raison de la préférence donnée au montage en étoile. — C'est le montage en étoile qui est le plus usité parce que, pour une même différence de potentiel e_{eff} entre les bornes de la machine ou de ligne, il n'exige entre les extrémités d'un groupe de bobines qu'une tension

$$u_{eff} = \frac{e_{eff}}{\sqrt{3}} = 0{,}578\ e_{eff}.$$

Les enroulements en polygone, au contraire, doivent être établis pour la tension totale e_{eff}. En outre, si les courants des trois phases ne s'équilibrent pas exactement à chaque instant, l'appareil est traversé par un courant local nuisible tout comme, en courant continu, les machines multipolaires enroulées en quantité.

Mesure d'une puissance triphasée en triangle. — Appelons i'_1, i'_2, i'_3 (fig. 210), les courants instantanés dans les trois côtés du polygone, v_1, v_2, v_3 les potentiels des sommets, i_1, i_2, i_3, les courants instantanés dans la ligne.

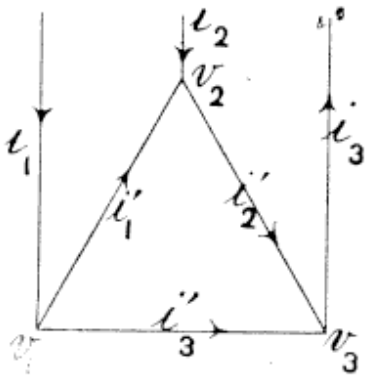


Fig. 210.

On a $dP = i'_1 (v_1 - v_2)\, dt + i'_2 (v_2 - v_3)\, dt + i'_3 (v_1 - v_3)\, dt$. Mais $i_1 = i'_1 + i'_3$ et $i_2 = i'_2 - i'_1$ d'où $i'_3 = i_1 - i'_1$ et $i'_2 = i_2 + i'_1$.

Remplaçons i_2 et i'_2 par leur valeur dans l'équation précédente, il vient $dP = i'_1 (v_1 - v_2)\, dt + (i_2 + i'_1)(v_2 - v_3)\, dt + (i_1 - i'_1)(v_1 - v_3)\, dt = i_1 (v_1 - v_3)\, dt + i_2 (v_2 - v_3)\, dt$.

On en tire pour la puissance moyenne la même expression que dans le cas du montage en étoile, ce qui montre que la mesure au moyen de deux wattmètres peut s'effectuer de la même manière (côté droit de la figure 208).

L'induit bipolaire à anneau comme alternateur polyphasé. En raccordant deux sections d'un induit bipolaire Gramme diamétralement opposées à deux bagues isolées sur lesquelles frottent des balais, on pourra recueillir du courant alternatif à ces bagues. Ce

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courant aura pour valeur efficace de sa force électromotrice $E/\sqrt{2}$. En appelant i_{eff} le courant alternatif donnant le même effet Joule que le courant continu I à travers l'induit, la valeur efficace du courant alternatif engendré sera $i_{eff} = I/2$ et la puissance alternative de la machine $P' = 2\,E/\sqrt{2}\;I/2\cos\varphi = 0{,}707\,E\,I\cos\varphi$. avec $\operatorname{tg}\varphi = \omega\mathfrak{L}/r$, $\mathfrak{L}$ et r étant le coefficient de selfinduction et la résistance d'un demi-anneau.

Dans les mêmes conditions la puissance en courant continu serait E I, de sorte que la puissance débitée en alternatif simple est d'au moins 30 °/₀ plus faible.

Raccordons maintenant à 4 bagues isolées, quatre sections situées à 90 degrés l'une de l'autre. Traçons une circonférence sur une longueur AD (fig. 211), proportionnelle à E, comme diamètre. Soient 4 points A F D G pris à 90° l'un de l'autre. Ainsi que nous l'avons vu précédemment, les vecteurs A F et F D représentent la force électromotrice maximum développée dans l'enroulement de l'anneau compris entre A et F, F et D. Or, on a $AF = AD \sin 45° = AD/\sqrt{2}$. La force électromotrice efficace de chaque quart de l'induit sera donc $E/\sqrt{2}\,.\,\sqrt{2} = E/2$. Le courant sera toujours $i_{eff} = I/2$ et la puissance biphasée développée $4\,.\,E/2\,.\,I/2\cos\varphi' = E\,I\cos\varphi'$ avec $\operatorname{tg}\varphi' = \omega\mathfrak{L}'/r'$, $\mathfrak{L}'$ et r' étant le coefficient de selfinduction et la résistance d'un quart d'anneau. L'angle φ' sera plus faible que φ, attendu que le coefficient de selfinduction $\mathfrak{L}'$ vaudra environ le quart de $\mathfrak{L}$, tandis que r' vaudra la moitié de r.

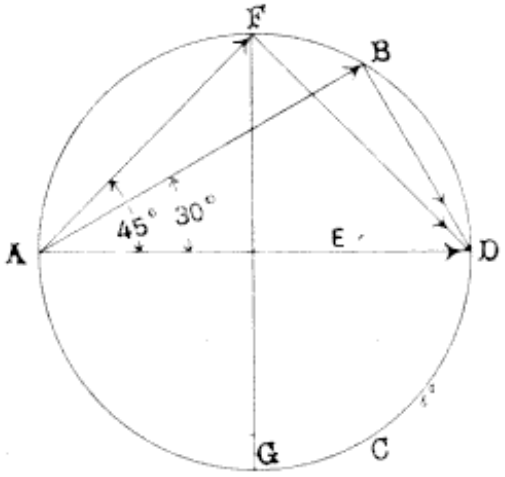


FIG. 211.

Raccordons maintenant à 3 bagues isolées, 3 points A, B, C pris à 120° l'un de l'autre. Nous aurons affaire à des courants triphasés. La force électromotrice maximum engendrée dans un enroulement sera représentée par $AB = AD \sin 60° = E\sqrt{3}/2$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et la force électromotrice efficace par $E\sqrt{3}/2\sqrt{2}$. Courant $I/2$. $\operatorname{tg}\varphi' = \omega\mathfrak{L}''/r''$. Puissance $P'' = E\sqrt{3}/2\sqrt{2} \cdot I/2 \cdot \cos\varphi'' = 0{,}92\ E\ I \cos\varphi''$.

S'il s'agissait d'une machine hexaphasée, la force électromotrice maximum engendrée dans une des six bobines, serait représentée par $BD = r = AD/2$. La force électromotrice efficace de chacun des six enroulements serait alors $E/2\sqrt{2}$ et la puissance hexaphasée de la machine s'élèverait à $6 \cdot E/2\sqrt{2} \cdot I/2 \cos\varphi''' = 1{,}06\ E\ I \cos\varphi'''$ avec $\operatorname{tg}\varphi''' = \omega\mathfrak{L}'''/r'''$ et $\varphi''' <$ que tous les autres déphasages.

C'est donc avec le système hexaphasé que la machine développerait une puissance maximum. Mais il faudrait 6 fils de ligne pour la transporter, condition pratiquement irréalisable à grande distance.

Il est facile de voir que, d'une manière générale, $e_{\text{eff}} = E/\sqrt{2} \sin\pi/n$, $i_{\text{eff}} = I/2$ et la puissance polyphasée $P_n = n\ E\ I/2\sqrt{2} \sin\pi/n$.

L'appareil ainsi agencé, permettant la production simultanée de courants continus et alternatifs, porte le nom de *commutatrice*.

---

§ 6. — Couplage, essais et rendement des alternateurs polyphasés.

Couplage des alternateurs polyphasés. — Le couplage des alternateurs polyphasés se fait d'une manière analogue à celui des alternateurs simples. Il faut, pour le réaliser, que l'amplitude, la fréquence et la phase des forces électromotrices soient les mêmes.

Le voltmètre indique quand la première condition est remplie. Pour ce qui concerne les deux autres, si les machines sont identiques et tournent dans le même sens, on peut utiliser un dispositif analogue à celui vu pour les alternateurs : on dérive par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exemple sur les bornes 2 et 3 (fig. 212) des alternateurs, par l'intermédiaire d'interrupteurs I, deux fils dans l'un desquels sont insérées les lampes L_1 et L_2 et on croise les connexions. Quand les lampes brillent de l'éclat le plus vif, la concordance est obtenue et l'on peut coupler.

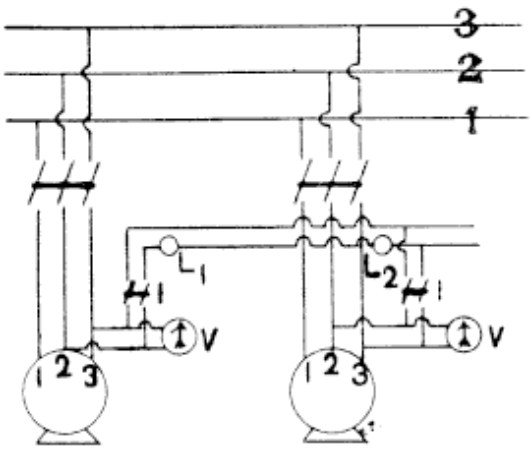


FIG. 212.

S'il s'agit de hautes tensions, les lampes sont insérées dans les circuits secondaires de transformateurs réducteurs.

INDICATEUR A FEUX TOURNANTS. — On obtient des indications plus certaines en utilisant trois lampes a, b, c placées en triangle derrière un verre dépoli (fig. 213). b et c sont disposées comme dans le cas précédent, tandis que la première a est raccordée directement entre les pôles semblables 1 et 1 de la machine et du tableau.

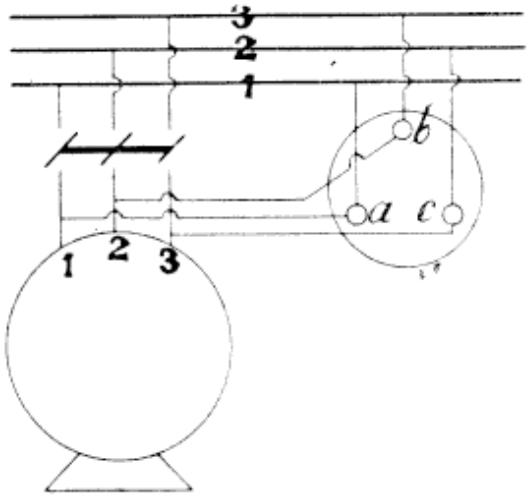


FIG. 213.

Supposons que la concordance existe. La borne 1 et la barre 1 étant à chaque instant au même potentiel, la lampe a reste constamment éteinte, les deux autres brillent du même éclat et nous verrons une tache sombre sur le verre dépoli en face de la lampe a.

Si l'alternateur est en avance ou en retard par rapport au tableau, les lampes s'éteindront successivement et l'on voit derrière l'écran une tache sombre qui tourne dans un sens ou dans l'autre suivant le sens du déphasage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand la tache sombre est arrêtée *et en face de a*, il y a synchronisme.

Synchroniseur d'Evershed.— On préfère souvent se baser sur les indications d'une aiguille. Le synchroniseur d'Evershed présente un enroulement fixe et un autre, mobile, portant l'aiguille. Chacun de ces bobinages est double et disposé de manière à obtenir un déphasage de $\pi/2$ entre les intensités qui les traversent. L'enroulement fixe est en rapport avec les barres omnibus du tableau de distribution et l'enroulement mobile avec la machine à coupler. Deux champs magnétiques sont ainsi produits, tournant dans le même sens. Si la fréquence est la même de part et d'autre, les deux champs tournent avec la même vitesse et ne s'influencent pas. Si la fréquence des barres omnibus est plus grande que celle des courants venant de la machine, il y a production de courants induits dans la partie tournante et ceux-ci tendent à l'entraîner dans le sens de la rotation des champs. Si, au contraire, la fréquence des courants venant des barres omnibus est moindre, il y a rotation en sens inverse.

En somme, le fonctionnement est basé sur celui des moteurs asynchrones polyphasés qui sera étudié plus loin.

Au cas où il s'agit de hautes tensions, on interpose un transformateur entre les circuits et le synchroniseur.

Essais. — Les essais sont analogues à ceux indiqués pour les machines monophasées.

Rendements. — Le tableau suivant (1) donne les renseignements les plus intéressants relatifs à des alternateurs de diverses puissances.

En comparant avec le tableau analogue relatif aux alternateurs monophasés on voit que, pour une même puissance, les alternateurs triphasés sont beaucoup moins pesants (15 à 30 %) et que leur rendement est un peu meilleur (1 % en plus environ).

(1) Catalogue des Ateliers de Constructions électriques de Charleroi.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Puissance en kilovoltampères	Tours par minute	Tension en volts	Rendement avec $\cos\varphi = 1$ y compris l'énergie dépensée dans l'enroulement d'excitation	Poids de l'alternateur avec poulie	
				$f = 25$	$f = 50$
50	750	500 3 000	0,905	1 800	
100	750	500 3 000	0,92	2 800	2 500
200	500	500 3 000	0,9275	5 400	4 800
250	500	500 3 000	0,9250 (1)	7 400	7 200
500	300	500 3 000	0,93	17 000	15 500

Compoundage des alternateurs. — Nous avons vu par quel moyen simple : juxtaposition d'un enroulement série à l'enroulement dérivé, il était possible de compounder une dynamo.

Le problème du compoundage d'un alternateur est beaucoup plus complexe. Si nous remarquons, en effet, que la tension aux bornes e (fig. 214) est la résultante de la force électromotrice totale E et de la force électromotrice de self $\omega \mathfrak{L} I$, en négligeant la résistance de l'induit, nous voyons que e varie non seulement avec l'intensité du courant débité par l'alternateur, mais encore avec son déphasage φ sur la force électromotrice aux bornes. Par conséquent le courant d'excitation de l'alternateur devra être fonction de ces deux facteurs.

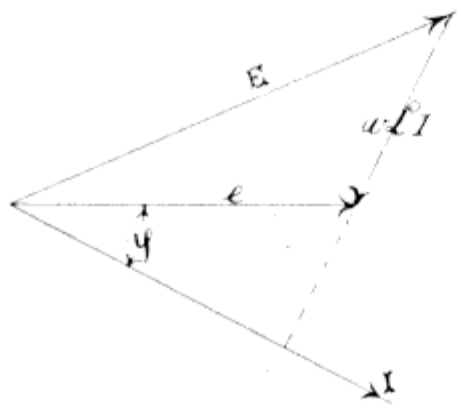


Fig. 214.

Or, puisque les variations à compenser proviennent du courant alternatif lui-même, le problème du compoundage revient à celui-ci : *Etablir entre l'inten-*

(1) Trois paliers au lieu de 2.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sité du courant débité par l'alternateur et son déphasage d'une part, et la force électromotrice continue débitée par l'excitatrice d'autre part, une relation telle que le voltage de l'alternateur soit maintenu constant à ses bornes.

En d'autres termes, nous devons non seulement développer notre courant alternatif, mais encore : 1° produire du courant continu ; 2° régler le dispositif pour que le courant continu envoyé dans les inducteurs de l'alternateur, maintienne constante la tension aux bornes, quels que soient l'intensité et le déphasage du courant alternatif débité.

Un grand nombre de solutions plus ou moins compliquées ont été imaginées. Nous n'en indiquerons que deux fort simples.

Emploi d'une commutatrice en opposition avec une source constante. — L'alternateur triphasé G (fig. 215) à compounder est muni de son excitatrice *g*. L'excitation de cette dernière est connectée avec le côté continu d'une petite commutatrice C, et avec une source constante de courant D de force électromotrice supérieure à celle continue développée par la commutatrice. La commutatrice étant un moteur synchrome, on n'a pas à s'inquiéter de sa vitesse qui est constante. Automatiquement, le déphasage du courant alternatif qu'elle absorbe variera et modifiera la force électromotrice développée du côté continu.

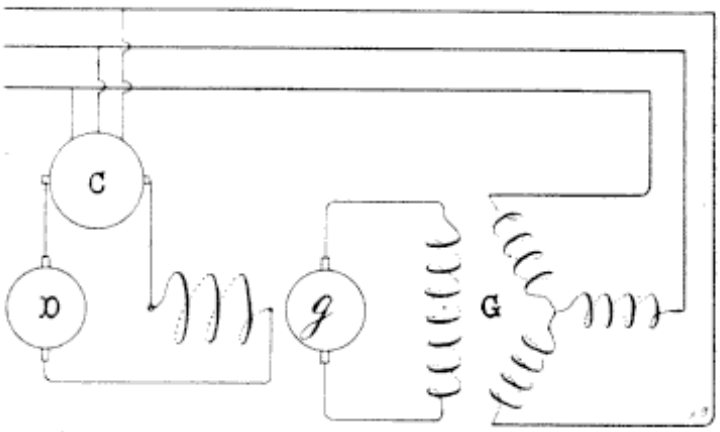


FIG. 215

Appelons E_1 et e_1 les forces électromotrices continues de la source et de la commutatrice en régime normal. Si R_1 est la résistance du circuit total d'excitation, le courant d'excitation de l'excitatrice *g* a pour valeur

$$i_1 = \frac{E_1 - e_1}{R_1}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En outre, e_1 est, à circuit ouvert aussi bien qu'à circuit fermé, invariablement liée à la différence de potentiel, côté polyphasé.

Dans le cas du triphasé, en appelant e_{eff} la tension entre fils, on a à vide $e_1 = 1{,}64\ e_{eff}$.

En charge, la relation n'est plus aussi simple, parce que les forces électromotrices effectives et de self doivent intervenir. Mais, quoiqu'il en soit, comme elles dépendent de l'intensité du courant traversant la commutatrice et que dans leur composition l'angle de déphasage du courant intervient, on voit que la tension continue du côté du collecteur sera une fonction de l'intensité et du déphasage des courants alternatifs débités.

Lorsque la charge est normale dans les circuits, les forces électromotrices alternatives de la commutatrice sont égales et opposées à celles du réseau et aucun courant n'est échangé. Dès que la charge du réseau augmente, e_{eff} diminue, e également, et le courant d'excitation devenant plus intense, le voltage remonte à l'alternateur.

Les inconvénients de ce dispositif sont, notamment, que la puissance motrice doit toujours émaner du côté alternatif, de manière à assurer l'invariabilité de la vitesse, sinon il y aurait perturbation ; en outre, il faut s'assurer de la constance de la source continue opposée à la force électromotrice continue de la commutatrice et qui doit rester prépondérante.

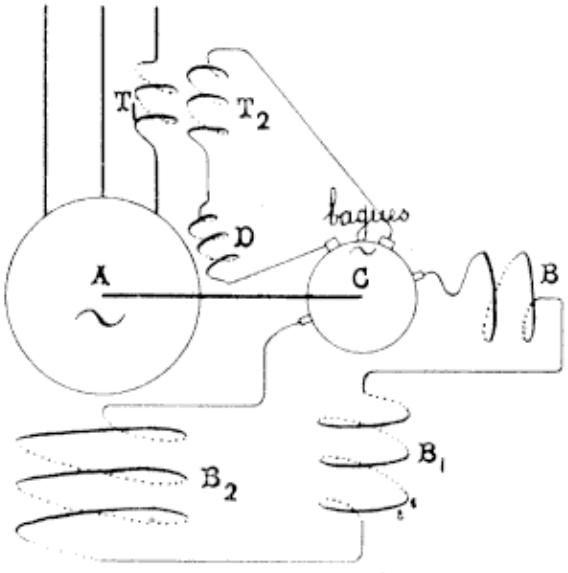


Fig. 216.

Système Marius Latour. — Ces critiques ne peuvent être adressées au système Latour qui comporte aussi une commutatrice C (fig. 216), invariablement reliée à l'axe de l'alternateur A. B et B_1 sont ses deux enroulements induc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teurs dont un de compensation de la réaction d'induit, en série avec l'enroulement inducteur B_2 de l'alternateur; ils sont alimentés sous la tension continue u du côté du collecteur de C.

Il y aura compoundage de l'alternateur, si la tension alternative e''' appliquée aux bagues de C et *dont dépend* u, est liée au courant débité par l'alternateur, de telle manière qu'elle augmente quand celui-ci augmente et vice-versa. A cette fin, cette tension est la résultante d'une force électromotrice alternative e' (fig. 217), proportionnelle à la force électromotrice aux bornes de l'alternateur, et d'une tension e'', proportionnelle, à l'intensité de son courant et fournie par le secondaire T_2 (fig. 216) du transformateur T_1 T_2.

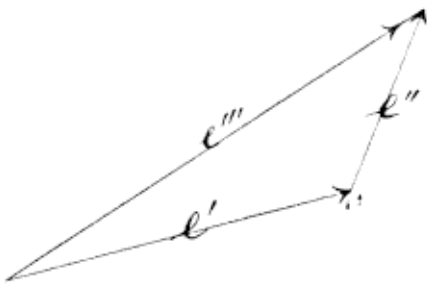


FIG. 217.

L'enroulement développant e' est constitué par un bobinage auxiliaire de quelques spires logées dans les encoches de l'induit A.

Pour que la composition vectorielle de la figure 217 soit réalisée, il faut que la fréquence de la force électromotrice de C soit la même que celle de l'alternateur et que le vecteur de sa force électromotrice coïncide avec celui de la force électromotrice alternative qu'établirait la rotation de l'induit à vide. La commutatrice possède donc le même nombre de pôles que l'alternateur; en outre, son induit est fixé de telle sorte que e''' soit décalée de 90° sur l'axe des pôles de l'alternateur et se trouve ainsi en concordance avec la force électromotrice totale développée dans celui-ci.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE IX.

Les alternomoteurs

On distingue deux grandes classes de moteurs à courants alternatifs : les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones.

Les premiers, qui exigent une excitation par courant continu et ne démarrent pas en charge, ne fournissent du travail mécanique qu'à une vitesse angulaire déterminée. Par contre, leur facteur de puissance à pleine charge est élevé.

Les seconds fournissent du travail à des vitesses variant entre des limites d'ailleurs assez restreintes (quelques °/₀) : ils démarrent sous charge en polyphasé et n'exigent pas de courant continu, mais leur facteur de puissance à pleine charge est plus faible. Malgré ce dernier inconvénient, ils restent bien supérieurs aux premiers pour la plupart des applications. Ils sont même comparables aux moteurs à courant continu, sur lesquels certains d'entre eux présentent l'avantage d'être dépourvus de collecteur. Des types sont même dépourvus de tout contact glissant, ce qui supprime les étincelles, qualité essentielle au point de vue de l'emploi dans les charbonnages notamment.

Depuis quelques années une nouvelle et intéressante classe de moteurs asynchrones a vu le jour : les *moteurs monophasés à collecteur*, qui présentent sur les moteurs monophasés asynchrones l'avantage prépondérant de posséder un fort couple de démarrage et, sur les moteurs polyphasés asynchrones, celui non moins important pour la traction sur les chemins de fer secondaires, de n'exiger que deux fils de ligne et même un seul, en employant les rails pour le retour du courant.

Enfin, tout récemment, on a étudié des moteurs polyphasés asynchrones à collecteur, en l'espèce triphasés, qui donnent un bon rendement à des vitesses très variées et démarrent sans dépense exagérée d'énergie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ I. — Moteurs synchrones.

Moteur synchrone monophasé. — Reprenons la spire tournante qui nous a servi à développer des courants sinusoïdaux, (fig. 218) dans la position faisant un angle ωt avec l'axe MN où elle développait un courant $i = I \sin \omega t$. Supposons-la arrêtée : posons $\omega t = \alpha$ et envoyons le courant $i = I \sin (\alpha - \omega t')$. Au temps $t' = 0$, nous aurons bien la valeur initiale $i = I \sin \omega t$. La face négative de la spire est dirigée vers l'observateur. Comme elle est sollicitée à embrasser un flux maximum, la spire va tourner en sens inverse du mouvement qui avait donné naissance au courant (loi de Lenz) et rétrograder vers la ligne de maximum du flux MN qu'elle franchit en vertu de son inertie. Nous supposons d'ailleurs que sa vitesse mécanique est ω. Dès qu'elle aura passé au-delà de la ligne de maximum de flux, $\omega t'$ étant $> \omega t$, le courant se trouve renversé, la face négative change de côté et, en vertu du même mécanisme électromagnétique, la spire est sollicitée à continuer son mouvement dans le même sens jusqu'au passage suivant par MN, où le courant est renversé à nouveau, et ainsi de suite.

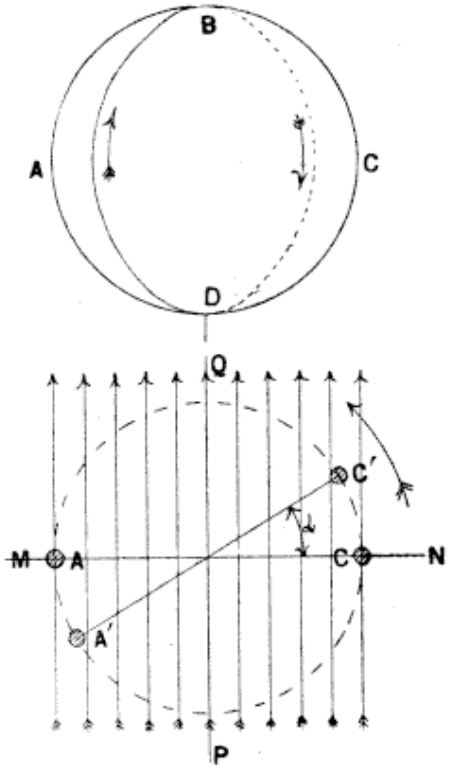


FIG. 218.

Nous en concluons qu'*il est possible de faire fonctionner comme moteur la spire plongée dans un champ magnétique, mais à condition que le courant se renverse chaque fois qu'elle embrasse un flux maximum, en d'autres termes chaque fois que la force électromotrice d'induction y change elle-même de sens.*

Il faut donc que le courant présente les mêmes variations rythmées que celles de la force électromotrice d'induction déve-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

loppée dans la spire par son mouvement même, ou que sa vitesse de pulsation soit exactement égale à celle de la force électromotrice d'induction engendrée par la rotation de la spire. S'il n'en était pas ainsi, en effet, celle-ci serait sollicitée pendant une certaine fraction du tour par un couple retardateur, dont la durée d'application augmenterait à chaque révolution pour l'arrêter bientôt. En outre, la spire tournant en sens inverse du mouvement qui engendrait le courant qu'on lui envoie maintenant, développe une force contre-électromotrice opposée au passage de ce courant.

Enfin, les courants alternatifs étant en général à variations extrêmement rapides et la spire douée d'inertie, si celle-ci étant immobile, nous la faisons traverser par un courant alternatif, à peine aura-t-elle subi une impulsion dans un sens qu'elle en recevra une autre en sens inverse et ne pourra démarrer : *il faudra l'amener préalablement à la vitesse spéciale de synchronisme, pour qu'elle puisse fournir de la puissance mécanique pendant la majeure partie de la pulsation du courant.*

Étudions algébriquement le problème. Soit un alternateur tournant avec une vitesse angulaire mécanique uniforme ω_1, développant une force électromotrice alternative

$$e = \mathrm{E} \sin \omega' t = \mathrm{E} \sin 2\pi f' t$$

et traversé par un courant quelconque de vitesse angulaire ω déphasé de φ à l'instant considéré. On a au moment t

$$i = \mathrm{I} \sin (\omega t - \varphi) = \mathrm{I} \sin (2\pi f t - \varphi).$$

La puissance électrique momentanée produite par l'alternateur est à l'instant t

$$\mathrm{P} = ei = \mathrm{EI} \sin 2\pi f' t \sin (2\pi f t - \varphi)$$

$$= \frac{\mathrm{EI}}{2} \{ \cos [2\pi (f' - f) t + \varphi] - \cos [2\pi (f' + f) t - \varphi] \}.$$

Ou en posant $f' - f = f''$, $f' + f = f'''$

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{EI}}{2} \{ \cos (2\pi f'' t + \varphi) - \cos (2\pi f''' t - \varphi) \}.$$

La différence des deux fonctions périodiques alternatives étant elle-même nécessairement périodique et alternative, l'alter-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nateur sera le siège d'une énergie alternativement positive, puis négative, c'est-à-dire subira une série d'impulsions dans un sens, immédiatement suivie de la même série d'impulsions égales et contraires, de sorte que la puissance moyenne qu'il développe est nulle.

Il existe cependant deux cas particuliers où il n'en sera pas ainsi : c'est quand le terme périodique d'un des deux cosinus est nul.

1° $f'' = 0$ ou $f' = f$ ou $\omega' = \omega$. La force électromotrice développée est de mêmes fréquence et pulsation que le courant. On a donc à chaque instant

$$P = \frac{EI}{2} \{ \cos \varphi - \cos (2\pi \times 2ft - \varphi) \}.$$

Le terme périodique de fréquence double fournissant une puissance moyenne nulle, $P = EI/2 \cos \varphi$, ce que nous pouvions d'ailleurs écrire directement, puisqu'il s'agit maintenant d'un courant déphasé de φ sur une force électromotrice de même fréquence.

Si $\cos \varphi$ est positif, la machine fournira une certaine puissance électrique, en absorbant naturellement une puissance mécanique équivalente ; nous sommes dans le cas du générateur.

2° $f''' = 0$ ou $f' = -f$ ou encore $\omega' = -\omega$, la force électromotrice est encore de même fréquence que le courant, mais elle a changé de sens par rapport à ce dernier. On a

$$e = E \sin \omega' t = -E \sin \omega t, \quad i = I \sin (\omega t - \varphi)$$

et

$$P = -\frac{EI}{2} \cos \varphi.$$

Si $\cos \varphi$ est positif, l'alternateur fournira une puissance électrique négative, c'est-à-dire absorbera de la puissance électrique venant du circuit extérieur et restituera une puissance mécanique équivalente, en vertu de la loi de la conservation de l'énergie ; nous sommes dans le cas du moteur.

On conclut des considérations précédentes qu'un alternateur tournant comme moteur ne peut produire de la puissance mécanique, qu'à la condition d'être animé d'une vitesse angulaire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mécanique ω_1, telle que la force électromotrice qu'il produit soit de même fréquence que le courant qu'on lui fournit. *C'est cette vitesse spéciale que l'on appelle vitesse de synchronisme.*

Cette vitesse angulaire de l'alternateur est fonction du nombre $2p$ des pôles inducteurs et de la fréquence f des courants qui le traversent. En effet $\omega' = p\omega_1$ et, puisqu'en valeur absolue $\omega' = \omega$,

$$\omega = 2\pi f = p\omega_1$$

et l'on voit que *la vitesse mécanique angulaire de synchronisme ω_1 de l'alternomoteur est proportionnelle à la fréquence f des courants d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de pôles du moteur.*

Pour une fréquence donnée des courants d'alimentation et partant d'une machine bipolaire, on pourra donc réduire la vitesse de rotation du récepteur dans les rapports $1/2, 1/3, 1/4, \ldots$ en doublant, triplant, quadruplant, ... le nombre des pôles.

Les valeurs instantanées de la force électromotrice et du courant étant $e = -E \sin \omega t$, $i = I \sin (\omega t - \varphi)$, la valeur instantanée de la puissance mécanique produite est donnée par

$$P = ei = -EI \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) = -EI/2 [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)].$$

L'énergie mécanique développée par l'induit varie donc constamment ; elle est tantôt positive, tantôt négative, suivant que les sinus sont de signes contraires ou de mêmes signes ; en outre, comme le montre la formule en cosinus, les variations sont des sinusoïdes de pulsation deux fois plus rapides que celles du courant.

La force électromotrice produite par la machine, orientée en sens inverse du courant, est en somme une force contre-électromotrice, opposée à la force électromotrice de la source extérieure fournissant l'énergie.

C étant le couple mécanique produit, on aura

$$\frac{EI \cos \varphi}{2} = \omega_1 C, \quad \text{d'où} \quad C = \frac{1}{\omega_1} \frac{EI}{2} \cos \varphi.$$

En négligeant la réaction d'induit, E ne dépendra que de la vitesse, puisque l'excitation est indépendante.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

a) Alimentation sous courant efficace constant. — Alors I et ω sont constants. La dernière condition entraîne la constance de la vitesse angulaire mécanique ω_1, puisque celle-ci est, comme nous l'avons vu, proportionnelle à la première ; E devient donc aussi constante, l'excitation étant indépendante et la réaction d'induit supposée négligeable. Dans l'équation

$$C = \frac{1}{\omega_1}\frac{EI}{2}\cos\varphi,$$

ω_1, E et I sont constants, et toute variation du couple résistant ne peut dès lors se traduire que par une variation du facteur de puissance cos φ, c'est-à-dire du déphasage du courant.

A vide, C étant nul, le déphasage est égal à $\pi/2$, puis à mesure que C augmente, le déphasage diminue. Il devient nul quand le couple atteint sa valeur maximum

$$\frac{1}{\omega_1}\frac{EI}{2}.$$

Dès que le couple résistant dépasse ce maximum, le couple moteur ne peut le vaincre, et l'alternomoteur, incapable de tourner à la vitesse du synchronisme, reste en retard. Le synchronisme n'existant plus, sa puissance moyenne devient subitement nulle, il s'arrête. Suivant l'expression consacrée, il est *tombé hors de phase* ou s'est *décroché*.

b) Alimentation sous force électromotrice efficace constante. — ETUDE GRAPHIQUE. — L'emploi des vecteurs permet de nous rendre aisément compte des conditions générales de fonctionnement des moteurs synchrones. Prenons l'alimentation sous différence de potentiel constante. Soient OB (fig. 219) la différence de potentiel aux bornes et OD la force électromotrice développée par la rotation de l'induit. La puissance électrique étant négative, OD est en

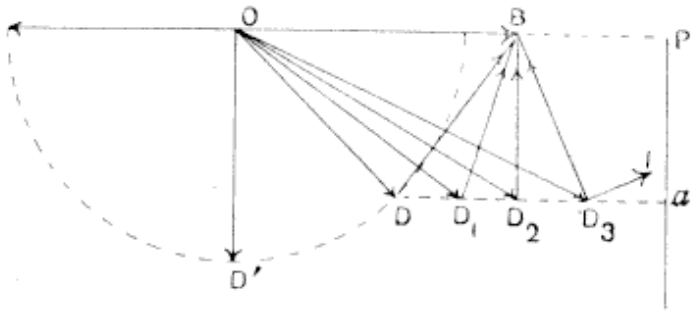


FIG. 219.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

arrière sur OB et la longueur de Pd est proportionnelle à cette puissance. DB représente encore la chute de tension dans l'induit, proportionnelle au courant absorbé.

Plus on chargera le moteur, plus l'angle DOB s'amplifiera, plus il absorbera de courant et plus aussi la puissance développée augmentera. Le maximum a lieu en OD'.

Si le moment résistant augmente encore, le déphasage dépasse 90°, la puissance devient nulle, le moteur se décroche et s'arrête. Le courant traversant le circuit prend alors une valeur très grande. Pour éviter qu'il en résulte un accident, il est donc nécessaire d'interposer des appareils de sûreté, ou de prévoir un débrayage automatique qui supprime la charge.

Surexcitation des moteurs synchrones. — Supposons que le régime étant marqué par OD, on augmente l'excitation. Le moment résistant ne changeant pas et la vitesse de rotation étant invariable, la puissance, proportionnelle à Pd, ne peut se modifier. Par conséquent l'allongement du vecteur OD ne peut se faire que suivant Dd. On voit que la perte de tension dans l'induit DB passe par un minimum très accentué D_2B, puis augmente ensuite indéfiniment.

L'intensité suit la même loi que montre la fig. 220. On obtient une courbe en V caractéristique.

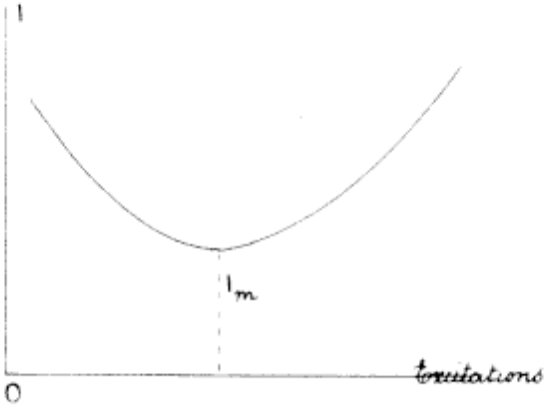


Fig. 220.

La valeur i_m du courant d'excitation qui donne le minimum de courant dans l'induit, c'est-à-dire celle provoquant la plus faible perte d'énergie, doit être adoptée pour la marche normale.

La direction du courant est toujours donnée par la perpendiculaire à DB. Dans la position OD, cette intensité est déphasée en arrière sur la différence de potentiel aux bornes. Au fur et à mesure que l'excitation augmente, elle se rapproche

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la concordance, pour enfin se déphaser en avant, quand on a dépassé le minimum.

On se sert souvent de cette propriété des moteurs synchrones surexcités, d'exiger pour leur alimentation du courant déphasé en avant sur la force électromotrice qui leur est appliquée, pour améliorer le facteur de puissance des distributions d'énergie par courants alternatifs.

Mise en marche. — Puisque la puissance mécanique moyenne du moteur est nulle à toute autre vitesse que celle du synchronisme, il en résulte qu'il est nécessaire de lui faire atteindre cette vitesse par un moyen quelconque. Dès que la marche synchronique est obtenue, il peut prendre sa charge.

Indifférence du sens de rotation. — Le moteur tourne dans les deux sens, car si l'on change le signe de ω dans la valeur de e, on voit qu'il suffit, pour que le produit ei garde le signe négatif, que la valeur de i change de signe également, c'est-à-dire que l'angle $\omega t - \varphi$ soit augmenté ou diminué de π ou le courant déphasé de π, condition aisée à réaliser, car elle s'obtient automatiquement. Le sens de marche en synchronisme dépendra donc du sens dans lequel le moteur a été lancé.

Réaction d'induit. — Puisque le courant a une direction opposée à celle qu'il possède dans le fonctionnement en générateur, la réaction d'induit du moteur sera inverse. Elle aura donc pour expression $- Ki_{eff} \sin \varphi$. Si le courant est déphasé en arrière par rapport à la force contre-électromotrice du moteur, φ est positif, la réaction est négative ou l'action sur le champ inducteur positive. En d'autres termes, le courant renforce l'intensité du champ et par suite la force contre-électromotrice.

Moteur synchrone polyphasé. — Un alternateur polyphasé n'étant rien autre qu'un alternateur à enroulements induits multiples, on conçoit que l'on puisse appliquer intégralement à ceux-ci le raisonnement fait précédemment, valable pour chacun d'eux considéré isolément.

L'alternateur polyphasé excité par un courant continu, ne fournira donc de la puissance mécanique, que si les courants envoyés

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans ses diverses sections à l'encontre des forces électromotrices engendrées par le déplacement des inducteurs, ont la même fréquence que celles-ci, c'est-à-dire que s'il y a synchronisme.

La puissance absorbée par les diverses sections sera alors à chaque instant, en appelant comme précédemment φ le déphasage des courants sur les forces contre-électromotrices

$$e_1 i_1 = \mathrm{EI} \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) = \frac{\mathrm{EI}}{2} \cos \varphi - \frac{\mathrm{EI}}{2} \cos (2\omega t - \varphi) ;$$

$$e_2 i_2 = \mathrm{EI} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{n} - \varphi\right) =$$

$$\frac{\mathrm{EI}}{2} \cos \varphi - \frac{\mathrm{EI}}{2} \cos\left(2\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{n} - \varphi\right) ;$$

$$e_3 i_3 = \mathrm{EI} \sin\left(\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{n}\right) \sin\left(\omega t - 2 \cdot \frac{2\pi}{n} - \varphi\right) =$$

$$\frac{\mathrm{EI}}{2} \cos \varphi - \frac{\mathrm{EI}}{2} \cos\left(2\omega t - 2 \cdot 2 \cdot \frac{2\pi}{n} - \varphi\right)$$

. . . . . .

de sorte que la puissance totale sera

$$\mathrm{P} = \frac{n\mathrm{EI}}{2} \cos \varphi - \frac{\mathrm{EI}}{2} \sum_{p=0}^{p=n-1} \cos\left(2\omega t - 2p \cdot \frac{2\pi}{n} - \varphi\right) = \frac{n\mathrm{EI}}{2} \cos \varphi$$

dont on discuterait la valeur comme précédemment.

On verrait ainsi que le moteur doit être *accroché* par un lancé préalable ; qu'il se décroche dès que le couple résistant dépasse la valeur maximum $n\mathrm{EI}/2\omega_1$ et qu'enfin sa vitesse de rotation, fonction de la fréquence des courants qui l'alimentent, est d'autant plus réduite que le nombre de ses pôles est plus grand. Il est à remarquer que, pour un déphasage φ donné, la puissance est constante, car les termes en $2\omega t$ des équations précédentes s'annulent *à chaque instant* (quantités polyphasées).

Démarrage des moteurs synchrones. — Puisqu'en dehors du synchronisme le couple moteur est nul, il faudra, par un moyen quelconque, amener la partie mobile de la machine à cette vitesse critique.

Les petits moteurs pourront être lancés à la main ou par un dispositif mécanique. En les raccordant à la génératrice par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'intermédiaire de lampes qu'un commutateur permet de mettre en court-circuit, on accélérera la vitesse, jusqu'à ce que les lampes s'éteignent. A ce moment le synchronisme est atteint, et l'on supprime les lampes en manœuvrant le commutateur.

Si la génératrice alimentant le moteur peut être mise en marche en même temps que ce dernier, il suffira, en général, de donner à celui-ci une légère impulsion initiale pour qu'il se synchronise dès les premiers tours.

Les moteurs synchrones polyphasés peuvent démarrer sous charge, par la réaction des courants de Foucault engendrés dans les tôles et les armatures de fixation de la partie mobile, sur le champ tournant qui développe la circulation des courants d'alimentation. Mais il faut avoir soin, pour limiter l'intensité du courant dans l'induit, d'interposer un rhéostat de démarrage, que l'on met ensuite en court-circuit. Le courant absorbé atteint 1,5 fois celui de la pleine charge.

Les grands alternomoteurs actionnent en général leur excitatrice. On pourra faire charger des accumulateurs par celle-ci et la mise en marche à vide s'effectuera en l'utilisant comme moteur alimenté par les accumulateurs. Aussitôt le synchronisme atteint, les connexions sont rétablies et le moteur est mis en relation avec le circuit d'alimentation.

Dans les usines importantes, l'excitation est indépendante. Les grands alternateurs présentent alors en bout d'arbre un petit moteur asynchrone qui sert, au démarrage et à vide, à les amener au synchronisme.

Charge limite. — Dans un bon moteur, la charge limite doit atteindre de 1,5 à 2 fois la charge normale.

§ 2. — Moteurs asynchrones à bagues et en cage d'écureuil.

Moteur asynchrone polyphasé. — Son inducteur fixe, appelé « stator », comporte n circuits distincts, symétriquement distribués autour d'un axe (fig. 221). L'induit dénommé « rotor »,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mobile autour du même axe, est constitué par m conducteurs symétriquement distribués, identiques entre eux et fermés d'une manière quelconque.

Quand on envoie dans l'inducteur n courants polyphasés d'intensité maximum I, ils donnent naissance à un champ $\mathcal{H} = nk\mathrm{I}/2$, tournant avec la vitesse angulaire uniforme ω, dans un sens que nous considérerons comme positif.

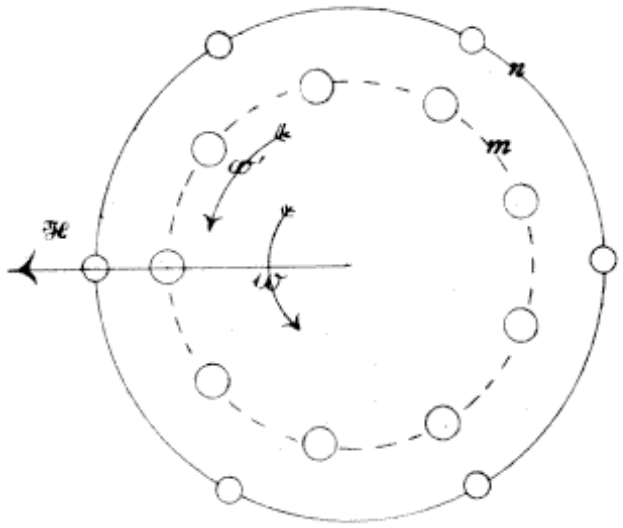


Fig. 221.

Les conducteurs de l'induit, coupés par ce champ, vont devenir le siège de courants polyphasés. Or nous avons vu, (T. I, p. 162 et suivantes) que tout courant placé dans un champ magnétique, subit de la part de celui-ci une action qui tend à l'entraîner à angle droit avec sa direction et celle du champ. En appliquant la règle des trois doigts par exemple, nous verrons que les barreaux de l'induit seront sollicités à faire tourner celui-ci dans le sens de la rotation du champ tournant.

On peut aussi envisager les choses autrement et c'est ce qui nous permettra d'établir la valeur du couple. Les courants polyphasés de l'induit donnent nécessairement naissance à un champ magnétique et ce dernier, actionné par le champ inducteur tournant, produit le couple moteur de l'appareil.

Supposons donc l'induit animé d'une vitesse angulaire ω' dirigée dans le même sens que ω et nécessairement moindre que celle-ci puisque, si elle lui était égale, il n'y aurait plus de courants induits et partant plus de couple.

La vitesse de l'induit par rapport au champ ou glissement de l'induit est $\omega' - \omega = -(\omega - \omega')$. *Remarquons qu'il est négatif.* Les phénomènes d'induction qui prennent naissance sont les mêmes que si, le champ étant fixe, l'induit se déplaçait avec la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vitesse qu'il a par rapport au champ, c'est-à-dire avec la vitesse $-(\omega - \omega')$.

Admettons pour un instant qu'il en soit ainsi, afin de simplifier les calculs et de ramener le système à un cas précédemment examiné. Traçons (fig. 222) la direction momentanément fixe du champ magnétique, dans lequel l'induit va se mouvoir en sens contraire de ω et ω' et avec la vitesse $\omega - \omega'$.

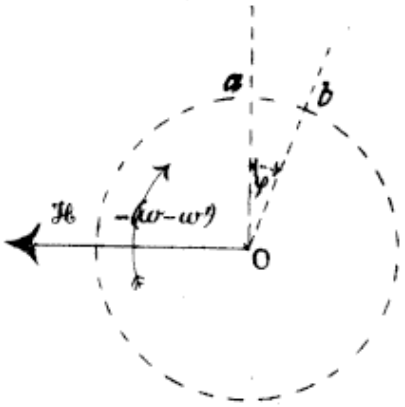


FIG. 222.

Dans ces conditions, nous savons que m forces électromotrices polyphasées, vont être développées dans les m barres de l'induit. En appelant l la longueur des barreaux de l'induit, b leur distance au centre de rotation, nous aurons un système de m forces électromotrices polyphasées.

$$e_1 = (\omega - \omega')\, b\, l\, \mathcal{H} \sin (\omega - \omega')\, t$$
$$e_2 = (\omega - \omega')\, b\, l\, \mathcal{H} \sin \{(\omega - \omega')\, t - 2\pi/n\}$$
. . . . . .

commençant leur oscillation lorsque les barreaux se trouvent sur la perpendiculaire Oa à la direction du champ et de fréquence $\frac{\omega - \omega'}{2\pi}$. En supposant les m conducteurs induits fermés sur autant de circuits extérieurs identiques et distincts, de résistance r et de coefficient de selfinduction $\mathcal{L}$, ils seront parcourus par un système de courants polyphasés, tous déphasés d'un même angle φ sur leurs forces électromotrices

$$i_1 = \frac{(\omega - \omega')\, b\, l\, \mathcal{H} \sin [(\omega - \omega')\, t - \varphi]}{r} \cos \varphi$$
$$i_2 = \frac{(\omega - \omega')\, b\, l\, \mathcal{H} \sin [(\omega - \omega')\, t - 2\pi/n - \varphi]}{r} \cos \varphi$$
. . . . . .

d'amplitude

$$I' = \frac{k_1 (\omega - \omega')\, \mathcal{H}}{r} \cos \varphi = \frac{k_1 (\omega - \omega')\, \mathcal{H}}{r^2 + (\omega - \omega')^2\, \mathcal{L}^2} \qquad (1)$$

avec la condition $\operatorname{tg} \varphi = (\omega - \omega')\, \mathcal{L}/r$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les courants polyphasés de l'induit commencent donc leur oscillation en Ob, φ radians plus loin que Oa, et, d'après ce que nous avons vu dans l'étude du champ tournant, ils vont donner lieu à un champ fixe dans l'espace, ayant la direction Ob et l'intensité

$$\mathcal{H}' = \frac{m\,\mathrm{K}\,\mathrm{I}'}{2} = \frac{m\,\mathrm{K}\,k_1\,\mathcal{H}\,(\omega - \omega')}{2\,r}\cos\varphi \qquad (2)$$

Les deux champs $\mathcal{H}$ et $\mathcal{H}'$ agissent mécaniquement l'un sur l'autre (fig. 223), de sorte que l'induit est sollicité, dans le sens de la rotation effective, par un couple mécanique proportionnel à $\mathcal{H}\,\mathcal{H}'\cos\varphi$. Nous aurons donc

$$\mathrm{C} = \frac{\mathrm{K}'\,\mathcal{H}^2\,(\omega - \omega')}{r}\cos^2\varphi = \frac{\mathrm{K}'\,\mathcal{H}^2\,\omega_1\cos^2\varphi}{r} \qquad (3)$$

en posant $\omega - \omega' = \omega_1$.

Eliminons $\cos^2\varphi$. Nous savons que

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \dfrac{\omega_1^2\,\mathfrak{L}^2}{r^2}}},$$

d'où

$$\cos^2\varphi = \frac{1}{1 + \dfrac{\omega_1^2\,\mathfrak{L}^2}{r^2}} \quad \text{et enfin,} \quad \mathrm{C} = \frac{\mathrm{K}'\mathcal{H}^2}{r}\,\frac{\omega_1}{1 + \dfrac{\omega_1^2\,\mathfrak{L}^2}{r^2}}. \qquad (4)$$

Telle est l'expression du couple.

Il est dû à l'action du champ inducteur sur le champ créé par les courants de circulation de l'induit. Nous remarquons que le second champ fait, avec le premier, l'angle constant pour un régime donné $\pi/2 + \varphi$.

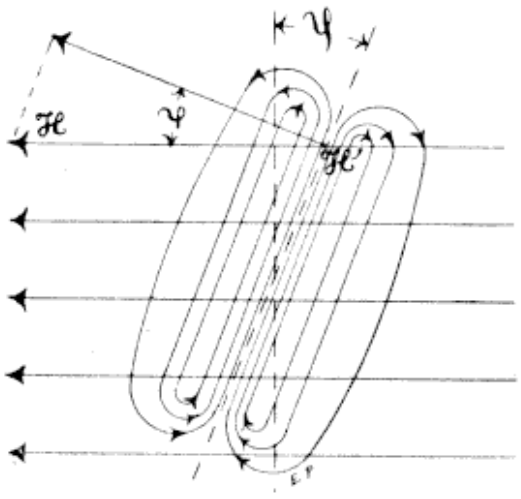


Fig. 223.

Donnons maintenant à tout l'ensemble la vitesse ω dans le sens positif, nous ne changeons rien aux phénomènes qui se passent, mais les champs inducteur et in-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duit tournent dans le sens positif avec la vitesse réelle ω et l'induit avec la vitesse $-(\omega-\omega')+\omega=\omega'$. C'est ce qui a effectivement lieu.

En résumé, *l'induit est traversé par le champ magnétique qu'envoient les inducteurs; ce champ tournant coupe les conducteurs de l'induit, ce qui engendre dans ceux-ci des courants polyphasés donnant eux-mêmes naissance à un champ, décalé sur le premier d'un angle plus grand qu'un angle droit, d'une quantité dépendant de la résistance et du coefficient de selfinduction des circuits induits. Actionné par le champ inducteur, ce champ tourne avec la vitesse ω et provoque la rotation de l'induit, de manière que ce dernier garde, par rapport au champ inducteur, la vitesse relative ω_1 nécessaire pour que le couple moteur ait une valeur suffisante pour vaincre le couple résistant.* La puissance mécanique développée est $P=\omega' C$.

On remarque que, dans la valeur du coefficient K' du couple, le nombre de barreaux ou de bobines du rotor intervient. Il y a donc avantage à multiplier ceux-ci; aussi adopte-t-on toujours des nombres d'encoches différents pour le stator et le rotor et plus grands pour ce dernier.

Discussion de la valeur du couple. — A intensité constante du champ tournant, le couple est donc uniquement fonction du glissement. La figure 152 traduit graphiquement cette fonction; elle montre que, *quand le glissement est négatif, ou la vitesse de rotation de l'induit inférieure à celle du champ tournant, le couple est moteur; il devient résistant quand le glissement est positif.*

Couple maximum. — La valeur du couple peut se mettre sous la forme

$$C = K'\mathcal{H}^2 \frac{\omega_1}{r+\frac{\omega_1^2\Omega^2}{r}} = K'\mathcal{H}^2 \frac{1}{\frac{r}{\omega_1}+\frac{\omega_1\Omega^2}{r}}.$$

Le minimum de la somme de deux nombres variables dont le produit est constant ayant lieu lorsque ces deux nombres sont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

égaux, le dénominateur sera minimum et, par suite, la valeur du couple sera maximum quand

$$r/\omega_1 = \omega_1 \mathfrak{L}^2/r \quad \text{ou} \quad r = \omega_1 \mathfrak{L}, \quad \omega_1 = r/\mathfrak{L}.$$

Alors $$C = K'\mathcal{H}^2/2\mathfrak{L}.$$

Remarquons que le maximum est constant quelle que soit la résistance r.

Démarrage. — Au démarrage $\omega' = 0$, $\omega_1 = \omega$, et le couple a pour valeur

$$\frac{K'\mathcal{H}^2}{r} \frac{\omega}{1 + \frac{\omega^2 \mathfrak{L}^2}{r^2}};$$

puis ω_1 décroissant, la valeur du couple se modifie. Si la valeur initiale du glissement est plus grande que $r/\mathfrak{L}$, nous partons d'un point au-delà du maximum et le couple croît; s'il est égal à $r/\mathfrak{L}$, le couple est maximum; enfin, s'il est plus petit, le maximum est dépassé et, au fur et à mesure que ω_1 décroît, le couple devient moindre. Dans le voisinage du synchronisme, si le couple résistant augmente, ω_1 s'amplifie ainsi que le couple moteur. Le moteur possède donc une marche stable, mais entre des limites resserrées de vitesse, comme le montre le diagramme partie OB (fig. 224).

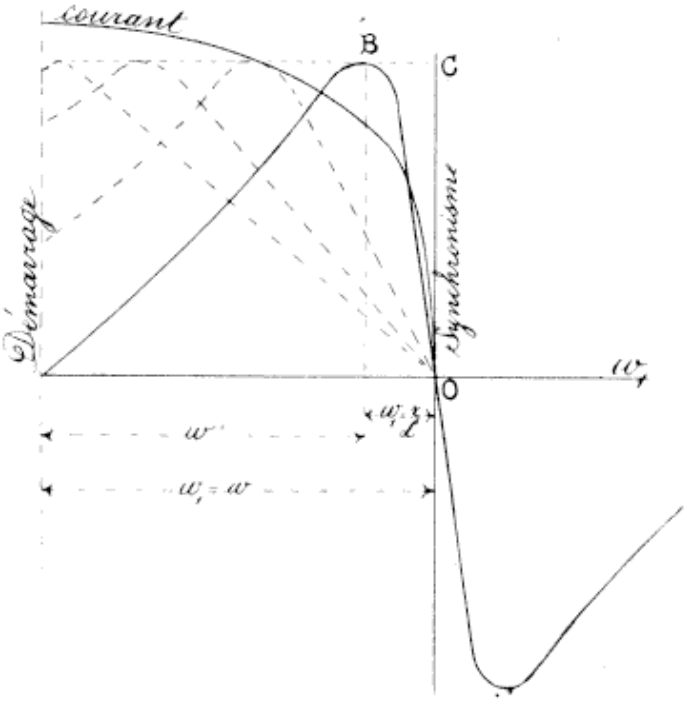


Fig. 224.

Si la résistance r des circuits du rotor varie, le couple varie. Sa valeur au démarrage augmente avec r.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour des valeurs $r < r_1 < r_2 < r_3$, la courbe se transforme suivant celles dessinées en pointillé. Tout en gardant le même maximum, elles s'écartent de l'axe des C et d'autant plus que r est plus grand.

Nous venons de voir que le couple moteur est maximum quand $\omega = r/\mathfrak{L}$. Si cette condition n'est pas naturellement satisfaite par construction, il est utile de la réaliser au démarrage. Pour cela, on montera en série avec les sections de l'induit (donc en étoile, si celui-ci est connecté en étoile, en polygone, s'il affecte cette dernière forme), par l'intermédiaire de bagues et de balais, les résistances voulues, lesquelles, après démarrage, seront supprimées soit à la main, soit automatiquement, *afin d'éviter les pertes par effet Joule auxquelles elles donnent lieu*. La présence de ces résistances empêche aussi les courants de prendre une valeur trop grande, équation (1).

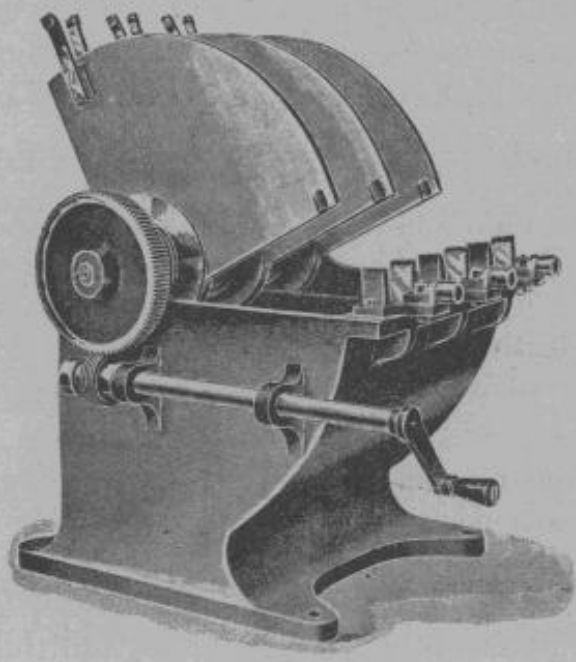


Fig. 225.

L'emploi de rhéostats à liquide (fig. 225) est ici tout indiqué, parce qu'ils permettent de graduer à volonté les résistances et d'obtenir ainsi, avec précision, les valeurs nécessaires.

Synchronisme. — Le couple devient nul pour un glissement nul, c'est-à-dire pour la vitesse de synchronisme. A ce moment $\omega' = \omega$ et l'induit tourne précisément à la vitesse angulaire de la force électromotrice. En d'autres termes, il ferait alors autant de tours que les courants inducteurs accomplissent de périodes par seconde. Son nombre de tours par seconde N serait donc égal à f, fréquence des courants d'alimentation. Toutefois, comme l'in-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duit ne serait plus le siège d'aucune force électromotrice, donc d'aucun courant, le couple serait nul comme nous venons de le dire. C'est un cas théorique. Retenons toutefois, qu'abstraction faite du glissement, un barreau quelconque de l'induit suit exactement le champ tournant développé. En d'autres termes, il tourne avec la vitesse angulaire des courants polyphasés de l'inducteur.

Dépassement du synchronisme. — Pour des valeurs égales et contraires du glissement, le couple a des valeurs égales et contraires également, ce qui veut dire que, dès que l'on dépasse le synchronisme ($\omega' > \omega$), ou encore dès que le glissement de l'induit devient positif, le moteur se transforme en génératrice. Nous trouvons là un moyen nouveau pour produire des courants polyphasés de fréquence $\frac{\omega' - \omega}{2\pi}$, par l'intermédiaire d'un champ tournant à la vitesse ω, dans lequel se meut un induit à la vitesse $\omega' > \omega$.

Induit en cage d'écureuil. — On constitue très simplement et solidement l'induit des petits moteurs, au moyen de barreaux parallèles, métalliquement réunis à leurs extrémités par des anneaux. La forme rappelle exactement une *cage d'écureuil;* d'où son nom.

Moteur Boucherot. — M. Boucherot [1] est arrivé à supprimer complètement les résistances additionnelles dans tous les cas, en composant l'inducteur de deux systèmes semblables réunis soit en quantité, soit en tension, dont l'un est mobile et peut être déplacé d'un certain angle autour de l'axe de rotation commun. L'induit est constitué par deux cages d'écureuil semblables, dont les extrémités en regard sont réunies par une frette en métal de grande résistivité (fer, maillechort ou ferro-nickel) F, F, (fig. 226).

Nous avons trouvé que le couple est maximum quand $\omega_1 \mathfrak{L} = r$.

---

[1] Électricien, nos 385, 386 et 387 de 1898.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme ω_1 possède sa plus grande valeur au démarrage, pour que le couple moteur soit maximum à ce moment, il faut que r soit renforcé d'où, comme nous l'avons vu, l'insertion de résistances en série avec l'induit.

Dans le moteur Boucherot, on déplace le second inducteur de manière que ses enroulements aient tourné, par rapport aux enroulements de l'autre, de l'espace angulaire correspondant à une demi-période. Dans le cas des inducteurs bipolaires envisagés jusqu'ici, la partie mobile de l'inducteur doit tourner de 180°. D'une manière générale, on déplace le stator mobile d'un angle $\alpha = 360°/2p$. Dans ces conditions, les forces électromotrices engendrées dans les deux moitiés de l'induit sont en opposition (flèches pleines, fig. 226) et les courants se réunissent en quantité à travers la frette résistante, qui est dimensionnée pour satisfaire à l'équation ci-dessus. Le moteur démarre et on réduit alors progressivement l'angle des deux systèmes, jusqu'à ce que les deux moitiés de l'inducteur soient en concordance. Il ne passe plus alors aucun courant dans la frette (flèches pointillées et flèches pleines de gauche).

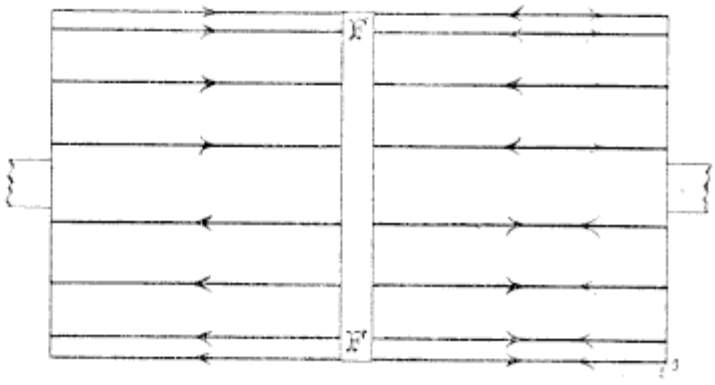


FIG. 226.

Quand le moteur est inaccessible, M. Boucherot compose l'induit de deux cages concentriques, l'une extérieure de grande résistance et faible coefficient de selfinduction, l'autre de faible résistance et grand coefficient de selfinduction. Au démarrage, celle-ci ne joue pour ainsi dire aucun rôle, vu le grand glissement existant, et le couple est considérable à cause de la grande résistance de la première cage. En marche normale, les deux cages contribuent au couple chacune pour sa part.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Moteurs multipolaires. — Ce que nous venons de dire s'applique à des inducteurs bipolaires, c'est-à-dire armés d'une seule série de conducteurs ou bobines traversés par un système de courants polyphasés. Dans ces conditions, l'induit tourne avec une vitesse $\omega' = \omega - \omega_1$, ω_1 étant le glissement, lequel est en général très faible.

On aura donc très sensiblement $\omega' = \omega$ ou $2\pi N = 2\pi f$ et $N = f$: *abstraction faite du glissement, l'induit effectue autant de tours par seconde que les courants inducteurs comportent d'oscillations pendant le même temps.*

Si cette vitesse est trop grande, ou si le moteur est de grande puissance, on recourt aux enroulements multipolaires. Soient $2p$ le nombre de pôles. La circonférence de l'inducteur est divisée en $p\,n$ circuits ou bobines numérotés (fig. 227) : 1, 2, 3, ... n; 1, 2, 3, ... n; 1, 2, 3, ... n ... ; tous les circuits de même numéro sont réunis soit en tension, soit en dérivation, et on envoie n courants polyphasés dans les enroulements complexes ainsi formés. L'induit présente, de son côté, une disposition semblable, ou est simplement établi en cage d'écureuil.

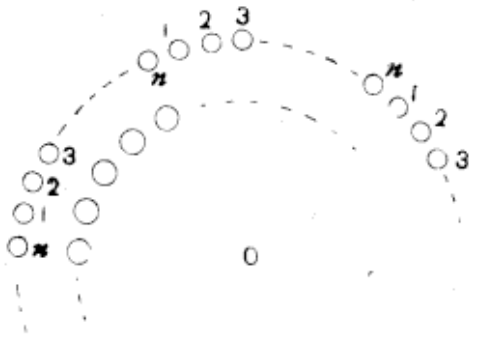


Fig. 227.

Dans ces conditions, on n'a plus affaire à un champ unique, mais bien à p champs radiaux se déplaçant avec la vitesse angulaire ω et engendrant dans les barres voisines du rotor, p champs induits réagissant avec les premiers. Ces champs induits parcourent le $1/p^e$ de la circonférence pour chaque oscillation complète des courants inducteurs. Les barreaux de l'induit suivant exactement les champs induits (à part le glissement), l'induit lui-même ne fera plus $1/p^e$ de tour par oscillation ou f/p tours par seconde au lieu de f.

On remarquera l'analogie de fonctionnement avec le moteur en dérivation alimenté sous force électromotrice constante, partie AB (fig. 98, p. 135).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Bobinage des moteurs asynchrones. — INDUCTEUR. — Le bobinage de l'inducteur peut s'effectuer par sections séparées, soit en anneau, soit en tambour. Les connexions de ces sections lui font affecter le schéma de l'étoile ou du polygone.

INDUIT. — On adopte toujours la cage d'écureuil pour le rotor des petits moteurs jusque 5 à 6 chevaux.

Leurs barres peuvent être réunies de chaque côté par une bague continue.

On peut également fendre toutes les extrémités des barres sur une partie de leur longueur et introduire dans les fentes successives une lame de cuivre large et mince, courbée suivant une circonférence concentrique à la machine. Toutes les extrémités sont ensuite soudées à la lame, soit individuellement, soit simultanément, par immersion dans un bain de soudure.

Cependant on adopte aussi une liaison discontinue, qui donne un plus grand couple au démarrage. On divise les barres en autant de groupes qu'il y a de pôles et l'on réunit les extrémités d'un groupe à celles d'un groupe voisin d'un côté de la machine et à celles de l'autre groupe voisin de l'autre côté.

Les grands induits sont généralement bobinés comme leur inducteur ; les extrémités des bobines aboutissent à des bagues isolées, sur lesquelles appuient des balais en rapport avec les résistances de démarrage, qu'on supprime dès que le régime est atteint. Cette dernière manœuvre est souvent assurée automatiquement. Les résistances peuvent être tournantes, avec bouton de mise en court-circuit dans l'axe.

Caractères spéciaux et cas d'emploi des deux systèmes. — 1° MOTEURS EN CAGE D'ÉCUREUIL OU EN COURT-CIRCUIT. — Ces moteurs possèdent un faible couple de démarrage. La variation de vitesse, entre les marches à vide et en charge, oscille de 5 à 7 %, suivant leur puissance ; le glissement va jusqu'à 13 %.

Pour démarrer en charge, ces moteurs absorbent un courant atteignant 3 à 4 fois le courant normal de pleine charge, ce qui produit des perturbations dans le réseau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On peut éviter cet inconvénient, en leur appliquant progressivement la tension au moyen d'un autotransformateur (voir plus loin la description de cet appareil), ou en montant des résistances de démarrage en série avec le stator ou mieux, en disposant les enroulements du stator en étoile au démarrage, puis en polygone, ce qui réduit au 1/3 le courant absorbé ; mais alors l'emploi de ces moteurs, si séduisants par leur simplicité de construction et leur facilité de conduite, perd de sa valeur.

On les utilise donc principalement pour des applications dans lesquelles le démarrage à vide ou à faible charge est possible. Ils sont notamment employés avantageusement pour la commande individuelle, jusqu'à 5 chevaux environ, des machines-outils à puissance constante à toutes les vitesses, dans lesquelles le couple est inversement proportionnel à la vitesse, tels les tours, alésoirs, fraiseuses et foreuses.

On rencontre cependant des moteurs de cette espèce très puissants, dépassant 200 chx, dans les exploitations minières particulièrement. Mais des précautions spéciales doivent alors être prises au démarrage, comme il est dit plus haut.

2° Moteurs a bagues ou a rotor bobiné. — Ces moteurs possèdent un couple de démarrage élevé, variant entre 2 et 2,5 fois le couple normal, et la valeur du glissement atteint 3 à 5 %. Ils démarrent sous charge en absorbant un courant égal à 1,5 à 2 fois le courant normal.

Ils seront donc généralement préférés aux moteurs en cage d'écureuil, particulièrement pour la commande individuelle des machines-outils d'une puissance supérieure à 5 chevaux, ou pour la conduite par groupe, ou pour celle d'une génératrice à courant continu dans les centrales, etc.

Dans ces derniers cas, en raison de leur marche continue, on les munit avantageusement d'un dispositif de mise en court-circuit des bagues et de relevage des balais, afin de réduire l'usure des contacts frottants.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Rendements. — Moteur triphasé protégé.

Sans bagues $f = 50$

Puissance en chx	Voltages	Rendement	Facteur de puissance	Glissement en %	Vitesse à vide	Poids du moteur avec poulie
0,5	250	0,70	0,78	13	1500	45
1	250	0,72	0,80	13	1500	50
3	250	0,81	0,9	11	1500	158
4	500	0,80	0,87			
11	250	0,83	0,88	9	1000	327
10	500	0,82	0,86			
23	250	0,85	0,91	7,5	1500	404
21	500	0,84	0,90			
53	250	0,87	0,92	7	1000	888
50	500	0,865	0,91			

Avec bagues $f = 50$

Puissance en marche		Voltages	Rendement	Facteur de puissance en marche		Glissement	Vitesse à vide	Poids du moteur avec poulie
continue	discontinue			continue	discontinue			
1,5	2	250	0,71	0,77	0,75		1000	90
1	1,5	500	0,69	0,74	0,72			
11	15	250	0,86	0,86	0,84	5	1000	330
10	14	500	0,85	0,85	0,83			
20	28	250	0,85	0,84	0,82	6	600	650
19	26	500	0,84	0,82	0,80			
50	70	250	0,895	0,88	0,86	4	750	1000
48	67	500	0,89	0,87	0,85			
100	140	250	0,91	0,89	0,87	3,5	600	2300
96	134	500	0,905	0,88	0,86			
150	210	250	0,93	0,90	0,81	3,25	1000	2300
145	202	500	0,925	0,89	0,87			

Moteur asynchrone monophasé. — L'induit est le même que dans les appareils que nous venons d'étudier, mais le champ inducteur, alimenté par un courant alternatif, est lui-même alternatif et de direction fixe dans l'espace.

On peut facilement ramener sa théorie à celle du moteur asyn-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chrone polyphasé, en se basant sur le théorème suivant, dû à M. Leblanc : *Un champ alternatif* $\mathcal{H} \sin \omega t$ *peut être remplacé par deux champs d'intensité constante* $\mathcal{H}/2$, *tournant en sens inverse l'un de l'autre avec la vitesse de pulsation* ω *du champ fixe et symétriquement situés par rapport à celui-ci.* En d'autres termes, le champ fixe se trouve constamment sur la bissectrice de la direction moyenne des deux premiers.

Soient, en effet (fig. 228), un champ de direction fixe $\mathcal{H} \sin \omega t$ et deux champs $\mathcal{H}/2$ tournant en sens inverse, à la vitesse de ω radians par seconde et passant simultanément par l'axe des X. Comptons les angles à partir de l'axe des Y positifs. A l'intant t, les deux champs tournants font respectivement les angles ωt et $-(\pi + \omega t)$ avec cet axe. Projetons leurs intensités sur l'axe des Y ; nous obtenons

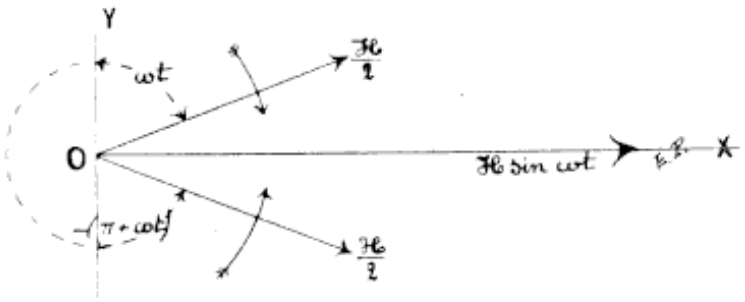


FIG. 228.

$$\mathcal{H}/2 \cos \omega t + \mathcal{H}/2 \cos -(\pi + \omega t) = 0$$

tandis que les projections sur l'axe des X

$$\mathcal{H}/2 \sin \omega t + \mathcal{H}/2 \sin -(\pi + \omega t) = \mathcal{H}/2 \sin \omega t + \mathcal{H}/2 \sin \omega t = \mathcal{H} \sin \omega t$$

ce qui démontre la propriété énoncée. La composition vectorielle nous ferait d'ailleurs arriver immédiatement à ce résultat.

Si nous supposons maintenant qu'un induit de moteur asynchrone se meut avec la vitesse ω' dans un champ alternatif passant par son axe, nous pourrons remplacer le champ inducteur par les deux champs tournants qui lui sont équivalents, et appliquer successivement à ces deux champs, la formule précédemment trouvée.

Le glissement de l'induit par rapport au premier champ tournant avec la vitesse ω sera $\omega' - \omega = -(\omega - \omega')$ et $\omega' + \omega$ par rap-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

port au second qui tourne à la vitesse $-\omega$. Le glissement étant négatif dans le premier cas, donne lieu au couple moteur

$$K\frac{\mathcal{H}^2}{4}\frac{\omega-\omega'}{r\left[1+\frac{(\omega-\omega')^2\mathcal{L}^2}{r^2}\right]},$$

tandis que sa valeur positive dans le second cas correspond à un couple résistant

$$K\frac{\mathcal{H}^2}{4r}\frac{\omega+\omega'}{\left[1+\frac{(\omega+\omega')^2\mathcal{L}^2}{r^2}\right]},$$

$\mathcal{L}$ et r étant, comme précédemment, le coefficient de selfinduction et la résistance de chacune des sections de l'induit.

En somme, l'induit développera le couple moteur

$$C=\frac{K\mathcal{H}^2}{4r}\left[\frac{\omega-\omega'}{1+\frac{(\omega-\omega')^2\mathcal{L}^2}{r^2}}-\frac{\omega+\omega'}{1+\frac{(\omega+\omega')^2\mathcal{L}^2}{r^2}}\right]$$

et la puissance mécanique $P=\omega' C$.

Au démarrage $\omega'=0$ et $C=0$. Le couple étant nul, le moteur ne démarrera pas de lui-même. Traçons son diagramme (fig. 229). Partant de la valeur nulle de démarrage, le couple croît, passe par un maximum, décroît et repasse par zéro pour la valeur

$$\omega'=\sqrt{\omega^2-\frac{r^2}{\mathcal{L}^2}}$$

en général voisine du synchronisme. Au-delà de ce point, sa valeur devient négative. Entre ce zéro et le maximum positif, la stabilité de marche est assurée, car à une augmentation du couple résistant qui provoque un ralentissement de l'induit, correspond une augmentation du couple moteur.

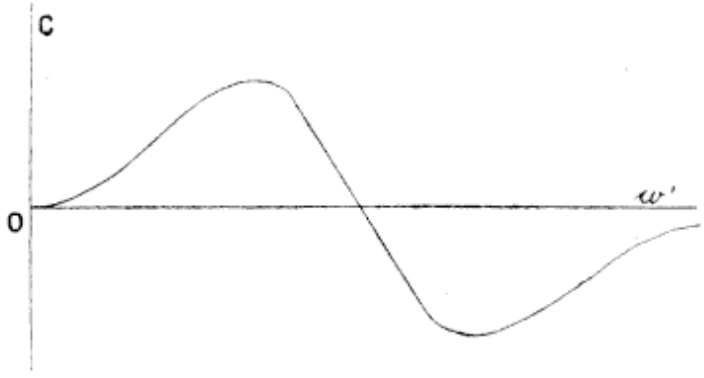


FIG. 229.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Démarrage des moteurs monophasés. — Puisque le couple est nul au démarrage, il faudra user d'expédients analogues à ceux requis par les moteurs synchrones, pour les mettre en marche.

Un dispositif souvent employé, consiste à munir l'inducteur du moteur d'un enroulement auxiliaire, disposé généralement entre les bobines du premier, et dans lequel on envoie à la mise en marche, un courant fortement déphasé par rapport aux courants d'alimentation. On provoque cette différence de phase en donnant aux deux circuits inducteurs des facteurs très différents : par exemple l'un présente une grande résistance et un faible coefficient de selfinduction, l'autre une faible résistance et un grand coefficient de selfinduction. On obtient cette différence par construction, dans le système Heyland, en répartissant l'enroulement de travail dans de nombreuses encoches ouvertes, tandis que le circuit de démarrage ne comprend qu'une seule encoche par pôle. Ces encoches sont fermées, c'est-à-dire que les conducteurs sont entièrement entourés de fer, ce qui assure au circuit un grand coefficient de selfinduction.

On peut aussi donner au circuit de démarrage une certaine capacité en y insérant un condensateur, et on le dérive sur le circuit de travail.

Quel que soit le dispositif adopté, on arrive à faire traverser les enroulements inducteurs par deux courants sensiblement biphasés, qui donnent lieu à un champ tournant faisant démarrer l'induit, comme dans le cas du moteur asynchrone. Une fois le synchronisme atteint, on supprime le courant dans l'enroulement auxiliaire.

Certaines précautions sont cependant nécessaires. Tandis qu'un moteur triphasé est susceptible de démarrer à pleine charge et même à double charge, le moteur monophasé avec phase auxiliaire ne peut démarrer que sous une charge inférieure à la charge normale, et égale au plus aux 2/3 de cette valeur.

Pour ces raisons, on munit souvent les moteurs monophasés d'une poulie fixe et d'une poulie folle, afin que le moteur n'ait à vaincre au démarrage qu'une faible résistance et, quand le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moteur est arrivé à sa vitesse de régime, on coupe le circuit de la phase auxiliaire, et on pousse la courroie sur la poulie fixe. Souvent aussi, au lieu d'une poulie folle, on emploie un accouplement par friction qui permet de faire démarrer le moteur à vide puis, quand il a atteint sa vitesse, de l'embrayer soit à la main, soit automatiquement

Rendements (1). — Moteurs monophasés Heyland. Type protégé. Sans bagues, faibles périodicités $f = 40, 50, 60$.

Puissance	Tension en volts	Rendement	Facteur de puissance	Vitesse	Poids du moteur avec poulie
0,5	250	0,52	0,85	1075	
0,75	500	0,55	0,85	1320	50
0,75		0,58	0,85	1650	
2,75		0,67	0,82	2200	
3	id.	0,68	0,82	2520	90
3,25		0,69	0,82	2800	
9		0,75	0,85	1110	
8	id.	0,74	0,85	915	330
9,5		0,75	0,85	1125	

Avec bagues $f = 40, 50, 60$.

0,5	250	0,5		1120	
0,5	500	0,55	0,7	1400	50
0,5		0,58		1700	
5,25		0,77	0,79	1130	
6	id.	0,78	0,79	1410	190
6,7		0,79	0,79	1710	
15		0,80	0,81	1130	
13,55	id.	0,79	0,80	950	410
15		0,80	0,80	1140	

Pour des périodicités plus fortes, 80, 90, 100, le rendement s'améliore.

D'autre part, si l'on compare les rendements ci-dessus avec ceux indiqués pour les moteurs triphasés, on voit que les moteurs monophasés leur sont nettement inférieurs.

(1) Catalogues firme citée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 3. — Alternomoteurs à collecteur [1].

Moteur monophasé. — Reprenons (fig. 230) un induit bipolaire à anneau, placé dans un champ magnétique que nous supposons développé par un enroulement monté en série avec l'induit.

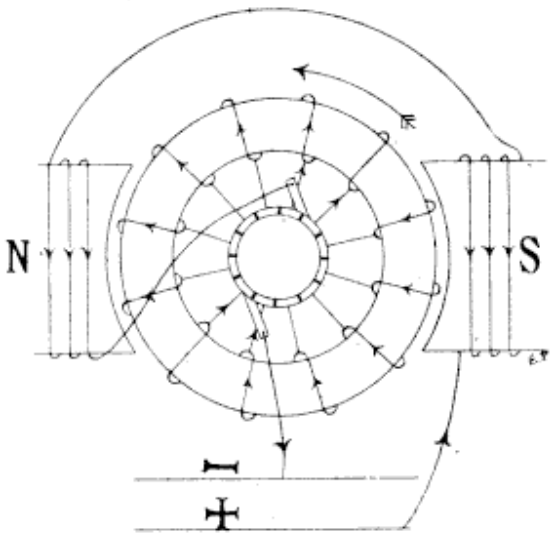


FIG. 230.

Quand nous envoyons dans le système un courant de même sens que celui qu'il développait comme générateur, la rotation s'effectue en sens inverse comme moteur (p. 119), sous l'effet de la force électromagnétique sollicitant les diverses spires embrassant un flux magnétiqne inducteur variable avec leur position.

Remarquons que le courant de circulation dans l'induit développe un flux dit de réaction d'induit, dirigé suivant la ligne des balais (voir aussi fig. 48). *Ce flux est fixe dans l'espace, dirigé suivant la ligne des balais ; l'induit le traverse.*

L'excitation étant en série, nous pouvons renverser le courant sans que le sens du couple moteur change, puisque le flux et le courant sont simultanément renversés partout. Il en résulte qu'il est possible d'alimenter ce moteur avec du courant alternatif : le couple sera simplement devenu périodiquement variable.

En principe, un tel moteur fonctionne comme un moteur continu série, c'est-à-dire présente, au démarrage, un couple

---

[1] JACQUIN, *Les alternateurs à collecteur, monophasés et polyphasés*, Gauthier-Villars, Paris 1907. JANET, *Leçons d'électrotechnique générale*, T. III, 2e édition, p. 332, Gauthier-Villars, Paris 1908.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

maximum, qui va en décroissant au fur et à mesure que la vitesse augmente. Mais des différences notables existent entre eux. D'abord la selfinduction des inducteurs et de l'induit déphase le courant sur la force électromotrice appliquée, de sorte que le courant devra être majoré pour dépenser une même énergie utile dans le moteur. A la vitesse normale, le facteur de puissance cos φ, est généralement inférieur à l'unité de 5 à 15 %, selon la classe des moteurs considérés.

Ensuite il sera nécessaire, pour éviter un développement exagéré de courants de Foucault, de feuilleter entièrement le fer de l'inducteur aussi bien que celui de l'induit. Néanmoins, les pertes dans le fer seront bien plus grandes qu'avec le courant continu, puisqu'ici les pertes hystérésiques s'étendront à toute la masse des inducteurs, en raison de la nature alternative du flux magnétique d'ailleurs plus intense, par suite du renforcement du courant ; en outre, à l'hystérèse tournante du noyau induit, viendra s'ajouter l'hystérèse alternative due à la périodicité des champs inducteur et de réaction de l'induit. Pour ce qui concerne les pertes dans le cuivre, elles seront légèrement plus grandes vu le renforcement de l'intensité, et celles dues à la commutation seront plus importantes qu'en courant continu.

On diminuera toutes ces pertes en réduisant la fréquence à 25 périodes, mais quoi que l'on fasse, le rendement sera quand même inférieur à celui du moteur à courant continu. Le corollaire est que tous les moteurs à courant alternatif, ont une puissance spécifique inférieure de 20 à 25 % à celle des moteurs à courant continu.

Par contre on peut, en alternatif, effectuer la mise en marche et les changements de vitesse sans perdre aucune énergie dans des résistances, comme avec le courant continu. Il suffit d'alimenter le moteur par le secondaire d'un transformateur de force électromotrice variable. Et, si l'on considère le rendement moyen, correspondant au parcours de toute une ligne de chemin de fer, on peut arriver à un chiffre égal et même supérieur avec l'alternatif qu'avec le continu, si le service comporte de nombreux arrêts. Cet avantage, joint à celui de ne nécessiter qu'un fil de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ligne, que l'on peut porter à un voltage bien plus élevé qu'en courant continu, donne à l'emploi des moteurs monophasés un réel intérêt, et probablement un grand avenir, pour la traction des lignes de chemins de fer. C'est pourquoi nous nous en occuperons d'une manière un peu détaillée.

La commutation apporte des difficultés telles, qu'elle a mis pendant longtemps un obstacle absolu au développement de ce genre de moteurs. A la force électromotrice de selfinduction, en effet, s'ajoute ici une force électromotrice développée par la rotation des bobines commutées dans le champ de réaction très important de l'induit, et une autre force électromotrice statique due à ce que les bobines mises en court-circuit embrassent un flux inducteur variable, d'où échauffement excessif du collecteur et production trop grande d'étincelles.

On réduira les troubles de commutation dus à ces causes en mettant beaucoup de lames au collecteur, de manière à avoir très peu de spires sous les balais, une seule si possible par bobine, et en rendant le circuit formé par la bobine commutée et les deux lames voisines suffisamment résistant, par l'emploi de balais en charbon de haute résistivité et l'intercalation de résistances spéciales entre les touches et les bobines. Par exemple, Lamme reporte le collecteur de l'autre côté de l'induit et atteint les touches au moyen de fil de maillechort logé au fond des encoches du rotor. En outre, la tension maximum appliquée ne dépasse guère 300 volts.

On trouve en général avantage, dans les alternateurs à collecteur, à employer un inducteur à entrefer constant, plutôt qu'un inducteur pourvu de pôles saillants. Leur forme extérieure se rapproche donc plutôt de celle des moteurs asynchrones étudiés précédemment, que de celle des moteurs à courant continu. En particulier le stator sera identique à celui d'un moteur asynchrone à courant alternatif simple et il produira, dans le cas d'un moteur bipolaire, un champ alternatif de direction constante.

Les divers genres d'alternomoteurs à collecteur seront classés suivant le mode de liaison existant entre l'inducteur et l'induit.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si le même courant alternatif traverse ces deux organes, mis en série l'un avec l'autre, on a les alternomoteurs série à collecteur; si, au contraire, les balais de l'induit sont mis en court-circuit et plus ou moins inclinés sur la ligne neutre, on a les moteurs à répulsion ; enfin, la combinaison de ces deux systèmes donne les moteurs mixtes, dont le prototype est celui de M. M. Latour.

Moteur série à collecteur. — Soit un inducteur bipolaire (fig. 231) et un induit bobiné en tambour, présentant n conducteurs périphériques formant $n/2$ cadres, dont $n/4$ sont en série dans chacune des moitiés de l'enroulement dérivées entre les balais.

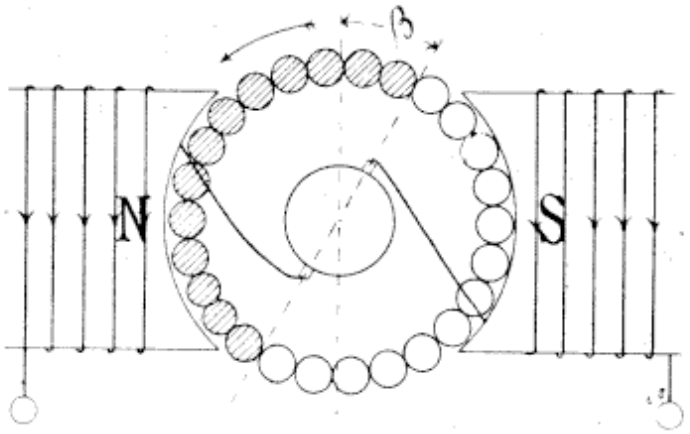


FIG. 231.

L'inducteur est mis en série avec l'induit, dont les balais font un angle β avec la ligne neutre et sont calés en arrière par rapport au sens de rotation, pour la même raison qu'en courant continu.

Nous trouvons donc, entre les deux bornes de la machine, deux enroulements : inducteur et induit, présentant les coefficients de selfinduction respectifs $\mathfrak{L}_1$ et $\mathfrak{L}_2$ et un coefficient d'induction mutuelle, dont la valeur dépendra de la position des balais par rapport à la ligne neutre. Appelons m le coefficient d'induction mutuelle, entre l'inducteur et un cadre placé suivant la ligne neutre ; dans la position rectangulaire ce coefficient est nul ; il varie suivant la loi sinusoïdale entre ces deux positions extrêmes.

Si maintenant les deux balais sont calés suivant la ligne polaire, l'induit présente au flux inducteur deux enroulements dérivés, dont les cadres successifs, faisant entre eux des angles égaux, offrent toujours la même face au flux. Le coefficient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'induction mutuelle de chaque enroulement est maximum et égal à $n/4$ fois le coefficient moyen d'un cadre. Or celui-ci, moyenne des ordonnées d'une demi-période sinusoïdale, vaut $2m/\pi$ (T. I, p. 206) et ainsi le coefficient d'induction mutuelle, lorsque les balais sont placés suivant la ligne polaire est

$$\mathfrak{M} = n/4 \cdot 2\,m/\pi = n\,m/2\,\pi.$$

Si les balais sont calés suivant la ligne neutre, chacun des demi-enroulements présente au flux $n/8$ cadres par une face, $n/8$ cadres par la face opposée, de sorte que, deux forces électromotrices égales et opposées tendant à être développées dans les enroulements, ceux-ci ne sont le siège d'aucun courant quand le flux inducteur varie; en d'autres termes, le coefficient d'induction mutuelle devient nul.

Entre ces deux positions extrêmes, le coefficient variera suivant la loi sinusoïdale et, puisque quand le décalage est nul le coefficient est nul, il vaudra $\mathfrak{M} \sin \beta$ dans toutes les positions intermédiaires.

Le coefficient de selfinduction rencontré entre les bornes de la machine est conséquemment, que l'induit tourne ou non,

$$\mathfrak{L}' = \mathfrak{L}_1 + \mathfrak{L}_2 \pm 2\,\mathfrak{M} \sin \beta,$$

le signe du dernier terme dépendant du balai choisi comme entrée du courant dans l'induit.

Cherchons maintenant quelle sera la valeur de la force électromotrice développée dans l'induit par sa rotation. Si i est le courant inducteur, le flux maximum traversant l'induit vaudra $\mathfrak{M}\,i$. A la vitesse angulaire mécanique ω_1 de l'induit, la force électromotrice maximum induite (T. I, p. 272) $E = \mathfrak{M}\,i\,\omega_1$.

Nous savons que, de part et d'autre des balais calés sur la ligne neutre, nous trouvons toute l'échelle des potentiels, depuis la valeur maximum jusqu'au zéro (diagramme de Mordey, p. 36). Si nous plaçons les balais suivant la ligne polaire, ils se trouvent au même potentiel et, dès lors, par rapport au circuit extérieur, l'induit n'émet plus aucune force électromotrice. Entre ces deux positions nous aurons comme valeur de la différence de potentiel aux balais $E \cos \beta = \mathfrak{M}\,i\,\omega_1 \cos \beta$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Soient u et i les valeurs instantanées de la tension aux bornes de la machine et du courant, R la résistance totale. Ecrivons qu'à chaque instant la force électromotrice appliquée vaut $I \Sigma R - \Sigma E$ (T. I, p. 90)

$$u = R\, i + \mathfrak{L}' \frac{di}{dt} + E \cos \beta$$

puisque la force électromotrice induite est contre-électromotrice, ou

$$u = (R + \mathfrak{M}\, \omega_1 \cos \beta)\, i + \mathfrak{L}' \frac{di}{dt}. \qquad (1)$$

Si l'induit ne tournait pas, le terme en ω_1 disparaîtrait et l'on voit que, lorsque l'induit tourne, tout se passe comme si la résistance totale de la machine était augmentée d'une quantité proportionnelle à la vitesse de rotation, la selfinduction n'étant d'ailleurs pas modifiée.

L'équation différentielle (1) est de la même forme que celle trouvée dans l'étude de la propagation du courant alternatif dans un circuit pourvu de réactance (T. I, p. 277).

Résolue elle donne

$$i_{eff} = \frac{u_{eff}}{\sqrt{(R + M\, \omega_1 \cos \beta)^2 + \mathfrak{L}'^2\, \omega^2}}$$

Remarquons que la force contre-électromotrice $\mathfrak{M}\, i\, \omega_1 \cos \beta$ se trouve, comme sa forme l'indique, en phase avec le courant. De même qu'en courant continu, la puissance utile sera égale au produit de la force contre-électromotrice par le courant. Elle a donc pour valeur

$$p_u = \mathfrak{M}\, \omega_1 \cos \beta\, i^2_{eff} = \frac{\mathfrak{M}\, \omega_1 \cos \beta\, u^2_{eff}}{(R + \mathfrak{M}\, \omega_1 \cos \beta)^2 + \mathfrak{L}'^2\, \omega^2}$$

Le couple vaut

$$C = \mathfrak{M} \cos \beta \frac{u^2_{eff}}{(R + \mathfrak{M}\, \omega_1 \cos \beta)^2 + \mathfrak{L}'^2\, \omega^2}$$

expression montrant qu'il ne devient nul que pour une vitesse angulaire mécanique infinie. Il y a donc danger d'emballement ici comme en courant continu ; d'autre part, le couple est maximum au démarrage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin le facteur de puissance

$$\cos\varphi = \frac{p_u + \mathrm{R}\, i^2_{eff}}{u_{eff}\, i_{eff}} = \frac{\mathrm{R} + \omega_1\, \partial\mathfrak{M} \cos\beta}{\sqrt{(\mathrm{R} + \omega_1\, \partial\mathfrak{M} \cos\beta)^2 + \mathfrak{L}'^2\, \omega^2}}.$$

Ces équations peuvent se discuter géométriquement d'une manière assez simple (1).

Moteur série compensé. — $\omega = 2\pi f$ étant toujours grand puisque f vaut 25 au minimum, et la selfinduction $\mathfrak{L}'$ étant elle-même grande aussi, le terme $\mathfrak{L}'^2\,\omega^2$ du dénominateur de p_u est très grand. La selfinduction du moteur vient donc affecter fâcheusement la puissance spécifique et il y a lieu de la réduire le plus possible.

Or, le flux de réaction de l'induit étant dirigé suivant la ligne des balais, présente, dans la direction de la ligne neutre, une composante qu'il est facile d'annuler complètement, en disposant, dans des trous ou encoches ménagés dans l'inducteur, un enroulement dont le plan des spires est perpendiculaire à la ligne neutre et faisant parcourir cet enroulement par un courant convenable.

Si ce bobinage est placé en série avec l'induit, et naturellement raccordé de telle manière que le courant circule en sens inverse, c'est-à-dire soit déphasé de π par rapport à celui-ci, on a affaire au *moteur série compensé*.

S'il est fermé sur lui-même, l'annulation peut encore être obtenue, mais par un autre mécanisme : l'enroulement fonctionne alors comme le secondaire fermé d'un transformateur. Le courant y est déphasé d'environ 180° sur le premier et détruit presque complètement l'effet magnétique de celui-ci, si les dispositions sont bien prises.

Moteur à répulsion.— Le courant alternatif est envoyé seulement dans les inducteurs ; les balais sont fermés en court-circuit sur eux-mêmes ; plusieurs cas peuvent se présenter, suivant la position qu'ils occupent.

(1) Voir JANET. T. III, p. 335.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

S'ils sont calés sur la ligne neutre, le coefficient d'induction mutuelle entre l'inducteur et l'induit étant nul, aucun courant ne prend naissance quand le magnétisme des inducteurs varie et, par conséquent, aucun couple moteur ne peut exister.

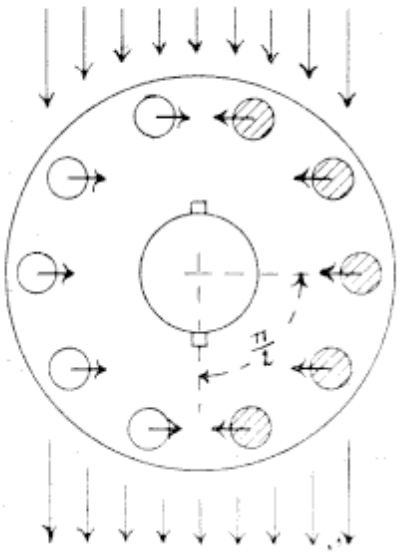


FIG. 232.

Si les balais sont calés suivant la ligne polaire, le coefficient d'induction mutuelle est maximum ; un courant intense est développé par induction dans l'induit et il est facile de voir, en examinant l'effet inducteur pour tous les cadres, que ce courant y est concordant et que la distribution instantanée pourrait, par exemple, être indiquée par la figure 232 (flux augmentant). Mais les conducteurs induits, subdivisés en deux moitiés égales parcourues par des courants de sens inverses, et plongés dans le même champ magnétique, sont soumis à des forces se détruisant deux à deux, indiquées par les flèches (application de la règle des trois doigts par exemple), de sorte que le couple est nul. On peut encore dire que le champ magnétique développé par l'induit se trouvant dans la direction du flux inducteur, aucune réaction mécanique n'est possible.

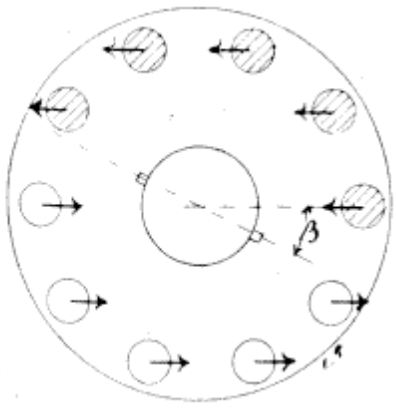


FIG. 233.

Au contraire, dans toute position intermédiaire, un couple naît (fig. 233). On voit, d'après la direction des flèches, que le couple est toujours dirigé en sens inverse de l'angle de décalage des balais par rapport à la ligne neutre, les balais se trouvant toujours décalés en arrière par rapport au mouvement.

Pour qu'il y ait couple moteur, les balais doivent donc être décalés d'un angle β sur la ligne neutre. Or, nous avons vu que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

si la ligne des balais est inclinée d'un angle β sur la ligne neutre, le coefficient d'induction mutuelle entre l'inducteur et l'induit se réduit à $\mathfrak{M} \sin \beta$, $\mathfrak{M}$ étant le coefficient d'induction mutuelle que l'on observe entre l'inducteur et l'induit avec les balais calés suivant la ligne des pôles.

Par la rotation de l'induit, deux forces électromotrices vont prendre naissance : la première $e_{1\,eff}$, que l'on peut dire *dynamique*, que développe la rotation de l'induit dans le champ alternatif de l'inducteur ; la seconde $e_{2\,eff}$, que l'on peut dire *statique*, naît du fait de l'induction mutuelle entre le primaire et le secondaire, comme dans un transformateur.

La force électromotrice statique a pour valeur instantanée $e_2 = -\mathfrak{M} \sin \beta \, di_1/dt$ et pour valeur maximum $E_2 = \mathfrak{M} \sin \beta \, \omega \, I_1$.

Sous l'influence de cette force électromotrice statique et en la supposant seule existante, un courant d'intensité maximum

$$I_2 = \frac{\mathfrak{M} \sin \beta \, \omega \, I_1}{Z}$$

va traverser l'induit, en appelant Z son impédance. Ce courant, déphasé sur sa force électromotrice d'un angle γ donné par $\operatorname{tg} \gamma = \omega \, \mathfrak{L}_2 / R_2$ correspond, en somme, à celui envoyé dans le rotor d'un moteur à courant continu, $\mathfrak{L}_2$ et R_2 étant la self et la résistance de l'induit.

La puissance peut se calculer comme dans une machine à courant continu. A un moment donné, la force électromotrice induite par la rotation de l'induit est

$$\mathfrak{M} \, \omega_1 \cos \beta \, i_1$$

i_2 étant à cet instant l'intensité du courant de même fréquence que i_1, développé dans l'induit sous l'effet de la force électromotrice statique, la puissance momentanée sera

$$p = \mathfrak{M} \, \omega_1 \cos \beta \, i_1 \, i_2$$

et la puissance moyenne

$$p = \mathfrak{M} \, \omega_1 \cos \beta \, \frac{1}{T} \int_0^T i_1 \, i_2 \, dt = \mathfrak{M} \, \omega_1 \cos \beta \, I_1 \, I_2 \cos \lambda$$

en appelant λ le retard de I_2 sur I_1.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le couple a, par conséquent, pour valeur

$$C = \mathfrak{M} I_1 I_2 \cos\beta \cos\lambda.$$

Moteur mixte ou moteur Latour. — On peut combiner les effets des deux systèmes en appliquant deux paires de balais A et B à angles droits l'une sur l'autre : l'une A est disposée en série avec les inducteurs; l'autre B est fermée en court-circuit sur elle-même, comme dans les moteurs à répulsion.

Quand A coïncide avec la ligne des pôles et, par conséquent, B avec la ligne neutre, le couple est nul pour les deux systèmes.

Quand A coïncide avec la ligne neutre et B avec la ligne polaire, le moteur fonctionne comme moteur série.

Dans les positions intermédiaires, il y a à la fois effet série et effet de répulsion, par suite du courant statiquement induit dans le rotor et le couple résulte des couples dus aux deux genres d'effet.

Réglage de la vitesse. — La vitesse se règle par le décalage des balais au moyen d'un volant et d'une vis. Elle peut varier dans le rapport de 1 à 2 à couple constant. Entre ces limites, le ren-

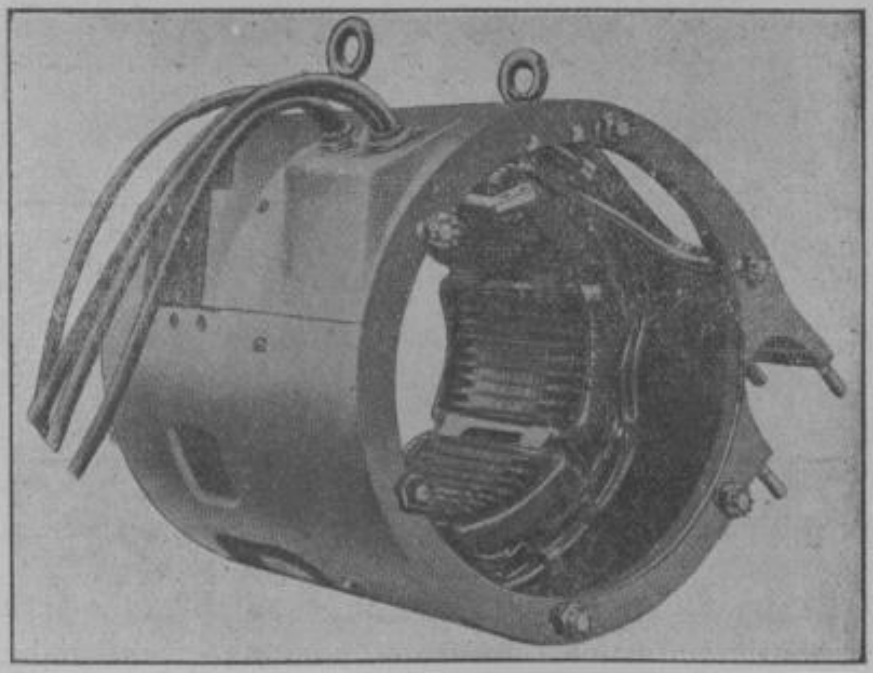


Fig. 234.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dement et le facteur de puissance restent élevés ; pour le moteur à répulsion compensé, il atteint l'unité.

Ces moteurs à décalage des balais ont une caratéristique de moteur série, c'est-à-dire que, pour un calage donné, leur vitesse augmente à mesure que le couple diminue. En dérivant une self entre les balais d'excitation, la vitesse est limitée à vide, le moteur se comportant alors comme un moteur compound à courant continu.

La figure 234 montre le système inducteur d'un moteur de tramway monophasé hexapolaire. La carcasse extérieure, de forme cylindrique, sert de support à des tôles poinçonnées d'une seule pièce, soigneusement isolées l'une de l'autre et présentant six épanouissements polaires.

Moteur triphasé à collecteur. — Il est constitué (fig. 235) d'un stator analogue à celui d'un moteur d'induction et, comme

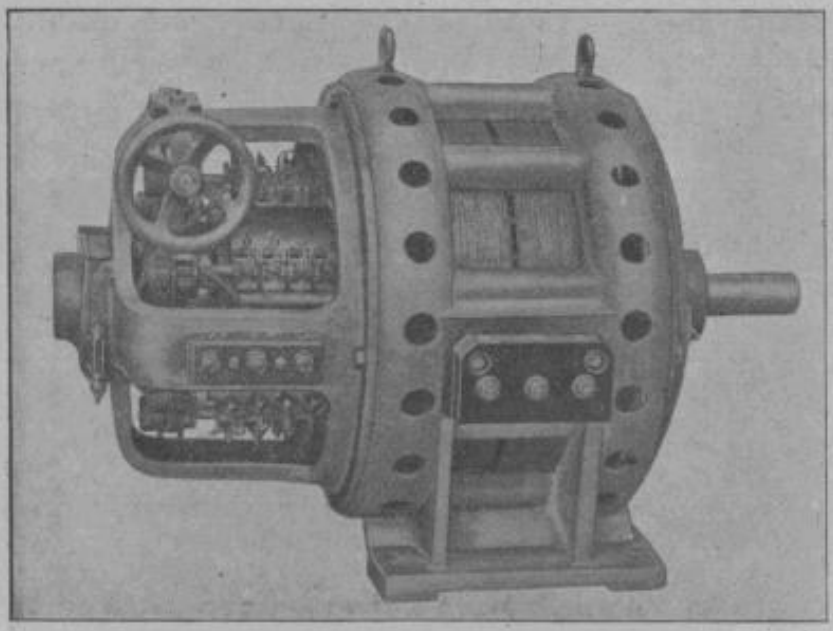


Fig. 235.

les précédents, d'un rotor à collecteur semblable à un induit de moteur à courant continu. Le rotor est connecté par ses balais mis en série avec le stator. Toutefois, quand la tension d'alimenta-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion est trop élevée, la connexion se fait par l'intermédiaire d'un transformateur abaissant la tension sur le rotor (fig. 236).

Pour un couple donné, le moteur prend une vitesse qui dépend de la position de calage des balais. Le réglage de la vitesse s'effectue, comme pour les moteurs monophasés, par le décalage des balais opéré au moyen d'un volant et d'une vis.

En somme, on peut considérer un tel moteur comme résultant de la juxtaposition sur le même axe, de trois moteurs monophasés.

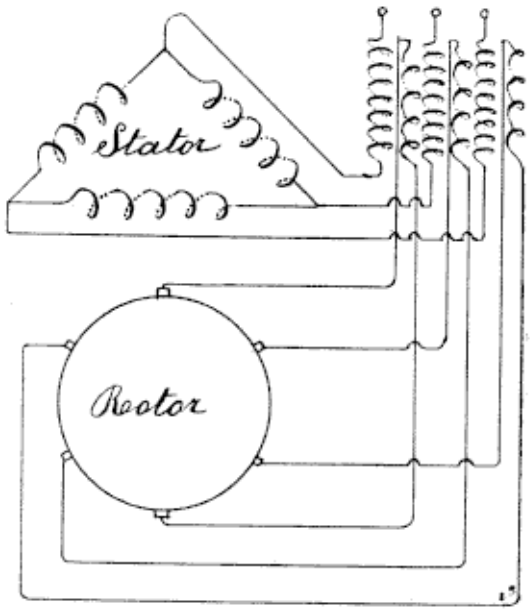


FIG. 236.

§ 4 — Essai des alternomoteurs.

Essai des moteurs synchrones [1]. — L'essai des moteurs synchrones comporte la détermination du rendement et celle des courbes en V.

Rendement. — La détermination du rendement se fait comme pour les alternateurs. Pour un moteur de faible puissance, on peut effectuer l'essai au frein; pour les moteurs plus puissants, on emploie la méthode des pertes séparées, en entraînant le moteur par une génératrice tarée.

COURBES EN V. — On trace à puissance constante la courbe des intensités absorbées (I) et celle des puissances fournies (P)

[1] BOURGUIGNON. Ouvrage cité, p. 179.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en fonction des courants d'excitation (fig. 237). On obtient une courbe très aplatie. Le facteur de puissance $\cos \varphi = P/e_{eff}\, i_{eff}$ passe par un maximum coïncidant sensiblement dans le cas d'un courant non sinusoïdal, et rigoureusement, dans le cas d'un courant exactement sinusoïdal, avec le minimum de la courbe en I. De même le minimum de la puissance en watts coïncide assez sensiblement avec celui de la courbe des intensités, sauf un décalage légèrement marqué dans le cas de pertes par hystérèse ou courants de Foucault croissant rapidement avec l'excitation.

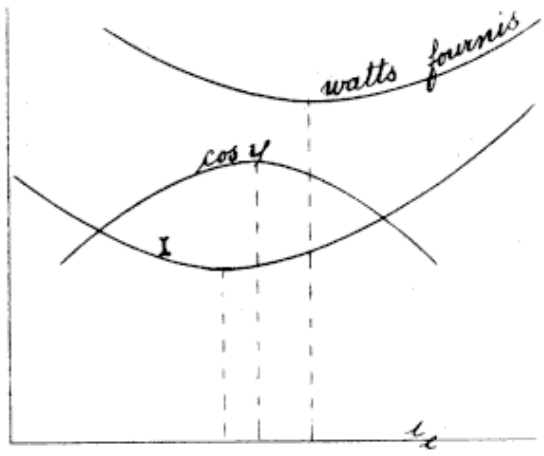


FIG. 237.

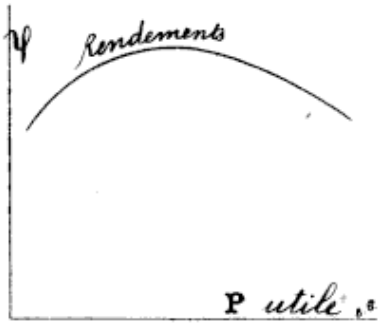


FIG. 238.

Pour déterminer la courbe du rendement en fonction de la charge, on fait varier celle-ci et on note chaque fois la consommation minimum au wattmètre ; c'est le chiffre de rendement déduit de cette courbe que l'on porte sur la courbe du rendement (fig. 238).

Essai des moteurs asynchrones. — Nous avons vu que, dans le cas du moteur multipolaire de $2p'$ pôles, l'induit fait, en négligeant le glissement, $\frac{f}{p'}$ tours par seconde et par minute

$$N = \frac{60 f}{p'}$$

f étant la fréquence des courants d'alimentation.

Mais à cause du glissement, l'induit reste en arrière sur ce nombre théorique, d'un nombre de tours $g\,N$ et l'on a ainsi, pour le nombre de tours réel : $N' = N(1 - g)$, d'où

$$N' = \frac{60 f (1 - g)}{p'}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En appelant C le couple en mètres-kilogrammes, P la puissance en chevaux

$$P = \frac{C \cdot 2\pi N'}{60.75} = \frac{C \cdot 2\pi \cdot 60 f (1-g)}{60.75 \cdot p'}$$

d'où $$C = \frac{75}{2\pi} \frac{P p'}{f(1-g)} = \frac{11{,}92\, P p'}{f(1-g)} .$$

Le glissement g étant toujours faible, (0,015 à 0,1), on se contente souvent de la formule approchée

$$C' = \frac{11{,}92\, P p'}{f}$$

immédiatement calculable en fonction d'éléments inscrits, en général, sur la plaque du moteur.

Glissement. — Le glissement a pour expression $\omega - \omega'$ et le glissement relatif

$$g = \frac{\omega - \omega'}{\omega} .$$

Il est aisé de l'exprimer en fonction des nombres de tours N' du moteur et N de l'alternateur générateur, leurs nombres de pôles $2p'$ et $2p$ étant connus, ou bien en fonction du nombre de tours N' du moteur et de la fréquence f du courant d'alimentation ; on a en effet :

$$\omega = 2\pi p \frac{N}{60} , \quad \omega' = \frac{2\pi p' N'}{60}$$

d'où $$g = \frac{p N - p' N'}{p N}$$

et, en fonction de la fréquence, en remarquant que $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi p N}{60}$ d'où $60 f = p N$

$$g = \frac{60 f - p' N'}{60 f} .$$

Rem. Le numérateur représente précisément le nombre total de périodes par minute de la force électromotrice et du courant induits dans le rotor.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ex. On a un moteur hexapolaire à cage d'écureuil fonctionnant sous 220 volts. Vitesse indiquée 940 tours pour $f = 50$, $p' = 3$.

On en déduit

$$g = \frac{3\,000 - 2820}{3\,000} = 6\ \%.$$

La fréquence du courant induit est donc

$$\frac{3\,000 - 2\,820}{60} = \frac{180}{60} = 3.$$

Essai des moteurs au frein. — On essaie généralement les moteurs asynchrones au frein. La puissance recueillie à la poulie en watts est, en appelant $C = P\,l$ le couple en mètres-kilogrammes

$$P_u = \frac{2\,\pi\,P\,l\,N'}{60\,.\,75}\,.\,736 = 1{,}03\,C\,N'.$$

D'autre part, si l'on dispose d'un wattmètre pour courants triphasés, on mesurera directement la puissance P dépensée aux bornes et le rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P}\,.$$

Si l'on ne dispose que de wattmètres simples, on employera, soit deux wattmètres (voir p. 257), soit un seul, si les charges sont égales dans les trois phases. On s'assurera que cette condition est bien remplie, en installant successivement un wattmètre et un ampèremètre sur les trois phases.

Mesure du glissement.— Nous avons vu que celui-ci est donné par

$$g = \frac{\omega - \omega'}{\omega} = \frac{p\,N - p'\,N'}{p\,N}\,.$$

On peut le déterminer en mesurant N et N' au tachymètre. Mais le numérateur étant très faible vis-à-vis du dénominateur, une faible erreur sur N ou N' donne lieu à une erreur relative considérable sur $p\,N - p'\,N'$. Il est donc préférable de mesurer directement le glissement.

Moteur a bagues.— D'après une remarque précédente, $p\,N - p'\,N'$ représente le nombre de périodes complètes du courant induit dans le rotor; nombre faible, puisqu'il résulte du glisse-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment. Donc, en intercalant en série avec un des balais un ampèremètre polarisé genre Weston (T. I, p, 253), de très faible résistance pour ne pas détruire l'équilibre des trois phases, son aiguille accusera un lancé à chaque période, puisque si la première alternance tend à faire dévier l'équipage, la suivante le calera dans la position du zéro. En comptant ce nombre de lancés m pendant une minute, on aura pour le glissement

$$g = \frac{m}{p\,\mathrm{N}} = \frac{m}{p'\,\mathrm{N}' + m}.$$

On peut opérer aussi avec un appareil thermique, mais alors on a deux lancés par période et le comptage devient plus difficile.

Moteur sans bagues. — On emploiera une méthode *stroboscopique*. Supposons qu'il s'agisse d'un moteur bipolaire et fixons sur l'axe de son rotor un disque blanc présentant deux secteurs noirs diamétralement opposés A et B (fig. 239). Le disque tourne dans le sens de la flèche.

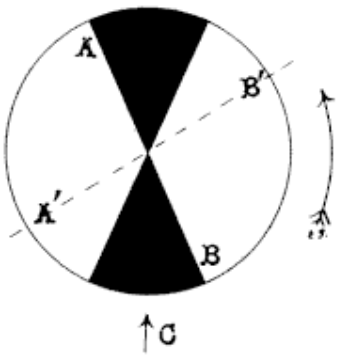


Fig 239

Éclairons-le par une lampe à incandescence ou mieux par une lampe à arc, s'alimentant au voltage du stator. Soit un point de repère fixe C, en face duquel se trouve B, quand la lampe brûle au maximum.

Si le disque tournait en synchronisme, après une demi-période, B aurait pris la place de A et vice-versa au moment du maximum d'éclairage, de sorte qu'à cause de la persistance de l'impression lumineuse sur la rétine, le secteur noir paraîtrait immobile dans l'espace. Mais si le disque est en retard, au bout d'une demi-période, il est seulement arrivé en B' A' et ainsi de de suite, de sorte qu'il paraîtra tourner en sens inverse du mouvement général. S'il lui faut τ secondes pour faire un demi-tour, comme pendant ce temps le courant d'alimentation aura effectué τf périodes, le glissement aura pour valeur

$$g = \frac{1/2}{\tau f} = \frac{1}{2\tau f}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En pratique on comptera le nombre n de passages pendant un temps T de sorte que $\tau = T/n$ et

$$g = \frac{n}{2Tf}.$$

S'il s'agit d'un moteur multipolaire, il faudra découper sur le disque un nombre de secteurs noirs égal à celui des pôles.

Mesure des résistances. — Pour un enroulement en étoile, on connecte une batterie de quelques éléments d'accumulateurs avec deux des bagues, en interposant un ampèremètre A (fig. 240).

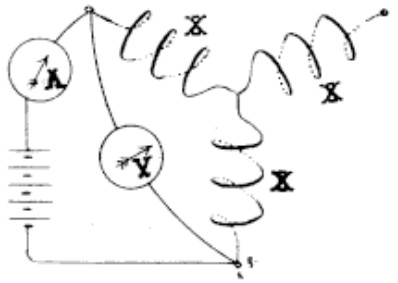


FIG. 240.

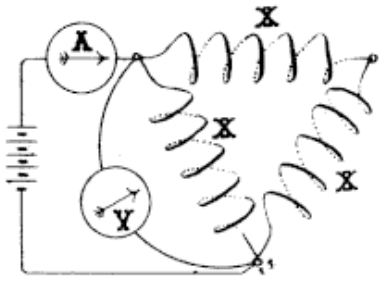


FIG. 241.

Un voltmètre V indique d'autre part la différence de potentiel aux bornes des enroulements. R étant la résistance ainsi déterminée, celle de chaque branche de l'étoile

$$X = R/2.$$

S'il s'agit d'un enroulement en triangle, on opère semblablement (fig. 241) et l'on mesure la résistance combinée

$$2X/3 = R \quad \text{d'où} \quad X = 3/2\ R.$$

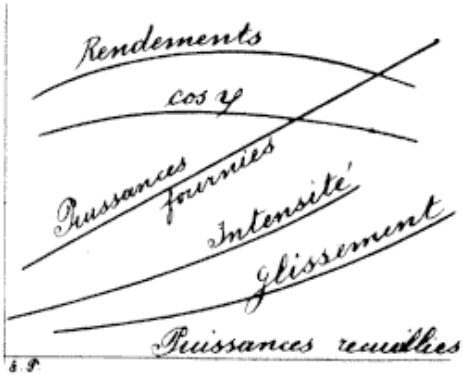


FIG. 242.

Représentation des résultats. — On porte en abscisses les puissances recueillies et en ordonnées les puissances fournies, l'intensité, les glissements, les cos φ et les rendements (fig. 242).

Il est important de déterminer avec soin le courant à vide et le cos φ à vide du moteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Essai de démarrage. — On l'effectue pour plusieurs positions du rhéostat de démarrage du rotor. On cale un frein avec une balance romaine ou un dynamomètre et l'on fait croître l'intensité jusqu'à ce que le moteur démarre. On note l'intensité absorbée dans le stator, la tension aux bornes et le couple.

Autres méthodes. — Il existe d'autres méthodes et, notamment, celle du diagramme du cercle de M. Blondel. Mais elles sortent du cadre de ce cours.

Moteur asynchrone monophasé. — Les essais des moteurs asynchrones monophasés se font de la même manière que ceux des moteurs asynchrones polyphasés.

Moteurs à collecteurs. — On trace des caractéristiques analogues à celles des moteurs série à courant continu, en alimentant sous potentiel constant et mesurant l'intensité, la vitesse, le couple, les watts fournis. On en déduit le facteur de puissance. Les résultats sont, en général, représentés en fonction de la vitesse.

On détermine le couple au démarrage et on examine comment se comporte alors le collecteur, en bloquant incomplètement la poulie avec un collier de frein, de façon à la laisser tourner lentement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE X.

Les transformateurs.

---

§ 1. — Courants alternatifs transformés en courants alternatifs.

On peut avoir pour objet de transformer la tension et l'intensité de courants qui gardent leur forme et les transformateurs sont *homomorphiques;* ou bien, on modifie en outre la *nature* du courant alternatif, ondulé, pulsatif ou continu, et l'on a affaire à des transformateurs *hétéromorphiques.*

Appareils homomorphiques. Transformateur monophasé. — Théorie. — Nous avons vu qu'il y a phénomène d'induction dès que le flux magnétique traversant un circuit varie, et cela quelle que soit la cause de la variation du flux.

Un transformateur comporte deux bobines de fil isolé (fig. 243), enroulées sur un noyau en métal magnétique, en pratique le fer doux, convenablement subdivisé pour éviter la production de courants de Foucault.

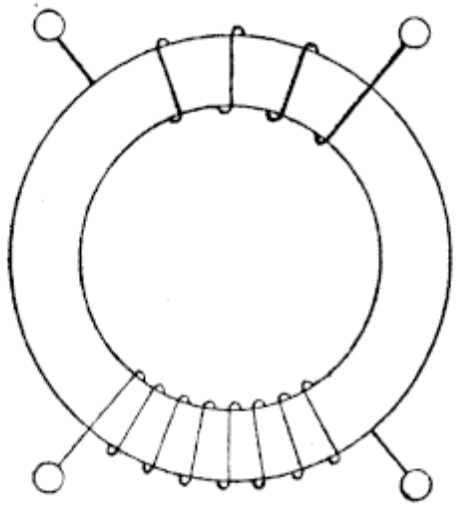


Fig. 243.

Quand on fait passer un courant variable dans un des enroulements, le *primaire*, le flux magnétique variable qu'il développe induit dans le second enroulement, le *secondaire* qui embrasse ce flux, des forces électromotrices d'induction de même fréquence, lesquelles, si le circuit secondaire est fermé, y engendrent un courant alternatif.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tous les organes sont donc fixes, d'où le nom de transformateurs *statiques* souvent donné à ces appareils.

Pour simplifier, nous négligerons les pertes de puissance, tant par effet Joule que par hystérèse et courants de Foucault. Ces pertes ne s'élèvent d'ailleurs qu'à quelques centièmes, dans les bons transformateurs fonctionnant à pleine charge. Nous supposerons également le flux primaire entièrement absorbé par le circuit secondaire, c'est-à-dire une dispersion nulle.

Appelons $e_1 = E_1 \sin \omega t$ la force électromotrice appliquée aux extrémités de la bobine primaire, i_1 le courant qui la parcourt à l'instant t, r_1 sa résistance, n_1 son nombre de spires et Φ le flux magnétique variable traversant le noyau.

La force électromotrice à appliquer à l'instant t aux extrémités du circuit primaire pour le faire traverser par le courant i sera

$$e_1 = r_1 i + n_1 \frac{d\Phi}{dt} .$$

Nous négligeons la résistance r_1 de sorte qu'il reste

$$e_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} = E_1 \sin \omega t$$

ce qui revient à supposer la force électromotrice d'induction, dont le primaire est le siège, égale et opposée à la force électromotrice qui lui est appliquée.

On tire de cette équation

$$\Phi = \int \frac{E_1}{n_1} \sin \omega t \, dt = -\frac{E_1}{n_1 \omega} \cos \omega t = -\mathfrak{N} \cos \omega t \qquad (1)$$

en posant

$$\frac{E_1}{n_1 \omega} = \mathfrak{N} \text{ ou } E_1 = n_1 \omega \mathfrak{N}.$$

On a donc

$$e_1 = n_1 \mathfrak{N} \omega \sin \omega t. \qquad (2)$$

Remarquons en premier lieu que, puisque

$$-\cos \omega t = \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

le flux se trouve déphasé de $\pi/2$ en arrière sur la force électromotrice primaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le flux $-\mathfrak{N}\cos\omega t$ traverse chacune des spires du secondaire, en supposant nulles les fuites entre le primaire et ce dernier. Le secondaire embrasse donc le flux total $-n_2\,\mathfrak{N}\cos\omega t$ et la force électromotrice induite y sera, en vertu de la loi générale de l'induction,

$$e_2 = -(+n_2\,\mathfrak{N}\,\omega\sin\omega t) = -n_2\,\mathfrak{N}\,\omega\sin\omega t = -E_2\sin\omega t \qquad (3)$$

en posant $E_2 = n_2\,\mathfrak{N}\,\omega$.

Elle sera donc déphasée de π en arrière sur la force électromotrice primaire et de $\pi/2$ en arrière sur le flux.

Comparons les valeurs absolues des forces électromotrices primaires et secondaires

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1\,\mathfrak{N}\,\omega}{n_2\,\mathfrak{N}\,\omega} = \frac{n_1}{n_2}\,. \qquad (4)$$

Première propriété : *Les forces électromotrices primaire et secondaire se trouvent dans le même rapport que les nombres de spires de leurs enroulements*, ce qui permettra de transformer à volonté une force électromotrice en une autre quelconque.

Le circuit primaire étant doué de réactance, le courant qui le traverse est déphasé d'un angle φ_1 en arrière sur sa force électromotrice

$$i_1 = \frac{E_1\cos\varphi_1}{r_1}\sin(\omega t-\varphi_1) = I_1\sin(\omega t-\varphi_1) = I_1\cos\varphi_1\sin\omega t - I_1\sin\varphi_1\cos\omega t$$

et l'énergie dépensée dans cet enroulement a pour expression

$$\frac{E_1 I_1}{2}\cos\varphi_1.$$

Supposons le secondaire fermé sur un circuit extérieur de résistance r_2, de façon que le courant i_2 qui traverse ce circuit soit déphasé d'un angle φ_2. On aura

$$i_2 = -\frac{E_2}{r_2}\cos\varphi_2\sin(\omega t-\varphi_2) = -I_2\sin(\omega t-\varphi_2)$$
$$= -I_2\cos\varphi_2\sin\omega t + I_2\sin\varphi_2\cos\omega t$$

et l'énergie développée sera

$$\frac{E_2 I_2}{2}\cos\varphi_2.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les pertes étant supposées nulles,

$$\frac{E_1 I_1}{2} \cos \varphi_1 = \frac{E_2 I_2}{2} \cos \varphi_2, \text{ d'où } n_1 I_1 \cos \varphi_1 = n_2 I_2 \cos \varphi_2. \qquad (5)$$

Les portions $I_1 \cos \varphi_1 \sin \omega t$ et $I_2 \cos \varphi_2 \sin \omega t$ des courants, concordantes avec les forces électromotrices et qui seules interviennent, par leurs valeurs maxima $I_1 \cos \varphi_1$, $I_2 \cos \varphi_2$, dans l'expression de l'énergie, sont appelées, ainsi que nous l'avons vu, courants wattés. Comme on a, en vertu de (5)

$$\frac{I_1 \cos \varphi_1}{I_2 \cos \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} = \text{c}^{\text{te}},$$

on voit que les intensités des courants wattés, inversement proportionnelles aux nombres de spires, sont proportionnelles entre elles, de sorte que, deuxième propriété : *Plus le secondaire absorbe d'énergie, plus le primaire lui en fournit.* Quand le secondaire est ouvert, le courant watté est nul dans le primaire.

Les portions déwattées (parce qu'elles sont déphasées de $\pi/2$ sur leurs forces électromotrices respectives) $- I_1 \sin \varphi_1 \cos \omega t$ et $+ I_2 \sin \varphi_2 \cos \omega t$ des intensités des courants, qui sont respectivement concordantes et déphasées de π par rapport au flux magnétique $- \mathfrak{N} \cos \omega t$, portent plus spécialement le nom de *courants de magnétisation*. Il est, en effet, facile de démontrer que ce sont elles qui concourent à la magnétisation du noyau. La force magnétomotrice est à chaque instant égale à 4π fois le nombre d'ampères-tours totaux des deux enroulements, en tenant compte, bien entendu, du sens de circulation des courants. On a donc

$$- \mathfrak{N} \cos \omega t = \frac{4\pi (n_1 i_1 + n_2 i_2)}{\mathfrak{R}}.$$

Remplaçant i_1 et i_2 par les valeurs trouvées précédemment, et introduisant la condition

$$n_1 I_1 \cos \varphi_1 = n_2 I_2 \cos \varphi_2,$$

il vient

$$- \mathfrak{N} \cos \omega t = \frac{4\pi (- n_1 I_1 \sin \varphi_1 + n_2 I_2 \sin \varphi_2)}{\mathfrak{R}} \cos \omega t$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'où $$\mathfrak{N} = \frac{4\pi (n_1 I_1 \sin \varphi_1 - n_2 I_2 \sin \varphi_2)}{\mathfrak{R}} \qquad (6)$$

relation montrant bien le rôle magnétisant joué par les courants déwattés.

Alimentons (ce qui est le cas général) le circuit primaire sous force électromotrice efficace constante, donc $E_1 = C^{te}$. En vertu de (1), le flux maximum $\mathfrak{N}$ deviendra constant et, par conséquent, indépendant de la charge dans le secondaire. $\mathfrak{N}$ étant constant, à mesure que i_2 diminue, le courant déwatté primaire diminue (6), de façon à maintenir la même valeur à la force magnétomotrice. Quand le secondaire est ouvert, on a pour le courant déwatté primaire

$$n_1 I_1 \sin \varphi_1 = \frac{\mathfrak{N}\mathfrak{R}}{4\pi}.$$

Ce courant est alors minimum. Nous avons vu, d'autre part, qu'à ce moment le courant watté primaire est nul, de sorte qu'aucune énergie ne serait dépensée dans le primaire.

Cette conclusion forcée ne peut être tirée que parce que nous avons supposé nulle la résistance du primaire. En réalité, celui-ci présente une certaine résistance, d'ailleurs très faible, et un grand coefficient de self, de sorte qu'à circuit secondaire ouvert il ne reste en dérivation sur les circuits d'alimentation qu'une bobine de forte réactance. Le courant i'_1 qui passe est donc très faible, et la puissance $r_1 i'^2_1$ dépensée par effet Joule dans le circuit primaire à secondaire ouvert est minime. Les pertes par courants de Foucault et hystérèse sont elles-mêmes très faibles dans les bons appareils, de sorte que, troisième et importante propriété : *l'appareil consomme peu à vide.*

Théories complètes (1). — 1° Appelons $\mathfrak{L}'_1$, $\mathfrak{L}'_2$, les coefficients de selfinduction des circuits primaire et secondaire, $\mathfrak{M}$ leur coefficient d'induction mutuelle, ρ la résistance du circuit d'utilisation du secondaire, λ son coefficient de selfinduction.

(1) A. Mauduit. *Electrotechnique appliquée*, p. 304. Dunod, Paris, 1904.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous aurons dans le primaire

$$(e_a = \Sigma Ri - \Sigma e)$$
$$e_1 = r_1 i_1 + \mathfrak{L}'_1 \, di_1/dt + \mathfrak{M} \, di_2/dt.$$

De même dans le secondaire

$$o = (r_2 + \rho) i_2 + (\mathfrak{L}'_2 + \lambda) \, di_2/dt + \mathfrak{M} \, di_1/dt.$$

Si e_1 et les constantes du circuit sont connues, ces équations donnent i_1 et i_2.

2° On peut aussi poser les équations générales du transformateur en raisonnant sur les flux. Φ étant le flux commun traversant les deux enroulements; l_1 le coefficient de self relatif aux fuites primaires (portion $l_1 i_1$ du flux total émis par le primaire ne traversant pas le secondaire); l_2 le coefficient de self relatif aux fuites secondaires (donnant lieu au flux $l_2 i_2$ ne traversant pas le primaire) :

$$e_1 = r_1 i_1 + n_1 \, d\Phi/dt + l_1 \, di_1/dt$$
$$o = (r_2 + \rho) i_2 + n_2 \, d\Phi/dt + (l_2 + \lambda) \, di_2/dt.$$

On y ajoute

$$\frac{4\pi (n_1 i_1 + n_2 i_2)}{\mathfrak{R}} = \Phi.$$

Si l'on connaît les constantes e_1, r_1, ... on pourra construire le diagramme du transformateur et résoudre complètement ces équations.

Pertes d'énergie dans les transformateurs. — 1° Les courants de Foucault et l'hystérèse donnent lieu à une perte, fonction de la fréquence, de l'induction maximum et du volume du fer. On réduit les courants de Foucault en constituant le noyau de feuilles minces, isolées l'une de l'autre ou de fils de fer vernis. Il est à remarquer que les pertes par hystérèse sont indépendantes de la charge dans les transformateurs à tension primaire constante, puisque le flux maximum y reste constant; 2° l'effet Joule dans les enroulements donne lieu à une perte augmentant avec la charge. A vide, cette perte n'est pas nulle, comme nous l'avons fait remarquer. Elle sera d'autant moindre que l'impédance est plus grande. Or, celle-ci dépend du coefficient de selfinduction

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

des enroulements, lequel est d'autant plus important que le circuit magnétique de l'appareil est moins réluctant. A ce point de vue, il y a intérêt à employer des transformateurs à circuit magnétique fermé.

1° **Transformateurs à noyaux.** — *Les bobines sont extérieures au circuit magnétique (fig. 244, 245), lequel, dans ce cas, est simple et affecte la forme d'un cadre ou noyau fermé.*

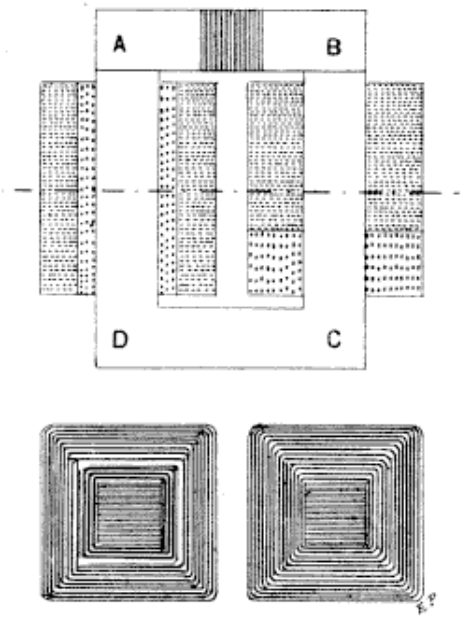


FIG. 244 et 245.

NOYAU. — Le noyau, cadre ou carcasse magnétique ABCD, est constitué de tôles de 0,3 à 0,5 millimètre d'épaisseur, isolées par du vernis, du papier ou simplement par une couche d'oxyde.

Pour diminuer la réluctance, on évitera le plus possible les joints. La carcasse se composera donc d'une pièce en U, ADCB, sur les branches verticales de laquelle on passera les enroulements préalablement bobinés sur un mandrin en bois. Le circuit magnétique se fermera par les parties AB fixées aux montants AD, BC. Les joints seront soigneusement fraisés et, s'ils sont plats, on y interposera une feuille de papier, pour éviter qu'un manque d'exacte concordance des tôles ne permette la production de courts-circuits favorisant le développement de courants de Foucault. Dans le même ordre d'idées, on adopte parfois des joints imbriqués (assemblage par tenons et mortaises), mais ils sont plus compliqués.

On constitue le noyau des moyens et petits transformateurs de tôles en L, accolées de manière à former un cadre complet. Les extrémités en regard, soigneusement rabotées, sont séparées par une feuille de papier mince. On serre le tout au moyen de cadres et de boulons, après avoir passé les bobines sur les longues branches des L.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin, les tout petits transformateurs ont leur noyau formé de minces fils de fer oxydés droits ou rabattus l'un sur l'autre (transformateurs hérissons).

Bobines. — Chacun des noyaux AD, BC porte une bobine primaire et une secondaire qui peuvent occuper deux positions bien tranchées l'une par rapport à l'autre : ou bien elles sont glissées l'une dans l'autre (noyau AD, fig. 244) ou simplement juxtaposées (noyau BC). La première disposition un peu moins aisée pour le montage, est supérieure comme effet utile. Dans le cas de la juxtaposition, en effet, une assez grande partie des lignes de force émises par le primaire se ferme dans l'air environnant et ne traverse pas le secondaire, dispersion encore accentuée par le déphasage de 180° existant entre les courants magnétisants des deux enroulements, qui tend à développer entre eux des pôles conséquents. Alors que la perte en volts ne dépasse pas 0,01 dans le premier cas, elle atteint 0,04 dans le second.

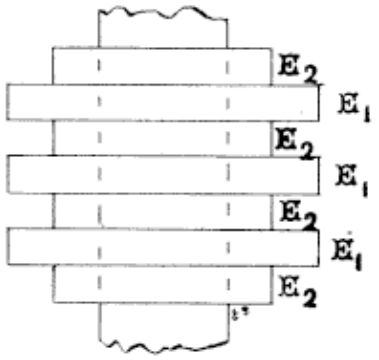


Fig. 246.

Certaines usines parent à l'inconvénient de la juxtaposition, tout en facilitant la ventilation des enroulements, en subdivisant le primaire et le secondaire en un grand nombre de bobines minces enchevêtrées (fig. 246).

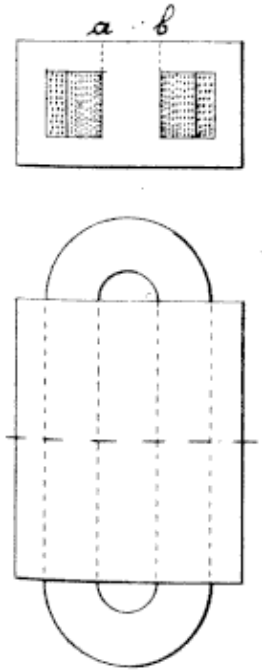


Fig. 247 et 248.

2° **Transformateurs cuirassés.** — Dans ceux-ci (fig. 247 et 248) *les bobines sont noyées dans le fer, soit partiellement, soit totalement.*

Fer. — Le circuit magnétique est alors double, le flux créé dans la partie centrale se subdivise par parties égales dans les revêtements extérieurs, dont la section est précisément la moitié de celle du noyau central.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'ensemble est réalisé, ou bien par deux paquets de tôles dont l'un est découpé en forme d'E, que l'on place l'un contre l'autre, après avoir au préalable glissé sur la branche centrale du E les bobines primaire et secondaire; ou bien on découpe les cadres en *a* et *b*, (fig. 247), on rabat les petits côtés à angle droit, on passe les bobines sur la partie centrale, pour replacer enfin les petits côtés dans la position primitive. On n'a ainsi qu'un joint par circuit magnétique au lieu de deux.

Bobines. — Même observation que précédemment au sujet de la position relative des bobines.

Comparaison des deux systèmes. — Si le dispositif cuirassé a d'une part l'avantage de réduire la longueur du circuit magnétique et d'exiger moins de cuivre pour atteindre un effet utile donné, ce qui restreint la perte par effet Joule, d'autre part, le volume de fer est, avec ce système, plus considérable, ce qui majore les pertes par hystérèse et courants de Foucault. En outre, le refroidissement des bobines s'effectue moins aisément et il est plus difficile d'assurer une bonne isolation des circuits. Pour ces motifs, c'est le premier système qui jouit de la faveur des constructeurs.

Autotransformateur. — Considérons (fig. 249) une bobine enroulée sur un noyau magnétique, subdivisée en n circuits égaux, reliés à des bornes. Entre les bornes extrêmes B_0 et B_n règne la différence de potentiel totale $e_{1\,eff}$. Entre une borne extrême B_0 et la première borne intermédiaire B_1 nous trouverons la force électromotrice efficace $\frac{e_{1\,eff}}{n}$; entre B_0 et B_2, $2\frac{e_{1\,eff}}{n}$, et ainsi de suite.

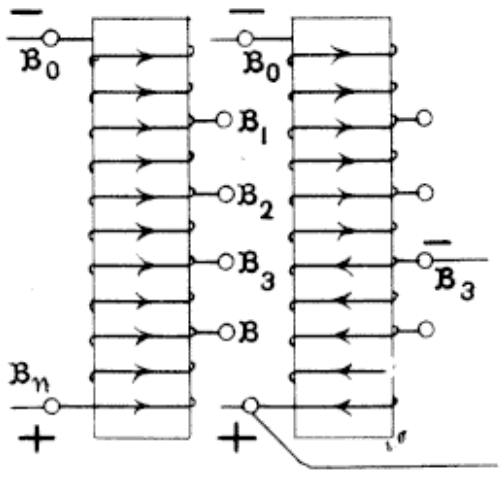


Fig. 249.

Fig. 250.

Indiquons la direction instantanée des courants à un moment donné. Si nous fermons un circuit d'utilisation entre B_3 et B_n (fig. 250) il absorbera un courant débité au premier moment

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par le circuit B_0 B_3. Cet excédent de courant traversant les spires B_0 B_3 induira dans les spires B_3 B_n un courant de sens inverse, s'ajoutant au courant d'utilisation et l'on voit qu'au courant direct absorbé par le circuit d'utilisation, se superpose un courant induit par l'appareil lui-même, d'où son nom d'*auto-transformateur*.

Transformateurs polyphasés. — Les courants polyphasés étant des courants alternatifs, peuvent être transformés individuellement au moyen des appareils précédents. Mais, quand on peut assurer (ce qui est toujours désirable) la constance de l'égalité de la charge des diverses phases, il est plus simple, moins coûteux et moins encombrant, d'établir un transformateur spécial, en tenant compte qu'il s'agit ici de quantités polyphasées.

Soient n bobines identiques, parcourues par n courants polyphasés, dont les noyaux sont réunis haut et bas par des culasses qui affectent le montage en polygone, siège de flux polyphasés. La première culasse étant traversée par un flux alternatif $\mathfrak{N} \sin \omega t$, la précédente contiendra le flux $\mathfrak{N} \sin (\omega t - 2\pi/n)$ et la suivante le flux $\mathfrak{N} \sin (\omega t + 2\pi/n)$. La différence de ces flux, qui traverse les noyaux

$$\mathfrak{N} \sin \omega t - \mathfrak{N} \sin \left(\omega t \pm \frac{2\pi}{n}\right) =$$

$$2\,\mathfrak{N} \sin \frac{\mp \pi}{n} \cos \left(\omega t \pm \frac{\pi}{n}\right)$$

a pour valeur maximum $2\,\mathfrak{N} \sin \pi/n$, de sorte qu'en admettant partout la même induction maximum et appelant S_c la section des culasses, S_n celle des noyaux, on aura

$$\frac{S_c}{S_n} = \frac{\mathfrak{N}}{2\,\mathfrak{N} \sin \frac{\pi}{n}} = \frac{1}{2 \sin \frac{\pi}{n}}.$$

Pour les courants triphasés

$$2 \sin \frac{\pi}{3} = \sqrt{3}.$$

On agencera, (fig. 251), trois noyaux

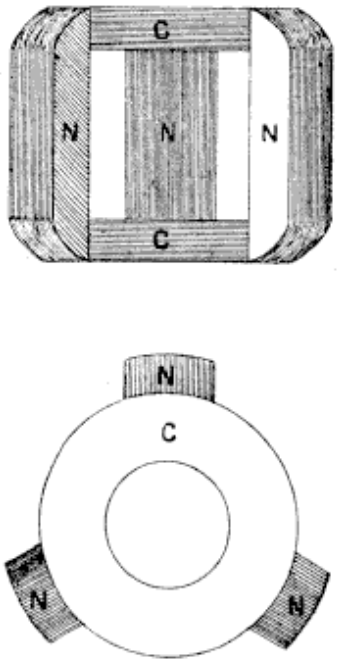


FIG. 251.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

N,N,N, de section S_n, réunis haut et bas par des culasses de section $\frac{S_n}{\sqrt{3}}$. Généralement, les noyaux sont verticaux et placés dans un même plan, ce qui réduit l'encombrement et facilite l'accès aux différentes parties. La longueur des divers circuits magnétiques n'est alors plus égale, mais pratiquement la différence de réluctance qui en résulte est négligeable.

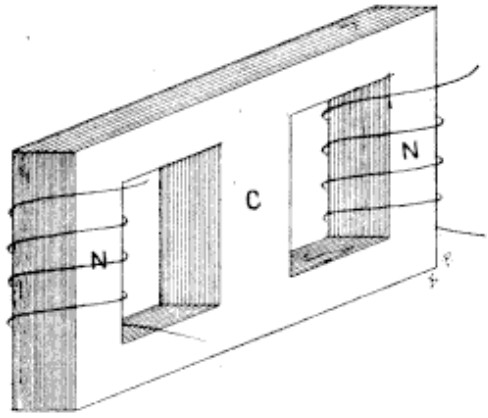


FIG. 252.

Dans le cas de courants biphasés (fig. 252), (qui ne correspondent pas à un montage exactement polyphasé comme nous l'avons vu), la culasse C réunissant les deux noyaux N, N, doit permettre le passage des deux flux

$$\mathfrak{M} \sin \omega t + \mathfrak{M} \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right) = 2\,\mathfrak{M} \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{4}\right) \cos \frac{\pi}{4}.$$

Pour que culasse ét noyaux soient soumis à la même induction, faudra

$$\frac{S_c}{S_n} = \frac{2\,\mathfrak{M} \cos \frac{\pi}{4}}{\mathfrak{M}} = 2 \cos \frac{\pi}{4} = \sqrt{2}.$$

La section de C sera donc 1,41 fois plus grande que celle de N.

Comme toujours, et ainsi que l'indiquent les figures 251 et 252, noyaux et culasses sont formés de paquets de tôles minces isolées.

Refroidissement et isolation des transformateurs.—Les petits transformateurs présentent une surface suffisante pour assurer un bon refroidissement. Malgré leur meilleur rendement, les appareils puissants s'échauffent davantage, la surface croissant moins vite que le volume. On prévient un échauffement exagéré, en provoquant une circulation d'eau autour des noyaux et des bobines ; en adoptant une ventilation artificielle ou en plongeant le transformateur dans un bain d'huile de pétrole dense contenu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans une cuve métallique, pourvue au besoin d'ailettes facilitant le rayonnement par convection.

L'huile agit aussi comme isolant et l'appareil est, en outre, isolé du sol au moyen d'isolateurs en porcelaine.

Coefficients de construction admis. — Pour réduire la section du fer et la dépense d'excitation au minimum, il convient d'adopter des inductions pour lesquelles la perméabilité est grande, soient des valeurs de $\mathfrak{B}$ maximum comprises entre 3 000 à 7 500 gauss. En outre, comme les pertes par courants de Foucault et hystérèse croissent avec la fréquence et sont proportionnelles à l'induction, il y a lieu, pour maintenir un bon rendement, de *réduire l'induction quand la fréquence augmente.*

Ainsi, d'après M. Kolben, alors qu'à 40 périodes par seconde, l'induction maximum peut atteindre de 5 500 à 6 500 gauss, pour 60 périodes par seconde, l'induction maximum ne devra pas dépasser 4 500 à 5 000 gauss et, pour 120 périodes par seconde, 3 000 à 3 500 gauss.

La section réelle du fer en fonction de la section totale s'élève à 0,80.

Densité du courant : dans l'enroulement à gros fil, 1 A par millimètre carré de section ; dans l'enroulement à fil fin, 1 à 1,5 A par millimètre carré de section.

Perte par courants de Foucault et hystérèse à pleine charge 0,01 à 0,04.

Effet Joule dans chacun des enroulements à pleine charge 0,01 à 0,02.

Surface de refroidissement totale, fer et cuivre, en centimètres carrés exposés à l'air libre, par watt 20 à 50.

Échauffement tolérable : pour le fer et le gros fil, 60° C ; pour le fil fin, 40° C au-dessus de la température ambiante.

Rendements et poids.—Transformateurs triphasés à bain d'huile, Haute tension jusqu'à 6 000 volts, $f = 50$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Puissance en kilovoltampères	Pour pleine charge et cos $\varphi = 1$		Poids	
	Rendement	Chute de tension %	Transf. sans huile	Huile
40	0,97	2	630	310
150	0,98	1,3	1450	640
270	0,982	1,25	2175	975
500	0,984	1,1	3650	1700
800	0,9855	1	5200	2500

Avec l'élévation du voltage, le rendement baisse légèrement.

Une propriété précieuse réside dans la grande valeur qu'atteint le rendement même aux faibles charges et pour les surcharges, comme il résulte du tableau suivant relatif à des appareils de 5 kw, fréquence 60 :

0,10	de la charge,	de	0,842 à 0,876.
0,25	»	»	0,927 à 0,941.
0,50	»	»	0,954 à 0,962.
0,75	»	»	0,961 à 0,965.
1	»	»	» »
1,25	»	»	0,954 à 0,965.

Essai d'un transformateur (1).

Essais d'isolement.— Les transformateurs ont généralement pour objet d'abaisser la haute tension, 5, 6, 10 000 volts et davantage, distribuée par une canalisation, jusqu'à celle généralement assez basse, 110 volts, des appareils d'utilisation. Le circuit dit *primaire* est donc, en général, celui à haute tension et faible intensité et, le *secondaire*, celui à grande intensité et basse tension. Il est de la plus haute importance, au point de vue de la sécurité : 1° que les isolants soient suffisamment rigides pour résister aux tensions appliquées et 2° qu'aucun contact n'existe entre les circuits et leur noyau, ni entre eux.

1° L'ESSAI DE RIGIDITÉ DIÉLECTRIQUE se fait en appliquant

(1) A. MAUDUIT. *Électrotechnique appliquée*, p. 319. Dunod, Paris, 1904.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pendant un temps suffisant, une demi-heure au moins, une tension alternative plus élevée que la tension normale d'au moins 1,5 fois cette tension, au-delà de 10 000 volts. Le rapport entre la tension d'essai et la tension normale croît quand cette dernière diminue.

2° La MESURE DE L'ISOLEMENT s'effectue, soit par la méthode de comparaison, soit par celle du voltmètre (T. I, p. 332). Il faut une centaine de mégohms d'isolement entre l'enroulement à fil fin et le noyau, ainsi qu'entre les deux enroulements, tandis que quelques mégohms suffisent entre l'enroulement à gros fil et le noyau.

Vérification rapide du bon fonctionnement. — Il y a lieu de s'assurer du bon fonctionnement des bobines. Le défaut le plus fréquent est le court-circuit. On soumet avec précaution l'enroulement à gros fil à la différence de potentiel secondaire et l'on observe le courant à vide. S'il a l'intensité normale, il y a des chances que l'appareil soit bon. Si l'intensité est trop grande, c'est qu'il existe un court-circuit. Les spires en court-circuit fonctionnent comme un transformateur et, généralement, le courant induit sera suffisamment intense pour amener la carbonisation de l'isolant, ce qui localisera le défaut. S'il n'en est pas ainsi, on promène le long du noyau une lame de fer doux, mince et flexible, placée au bout d'une tige isolante. L'endroit du court-circuit est indiqué par les vibrations très nettes auxquelles est soumise la lame, lorsque l'on arrive à sa proximité immédiate.

Courant et dépense à vide. — On mesure le courant absorbé à vide, ainsi que la dépense, à l'aide d'un bon wattmètre. Il faut naturellement se placer, autant que possible, dans les mêmes conditions qu'en charge, au point de vue de la fréquence et de l'induction maximum.

Mesure du rapport de transformation. — On appelle *rapport de transformation théorique le rapport* n_2/n_1 et *rapport de transformation à vide* $n_2/n_1 v_1$. Le coefficient v_1 est défini par $1/v_1 = \Phi_2/\Phi_1$, Φ_2 étant le flux à travers l'enroulement secondaire ouvert,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quand le flux Φ_1 traverse le primaire. S'il n'y avait pas de fuite, on aurait $\Phi_2 = \Phi_1$ et $v_1 = 1$. A cause des fuites on a toujours $\Phi_2 < \Phi_1$ et $v_1 > 1$. En somme, v_1 est le coefficient de Hopkinson, pratiquement égal à l'unité à vide.

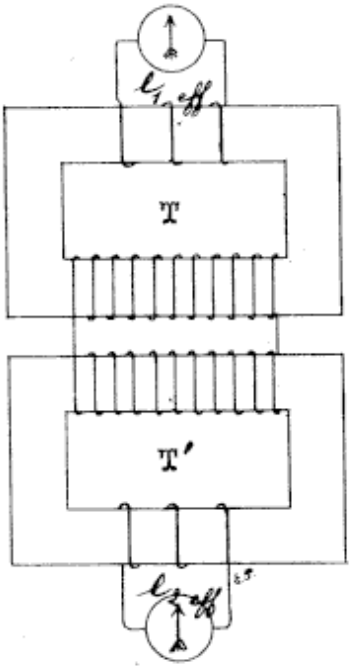


FIG. 253.

On mesurera le rapport de transformation, soit en comparant les volts aux bornes des deux enroulements à vide, soit en comparant les ampères dans les deux enroulements, l'un des deux étant en court-circuit (équat. 5 précédente).

Pour ce qui concerne la première mesure, on utilise souvent un transformateur d'essai T' dont le rapport de transformation est connu et on le monte en opposition avec le premier (fig. 253). Soient $e_{1\,\text{eff}}$ la lecture aux bornes du transformateur T à essayer, $e_{2\,\text{eff}}$, celle aux bornes correspondantes de T', m_1 et m_2 les deux rapports de transformation.

On aura en appelant e'_{eff} la tension commune intermédiaire

$$e'_{\text{eff}}/e_{1\,\text{eff}} = m_1 \; ; \; e'_{\text{eff}}/e_{2\,\text{eff}} = m_2 \quad \text{d'où} \quad m_1 = m_2\, e_{2\,\text{eff}}/e_{1\,\text{eff}}.$$

Coefficient de régulation. — On appelle ainsi le rapport

$$\frac{\text{tension à vide} - \text{tension en charge}}{\text{tension en charge}} \text{ ou encore } \frac{\text{chute de tension}}{\text{tension en charge}}.$$

Ce rapport varie avec l'intensité $i_{2\,\text{eff}}$ dans l'enroulement secondaire et avec son déphasage φ_2. Comme la chute de tension dans le secondaire est très faible, sa détermination directe manque de précision. Aussi substitue-t-on généralement à la mesure directe la méthode graphique de Kapp, que le cadre de ce cours ne nous permet pas de développer.

Mesure du rendement. — $u_{2\,\text{eff}}$ étant le voltage aux bornes du secondaire, $i_{2\,\text{eff}}$ le courant qui le parcourt, φ_2 leur déphasage et p la puissance dépensée à vide, le rendement a pour valeur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$\eta = \frac{u_{2\,\text{eff}}\, i_{2\,\text{eff}} \cos \varphi_2}{u_{2\,\text{eff}}\, i_{2\,\text{eff}} \cos \varphi_2 + p + r_1\, i^2_{1\,\text{eff}} + r_2\, i^2_{2\,\text{eff}}}$$

On procède toujours par la méthode des pertes séparées. On ne peut, en effet, obtenir une évaluation directe du rendement au moyen de deux wattmètres, car en admettant une erreur de 1 % sur chaque lecture, cela fait 2 %. Or le rendement des gros transformateurs pour $\cos \varphi = 1$, atteint 97 %.

Essais de durée. — On fait fonctionner le transformateur à pleine charge pendant le nombre d'heures voulu pour atteindre le régime permanent. Ces essais sont très longs pour les transformateurs puissants et la dépense d'énergie est considérable. Afin de procéder plus rapidement, on amène le transformateur à la température de régime imposée en le mettant dans une étuve, en envoyant dans ses enroulements du courant continu pour échauffer le cuivre, puis du courant alternatif pour échauffer le fer. Quand l'appareil est à une température égale ou supérieure à la limite imposée, on fait l'essai de durée proprement dit. Si le thermomètre descend, on est assuré que la température du transformateur n'atteindra jamais celle à laquelle il a été porté.

Transformateurs hétéromorphiques. Bobine de Ruhmkorff. — La bobine de Ruhmkorff constitue un cas particulier des transformateurs précédents, en ce sens qu'on l'alimente au moyen d'un simple *courant continu*, périodiquement interrompu, c'est-à-dire d'un courant *pulsatif*. C'est le transformateur d'induction le plus anciennement connu. D'après ce que nous avons dit, T. I, p. 119, pour que, dans ces conditions, les variations de flux soient marquées, son circuit magnétique doit être ouvert.

La bobine de Ruhmkorff comporte, (fig. 254), un noyau droit formé de fils de fer vernis réunis en faisceau, sur lequel sont enroulées la bobine primaire en une seule couche ou un nombre restreint de couches de gros fil, puis la bobine secondaire en un très grand nombre de couches de fil fin. La bobine primaire est en rapport, par l'intermédiaire d'un interrupteur I, avec une pile

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

P et un mécanisme trembleur destiné à couper périodiquement le circuit et composé, par exemple, d'une armature *a* en fer doux, montée sur ressort, venant au repos appuyer sur un butoir *b*. Le butoir et l'armature sont réunis par un petit condensateur C.

Lorsqu'on ferme le circuit primaire, le noyau est aimanté ; il attire l'armature qui se déplace et interrompt le courant. Celui-ci ayant cessé, le flux magnétique se dissipe en majeure partie (flux maximum — flux rémanent), l'attraction disparaît presque complètement, l'armature sollicitée par le ressort vient reprendre sa position primitive, ce qui rétablit le courant et ainsi de suite. Le condensateur C a pour objet de réduire l'étincelle de rupture jaillissant entre l'armature et son contact, de manière à éviter leur détérioration rapide ; il restitue ensuite sa charge au circuit primaire, d'où augmentation de l'effet inducteur ; enfin, il facilite la production des décharges oscillantes.

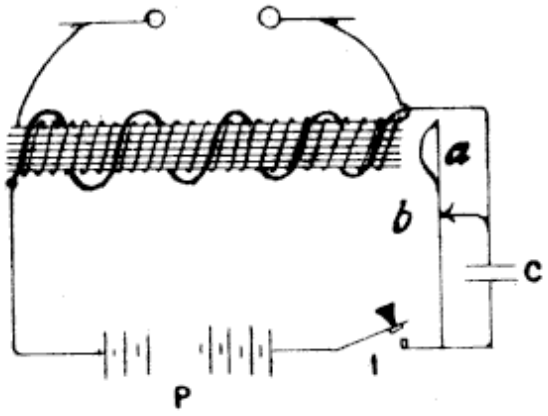


FIG. 254.

On arrive donc à faire traverser le circuit secondaire par des flux magnétiques rapidement variables, successivement croissants et décroissants, d'où production de forces électromotrices alternatives à tension d'autant plus élevée, que les flux sont plus intenses, varient plus rapidement

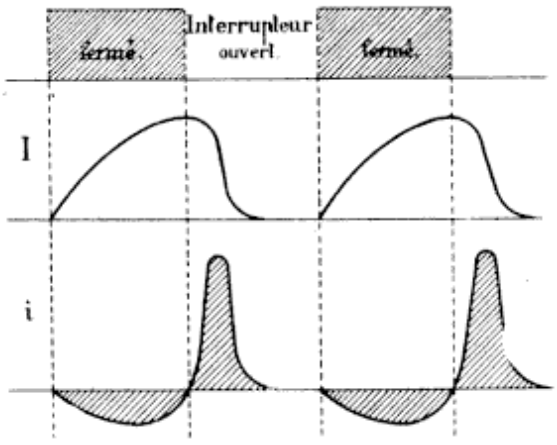


FIG. 255 (1).

(1) Extraite de l'ouvrage de M. ARMAGNAT : *La bobine d'induction*. Gauthier-Villars, Paris, 1905.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et que le rapport du nombre de spires des deux enroulements est plus grand.

Il est à remarquer que la tension secondaire est loin d'être exactement sinusoïdale. En effet, au moment de la fermeture du circuit primaire, le courant ne s'établit que lentement, à cause de la grande selfinduction de la bobine; puis, à la rupture, il cesse brusquement (courbe des I, fig. 255, dans le cas où il n'y a pas de condensateur *m*). En vertu de la loi générale de l'induction, il en résultera dans le secondaire une onde négative, par exemple, de longue durée et faible amplitude, suivie d'une onde positive de faible durée et de grande amplitude (courbe des *i*).

Rupteurs. — *a*) **Mécaniques.** — Le bon fonctionnement de la bobine dépend de l'excellence de son rupteur de courant. On a imaginé une foule de dispositifs. Souvent, les interruptions du courant primaire sont produites par une petite machine spéciale qui plonge une aiguille dans une coupe de mercure, puis l'en retire rapidement, la coupe et l'aiguille faisant partie du circuit. Pour empêcher la production de vapeurs mercurielles, on recouvre le métal d'une couche de liquide : eau, alcool.

b) **Électrolytiques.** — Système Wehnelt. — M. Wehnelt a fait connaître, il y a quelques années, un rupteur remarquablement simple. Il consiste en un vase de verre (fig. 256) rempli d'acide sulfurique dilué, contenant deux électrodes. La cathode peut être d'un métal quelconque. Généralement, c'est une plaque de plomb. L'anode A est formée d'un fil de platine soudé dans un tube en verre T, rempli de mercure, au dehors duquel il ne fait saillie que de quelques millimètres.

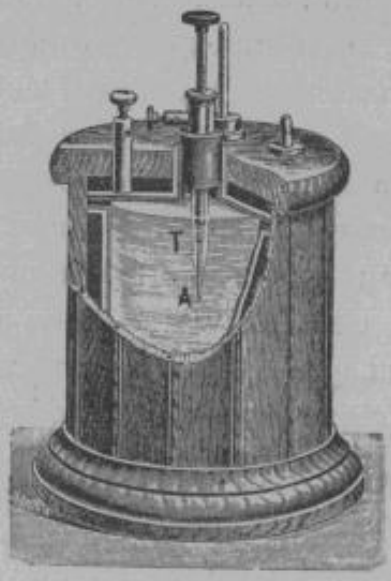


Fig. 256.

La force électromotrice utilisée est d'environ 80 volts; il est inutile de mettre un condensateur en dérivation sur le Wehnelt.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand on ferme le circuit, le courant est interrompu très nettement de 200 à 1500 et même 1700 fois par seconde, suivant la tension appliquée, la température du bain, la selfinduction du circuit, etc.

On constate expérimentalement que : 1° la fréquence diminue quand la selfinduction du circuit augmente; 2° la fréquence augmente en même temps que la force électromotrice de la source; 3° la fréquence diminue pour des pressions croissantes; 4° la tension de vapeur du liquide a une influence complexe. Dans tous les cas, le fonctionnement de l'appareil est assuré avec une dépense de courant d'autant plus faible, que cette tension est elle-même plus grande.

Pour qu'il y ait fonctionnement en rupteur, il faut que la différence de potentiel soit comprise entre certaines limites. En dessous de la limite inférieure, il y a simplement électrolyse; au-dessus, tout mouvement périodique cesse, les gaz ne sont plus lumineux, mais le platine rougit dans le liquide, dont il reste séparé par une gaine de vapeur.

Dispositif Caldwell. — Un récipient isolant est divisé en deux parties, par une cloison également isolante, percée d'un petit trou et contenant un liquide conducteur dans lequel plongent deux électrodes, de part et d'autre de la cloison. L'appareil fonctionne sous 20 volts.

On a expliqué le fonctionnement de ces appareils par un effet Joule intense, auquel s'ajouterait un effet Peltier qui, se produisant soit à la surface du fil de platine, soit au sein de la menue colonne liquide réunissant les deux compartiments du Caldwell, provoquerait la vaporisation du liquide et la formation momentanée d'une petite chambre de vapeur coupant le courant.

Une explication plus plausible est la suivante (1). Nous avons vu que deux courants parallèles s'attirent. Un courant cylindrique pouvant être décomposé en filets parallèles, une certaine

(1) P. Bary. *Théorie de l'interrupteur de Wehnelt basé sur la striction.* Eclairage électrique du 13/4/07 et du 1/5/09.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pression, que l'on peut calculer, résulte de l'attraction de tous les filets et, si le conducteur est liquide ou gazeux, des mouvements résulteront de cette pression dans son sein. On conçoit donc que, l'intensité I du courant s'établissant presque instantanément, la pression rapidement croissante refoule le liquide avec une vitesse trop grande pour qu'il soit immédiatement remplacé par de l'autre; il se forme alors une chambre de vapeur et il y a rupture du courant avec étincelle. Dès que le courant est nul, la chambre de vapeur disparaît, le courant se rétablit et augmente, jusqu'au point où il atteint la valeur I, qui produit à nouveau la rupture.

Transformation des courants biphasés en triphasés. — SYSTÈME SCOTT. — Sur les deux noyaux d'un transformateur biphasé (enroulements primaires DD, fig. 257), on enroule deux bobines secondaires, dont l'une est reliée au milieu de l'autre, en C. Cherchons la condition pour obtenir les courants triphasés entre leurs bornes B_1, B_2, B_3. D'un point O correspondant au centre C de l'étoile, traçons (fig. 258) des vecteurs proportionnels aux forces électromotrices efficaces engendrées dans chacun des enroulements. Les courants alimentant le primaire DD étant biphasés, les forces électromotrices induites dans les enroulements CB_1 et B_2B_3 sont biphasées aussi. Les vecteurs représentatifs seront donc à angle droit. En outre, dans les bobines CB_2 et CB_3, les forces électromotrices sont toujours, à partir du point C, l'une concourante, l'autre divergente et égale, c'est-à-dire affectées de signes contraires, ou déphasées de π. Puisque leur valeur absolue est la même, nous

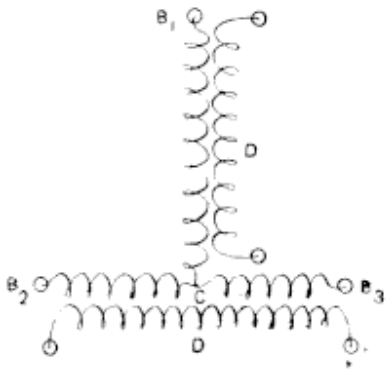


FIG. 257.

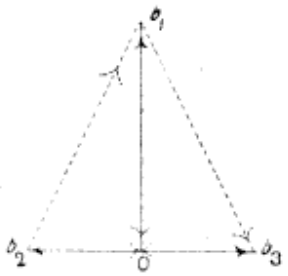


FIG. 258.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les représenterons par des vecteurs Ob_2 et Ob_3 égaux et opposés. La différence de potentiel entre les points B_1 et B_3 s'établira en soustrayant l'un des vecteurs Ob_1, Ob_3 de l'autre. Changeons Ob_1 de sens (flèche pointillée) et tirons $b_1 b_3$ dont la grandeur et la direction (flèche pointillée) représenteront la différence de potentiel cherchée. Procédons de même pour Ob_2 et Ob_1, nous trouvons $b_2 b_1$ (pointillé). Enfin, renversons la direction de Ob_3, qui s'ajoute dès lors à Ob_2 pour fournir $b_3 b_2$. Pour que les courants soient triphasés, il faut que les droites $b_1 b_3, b_2 b_1, b_3 b_2$, soient égales, c'est-à-dire que le triangle $b_1 b_2 b_3$ soit équilatéral.

Dans ces conditions, $Ob_2 = Ob_3 = Ob_1 \operatorname{tg} 30° = Ob_1/\sqrt{3}$.

En d'autres termes, la force électromotrice développée en CB_1 est $Ob_1 = \sqrt{3}\, Ob_2 = \sqrt{3}\, b_2 b_3/2$.

Comme les forces électromotrices développées sont proportionnelles aux nombres des spires des bobines, on voit que le nombre de spires de la bobine $CB_1 = \sqrt{3}\, n$, en appelant n celui des demi-bobines CB_2 et CB_3.

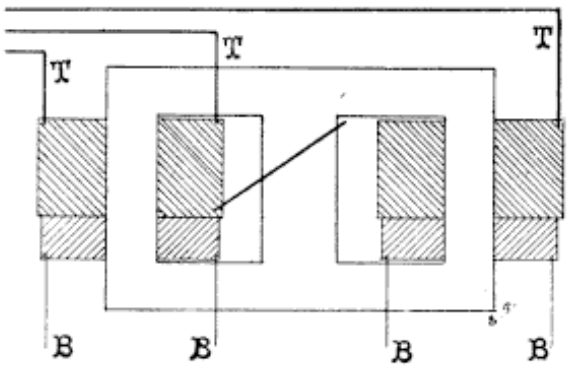


Fig. 259.

Pour réaliser un transformateur Scott, on relie les primaires de deux transformateurs à une ligne ou à un générateur biphasé BB, BB, (fig. 259).

L'un des secondaires porte, par exemple, 100 spires. L'autre en comporte 87, soit $50\sqrt{3}$ et l'une de ses extrémités est reliée au milieu du premier enroulement. Aux trois bornes libres, aboutissent les conducteurs triphasés TTT.

Transformation des courants triphasés en courants alternatifs. — Système Ulbricht. — Les trois circuits secondaires d'un transformateur triphasé peuvent, évidemment, fournir individuellement des courants alternatifs simples; mais, dans le cas d'installation d'éclairage, la difficulté est de les faire débiter également, de manière à équilibrer les 3 phases.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le système Ulbricht, on déconnecte un des secondaires OS_1 (fig. 260) du centre de l'étoile, pour le raccorder à la borne extrême d'un des deux autres circuits.

Les forces électromotrices engendrées dans les enroulements OS_2, OS_3 sont représentées par les vecteurs Ob_2, Ob_3 (fig. 261), et la différence de potentiel entre S_2 et S_3 par le vecteur $b_2\,b_3$.

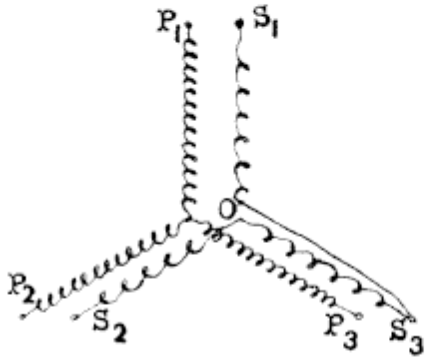


FIG. 260.

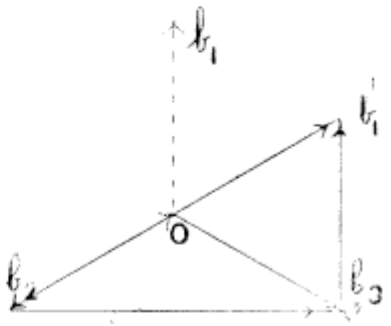


FIG. 261.

En S_3 vient se composer le vecteur de la force électromotrice développée dans la bobine OS_1. Or celui-ci a gardé, quelles que soient les connexions de la bobine, la direction et la grandeur Ob_1 (en pointillé). Portons donc à l'extrémité b_3 le vecteur $b_3\,b'_1$ parallèle à Ob_1, c'est-à-dire perpendiculaire à $b_2\,b_3$ et égal à $Ob_2 = Ob_3$ et joignons $b_2\,b'_1$. Les angles Ob_2b_3 et Ob_3b_2 valant 30°, il reste 60° pour l'angle $Ob_3\,b'_1$. Le triangle $Ob_3\,b'_1$ étant isocèle, les angles $b_3Ob'_1$ et $b_3\,b'_1O$ sont égaux et valent aussi 60°. Le triangle $Ob_3\,b'_1$ est donc équilatéral. Les côtés Ob_2 et Ob'_1 sont dans le prolongement l'un de l'autre, puisque les angles b_2Ob_3 et $b_3Ob'_1$ sont supplémentaires, d'où, pour la différence de potentiel résultante entre S_2 et S_1, $b_2Ob'_1 = 2Ob_2$.

Si les enroulements secondaires sont calculés pour développer chacun 55 volts, on trouvera 110 volts entre les bornes S_1 et S_2.

En y raccordant des circuits d'utilisation, les trois secondaires en série s'échaufferont également et donneront lieu à des réactions égales.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 2. — Courants alternatifs en continus et réciproquement.

Les appareils effectuant ces transformations comportent toujours des organes mobiles.

Moteur-générateur. — L'intermédiaire mis à contribution est l'énergie mécanique. Un moteur actionne directement un générateur fournissant le courant sous la forme désirée; solution simple et très sûre (fig. 262).

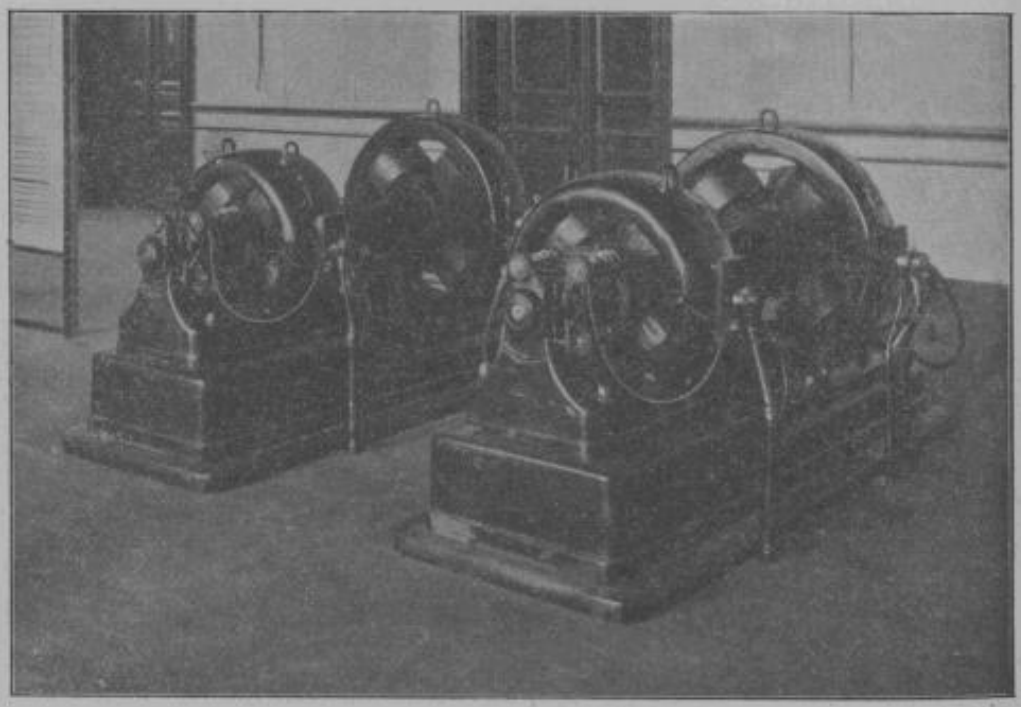


Fig. 262.

L'énergie électrique est donc d'abord transformée par le moteur en énergie mécanique; celle-ci est ensuite convertie en énergie électrique par la dynamo. Le moteur et la dynamo sont, en général, montés sur une plaque de fondation commune et leurs axes couplés directement. Comme chacune des deux machines est complètement indépendante de l'autre au point de vue électrique, le constructeur peut facilement employer ses types normaux et le dimensionnement de la dynamo à courant continu est donné par la tension de régime du réseau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Commutatrice ou convertisseur. — La commutatrice concentre, sur son induit, les deux enroulements des doubles appareils précédents et les réunit même souvent en un seul.

Nous avons vu que l'on peut faire débiter n'importe quelle espèce de courant à un induit Gramme, en raccordant des points convenablement choisis de son bobinage, à des bagues isolées sur lesquelles frottent des balais. Par exemple, en connectant à cinq bagues isolées, cinq points distants de $2\pi/5$, on obtient des courants pentaphasés aux bagues.

Si on alimente l'induit au moyen de courants de cette nature, il fonctionnera comme moteur synchrone polyphasé, et l'on pourra recueillir à son collecteur du courant continu, et vice versa. Les bagues sont placées de l'autre côté de l'induit par rapport au collecteur.

Le convertisseur est habituellement utilisé, de même d'ailleurs que le moteur-générateur, pour transformer des courants polyphasés en continus de tension moindre. On l'alimente à la tension alternative convenable, au moyen de transformateurs statiques.

Remarquons qu'une commutatrice dont l'arbre serait muni d'une poulie de transmission, peut présenter sept modes d'utilisation différents : 1° génératrice de courant continu ; 2° génératrice de courant alternatif ; 3° génératrice mixte débitant simultanément du courant alternatif et continu ; 4° moteur à courant alternatif ; 5° moteur à courant continu ; 6° transformateur de courant alternatif en courant continu ; 7° transformateur de courant continu en courant alternatif.

Essai des commutatrices. — On détermine le rapport de transformation à vide et on mesure les rendements.

Rapport de transformation a vide.— C'est le rapport entre la tension alternative efficace et la tension continue à vide. Nous en avons calculé précédemment la valeur.

Rendements. — On déterminera directement la puissance fournie du côté alternatif (wattmètre) et la puissance recueillie du côté continu (voltmètre et ampèremètre). On admet que les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

diverses phases sont également chargées. On charge du côté continu et on fait l'essai à tension alternative constante soit 1° en faisant varier le courant d'excitation au moyen d'un rhéostat à variation continue, de manière à obtenir un I_{eff} absorbé minimum ; soit 2° en laissant l'excitation constante après l'avoir réglée, de manière qu'à pleine charge le courant absorbé soit minimum, $\eta = e\,I/W$. On pourra représenter les résultats conformément aux diagrammes (fig. 263), en prenant comme abscisses les intensités continues I_c.

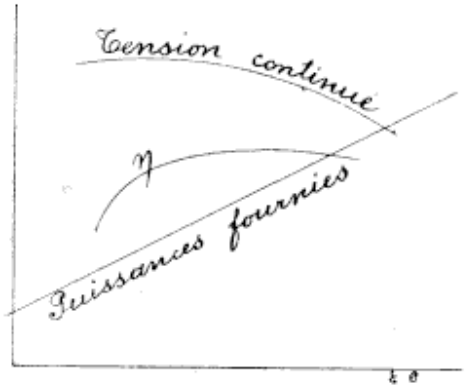


FIG. 263.

On remarque que, dans une commutatrice, la tension continue recueillie n'est pas rigoureusement constante, bien que la tension alternative le soit. On appelle *coefficient de régulation*, le rapport

$$\frac{e_c \text{ vide} - e_c \text{ charge}}{e_c \text{ charge}}.$$

Comparaison des deux systèmes précédents.—Dans le groupe moteur-générateur, la tension et la fréquence du système alternatif n'intéressent en rien le côté du courant continu : avantage important, qui permet l'emploi du groupe moteur-générateur dans certains cas où celui des commutatrices serait impossible (si la fréquence est trop élevée) et qui supprime généralement la nécessité des transformateurs statiques abaisseurs de tension. Un moteur synchrone peut être branché directement sur un réseau sous 10 000 volts.

En outre, les deux appareils sont réglables indépendamment.

Mais le groupe moteur-générateur présente, par rapport à la commutatrice, de sérieux inconvénients ; son coût de premier établissement est plus élevé et son rendement moins bon, surtout quand il s'agit d'appareils de grande puissance.

Le rendement d'un transformateur statique peut atteindre 97 à 98 %; celui d'une commutatrice, qui est approximativement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le même que celui d'un moteur synchrone, varie de 91 à 96 % et celui d'une dynamo à courant continu de 90 à 95 %. Ainsi, la commutatrice avec ses transformateurs abaisseurs, donne le rendement moyen de $0{,}975 \times 0{,}935 = 0{,}91$ ou de 0,935, suivant qu'elle exige ou non un transformateur-abaisseur, tandis que le groupe moteur-générateur ne fournit que le rendement de $0{,}935 \times 0{,}925 = 0{,}865$.

Permutatrice. — La partie tournante peut être réduite à un collecteur et alors les balais sont fixes, ou à des balais tournants auquel cas le collecteur est fixe. Considérons trois noyaux d'un transformateur triphasé sur chacun desquels sont passées, outre les bobines primaires, n bobines secondaires de nombres de spires proportionnels à $\sin \pi/n$, $\sin 3\pi/n$, $\sin 5\pi/n$, que nous numérotons 1, 2, ... n, dont les $n/2$ premières sont enroulées dans un sens, les autres en sens inverse. Les n bobines du premier noyau étant placées de haut en bas dans l'ordre 1, 2, 3 ... n, celles du second noyau sont, dans le même sens de succession :

$$\frac{n}{3} + 1, \frac{n}{3} + 2, \ldots n, 1, 2, \ldots 2\frac{n}{3}$$

et celles du 3e noyau

$$\frac{2n}{3} + 1, \frac{2n}{3} + 2, \ldots n, 1, 2, \ldots \frac{2n}{3}.$$

Raccordons ensemble trois à trois les diverses bobines secondaires, montons ces n groupes de trois bobines en tension, en les reliant successivement à des balais frottant sur des bagues isolées. Le circuit est fermé entre la première et la dernière bobine, formant un montage en polygone (absolument analogue à celui d'un anneau Gramme) dans chaque moitié duquel des forces électromotrices égales et opposées sont engendrées. A un moment donné, on trouvera par exemple une différence de potentiel maximum entre les bobines k et $k + n/2$. Au bout d'un temps T/n, cette différence de potentiel se sera déplacée d'une bobine de part et d'autre ; au bout d'un temps $2T/n$ de deux bobines et ainsi de suite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les n bagues isolées sont raccordées aux lames d'un collecteur entraîné par un petit moteur synchrone tournant à la vitesse de pulsation des courants triphasés. Deux balais fixes, frottant diamétralement sur le collecteur, recueilleront un courant continu d'autant plus constant que le nombre des sections sera plus grand.

Clapet ou redresseur électrolytique. — Si l'on prend un voltamètre contenant un électrolyte dans lequel plonge une lame d'aluminium, tantale, magnésium, etc., et une autre lame métallique (platine ou plomb par exemple), on observe qu'un courant allant de ce dernier métal à l'aluminium traverse l'appareil sans affaiblissement sensible, tandis qu'un courant dirigé en sens inverse ne peut le traverser que si la force électromotrice dont on dispose est supérieure à une certaine valeur. En d'autres termes, *l'appareil laisse passer un courant quand l'aluminium ou ses congénères sont cathodes et l'arrête quand l'aluminium est anode*, la différence de potentiel entre les lames étant alors inférieure à une certaine limite.

Cette limite dépend de l'électrolyte. Avec des solutions aqueuses d'acide sulfurique, la différence de potentiel maximum, que l'on peut appliquer aux deux lames sans passage du courant, ne dépasse guère 20 volts; l'emploi de sels alcalins permet, comme l'a montré M. Pollak, de porter cette différence de potentiel à 140 volts et même 200 volts, si l'on a soin de faire subir à la plaque une préparation préliminaire. Le phosphate de potassium en solution saturée donne de bons résultats. Le phosphate d'ammonium également. En constituant une électrode active, formée d'un alliage de 0,95 d'aluminium avec 0,05 de zinc, une électrode passive en fer, acier ou fonte et le dernier des électrolytes cités ci-dessus, on constitue un redresseur dont le fonctionnement ne donne lieu, ni à détérioration sensible des électrodes, ni à variation importante de l'électrolyte. Les borates alcalins fournissent également un bon électrolyte, de faible prix de revient. On les prépare simplement sur place, en dissolvant l'acide borique du commerce dans de l'eau ammoniacale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'effet est dû à la propriété suivante (1) : lorsqu'on emploie les métaux dont il s'agit comme anode, dans un des électrolytes indiqués, il se forme à leur surface une couche solide, mince et poreuse, qui emprisonne une seconde couche, gazeuse celle-là, encore plus mince que la précédente. L'épaisseur de la couche gazeuse augmente avec la tension. Quand celle-ci dépasse la tension critique, l'accroissement de la couche gazeuse cesse et des étincelles éclatent livrant passage au courant.

Cette tension critique dépend de l'électrolyte et, pour un même électrolyte, croît en sens inverse de la concentration.

La résistance de la couche gazeuse d'une anode, aux environs de la tension critique de formation, se chiffre par millions d'ohms par cm^2. Comme son épaisseur est excessivement faible, il en résulte que l'on peut assimiler ce système à un véritable condensateur, dont le diélectrique est constitué par une couche de gaz et dont les armatures sont, l'une le métal de l'anode, l'autre le liquide électrolysé. La capacité dépend de la nature du métal dont est formée l'anode et non de l'électrolyte.

Formation. — Lorsqu'on met la soupape en service, il faut la former, c'est-à-dire constituer la pellicule isolante en y envoyant le courant alternatif avec une tension graduellement croissante, en intercalant dans le circuit, soit une résistance, soit une bobine de selfinduction que l'on diminue progressivement. La formation est terminée en une dizaine de secondes.

On peut aussi opérer avec une source constante de 110 volts, que l'on met en tension avec la soupape, en interposant une lampe à incandescence de 110 volts. L'aluminium étant anode, l'éclat de la lampe diminue progressivement. On inverse le courant pour réduire la pellicule, on commute de nouveau et ainsi de suite. Quand la lampe reste sombre, l'aluminium fonctionnant comme anode, la soupape est formée.

(1) G. Schultze. *La fabrication des condensateurs à forte capacité : solution électro-chimique du problème.* La Lumière électrique du 29 mai 1909, p. 279.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

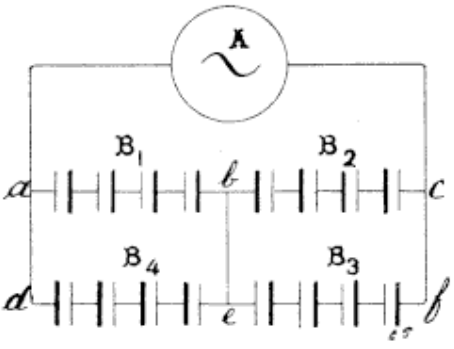


FIG. 264.

Montage Graetz. — M. Graetz a imaginé un montage permettant de transformer complètement les deux ondes d'un courant alternatif en courant continu de sens constant. 4 batteries B_1, B_2, B_3, B_4 (fig. 264) sont composées chacune de 4 éléments en série, formés d'une plaque d'aluminium et d'une plaque en charbon de 64 cm^2 de surface, distantes de 4 mm et plongeant dans de l'eau saturée d'alun. Chacun de ces éléments équilibre une force électromotrice de 22 volts et les 8 existant chaque fois en tension, peuvent donc équilibrer $8 \times 22 = 176$ volts.

Quand a est + par rapport à c, le courant suit le trajet $abefc$; quand a est — par rapport à c, c'est le trajet $cbeda$; il reste de même sens dans la branche be.

APPLICATIONS. — On peut se servir du clapet électrolytique pour charger des accumulateurs au moyen d'un courant alternatif, et comme disjoncteur dans la charge des accumulateurs au moyen du courant continu.

Convertisseur Cowper-Hewit. — Après avoir amorcé un courant de sens déterminé dans un tube vide d'air muni d'électrodes en mercure, Cowper-Hewit essaya d'inverser ce courant, mais sans succès, parce que l'électrode qui devenait cathode n'émettait pas les ions nécessaires à la conduction du courant. Il conclut de cette expérience qu'un tube ayant une électrode en mercure, peut constituer une soupape électrique, c'est-à-dire un appareil ne laissant passer que des courants d'un sens déterminé.

POUR COURANT TRIPHASÉ. — Il munit une ampoule en verre d'une électrode en mercure et de 3 électrodes métalliques suffisamment distantes, et connecta ces dernières aux 3 bornes d'une génératrice à courants triphasés montée en étoile, dont le centre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

était relié à l'électrode en mercure. Il constata que seules les ondes positives du courant passaient aux électrodes métalliques, et se superposaient dans le circuit connectant le mercure au centre de l'étoile, en y donnant un courant de sens invariable. Grâce au chevauchement des trois ondes, le courant traversant le mercure ne s'inverse jamais; la surface de cette électrode est donc maintenue constamment à l'état de désagrégation et, par conséquent, n'a pas de tendance a interrompre le courant dans le tronçon commun.

Pour alternatif simple.—L'appareil comporte une ampoule de cristal (fig. 265) complètement vide d'air. Elle porte deux électrodes positives P, P' en carbone et une électrode négative N en mercure. Une électrode auxiliaire également en mercure, est placée à côté de la précédente et sert à l'allumage du convertisseur. Le courant arrive aux électrodes par des fils de platine traversant le cristal.

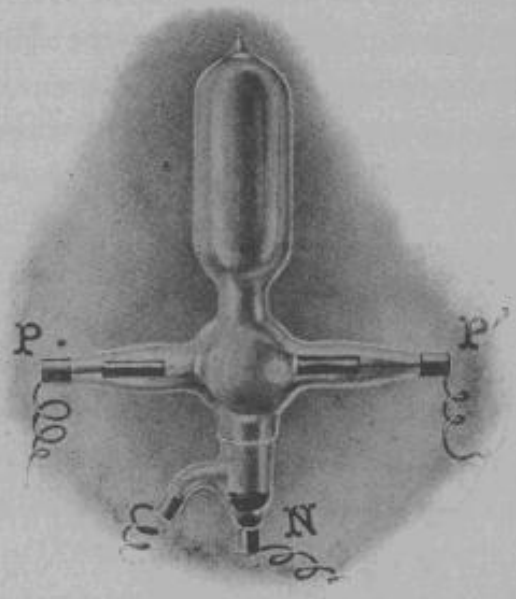


Fig. 265.

On raccorde les bornes P, P' à un auto-transformateur dont le milieu se rattache à N. C'est ce dernier circuit qui sera parcouru par un courant toujours de même sens, car si P est anode pour une des ondes, P' l'est à son tour pour l'onde consécutive. N sera donc relié à la barre positive du circuit d'utilisation et le milieu de l'auto-transformateur à la barre négative.

Les ondulations du courant sont atténuées par une bobine de self qui maintient aussi le convertisseur en fonctionnement.

La Société Westinghouse construit des appareils de l'espèce, capables de débiter 3 à 30 ampères.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le rendement, en y comprenant le fonctionnement du transformateur, atteint environ 80 % pour la tension de 120 volts continus ; il augmente avec la tension.

---

§ 3. — Courant continu en continu.

Les appareils de cette classe appartiennent tous au type moteur-générateur.

Survolteur.— Dynamo série.— Dans une installation alimentée sous différence de potentiel constante, si la consommation de courant devient subitement exagérée, par suite du démarrage simultané de moteurs par exemple, la perte de charge augmentant dans les circuits d'alimentation, il en résulte une baisse générale de voltage et toute l'installation fonctionne dans de mauvaises conditions.

Pour y parer, on fait traverser par le courant total une dynamo série actionnée par un moteur shunt alimenté aux barres du tableau. Le système est réglé de manière que la consommation de courant augmentant, le voltage s'accroît dans la même proportion (machine série non saturée, branche en ligne droite de la caractéristique totale) et ainsi la chute de voltage est automatiquement compensée.

Dynamo en dérivation. — Nous avons vu un autre cas de survoltage par dynamo shunt, p. 185 fig. 135, quand la machine chargeant des accumulateurs est de voltage insuffisant.

Dynamo compound différentielle. — Enfin, nous avons également étudié précédemment, lors de l'examen du fonctionnement des batteries-tampons, l'emploi de dynamos compounds différentielles, ayant pour effet de mettre automatiquement les accumulateurs en charge ou en décharge, tout en maintenant constante la charge de la génératrice.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XI.

Les lignes électriques.

§ I. — Généralités. Choix du conducteur. Circuits aériens.

Généralités. — Sauf dans la télégraphie sans fil, qui constitue un cas particulier de la télégraphie ordinaire, les générateurs électriques sont reliés aux récepteurs, au moyen de canalisations aériennes ou souterraines. Les premières comportent des conducteurs fixés à des appuis en bois ou en fer par l'intermédiaire d'isolateurs. Les secondes présentent des conducteurs supportés ou élongés dans des canivaux ou dans les égouts, ou simplement enfouis dans le sol.

Lorsqu'il s'agit de courants faibles, un seul conducteur peut être utilisé et l'on se sert, en guise de second conducteur, de canalisations comme celles d'eau ou de gaz (celle-ci moins bonne à cause des joints garnis de mastic plus ou moins isolant) ou de la terre elle-même. On met cette dernière à contribution, au moyen de plaques conductrices, par exemple en zinc, d'au moins 50 × 50 cm, enfouies dans le sol humide. Une bonne terre ne mesure que quelques ohms de résistance. L'emploi de la terre a été formellement prohibé jusqu'ici dans le cas de courants intenses, par suite de l'emprunt partiel des canalisations étrangères voisines par le courant. Cependant, en raison du grand intérêt économique que ce mode de conduction présente, des essais très sérieux et très importants ont été récemment tentés en Suisse et en France. Ils n'ont pas encore abouti (1).

(1) E. Brylinsky. *Sur l'emploi de la terre comme partie d'un circuit électrique.* Congrès de Marseille, t. I, p. 240.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Choix du conducteur. — Au point de vue industriel et à condition d'obtenir le même effet électrique, c'est le prix des matériaux qu'il y a lieu d'envisager.

Le prix total P_1 du conducteur de section s_1, de poids et de prix spécifiques δ_1, p_1, entrant dans la constitution du circuit de longueur l sera

$$P_1 = s_1 \, l \, \delta_1 \, p_1. \qquad (1)$$

Pour un autre métal, on aura

$$P_2 = s_2 \, l \, \delta_2 \, p_2. \qquad (2)$$

Pour que les deux conducteurs véhiculant le courant I soient équivalents au point de vue électrique, il faut que leur résistance soit la même. Leurs sections respectives devront donc être définies en fonction de la résistance. Or on a : $R = \rho_1 \, l/s_1 = \rho_2 \, l/s_2$, d'où $s_1 = \rho_1 \, l/R$; $s_2 = \rho_2 \, l/R$. En remplaçant s_1 et s_2 par leur valeur dans (1) et (2), il vient :

$$P_1 = \frac{\rho_1 \, l^2 \, \delta_1 \, p_1}{R}, \quad P_2 = \frac{\rho_2 \, l^2 \, \delta_2 \, p_2}{R},$$

d'où

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1 \, \delta_1 \, p_1}{\rho_2 \, \delta_2 \, p_2}.$$

A résistance égale du conducteur, le prix P_1 sera donc $\lessgtr P_2$ suivant que $\rho_1 \, \delta_1 \, p_1$ sera $\lessgtr \rho_2 \, \delta_2 \, p_2$ ou $p_1 \lessgtr p_2 \dfrac{\rho_2 \, \delta_2}{\rho_1 \, \delta_1}$.

Formons le produit $\rho\delta$ pour les principaux métaux utilisés dans les canalisations industrielles.

Nature du métal	ρ en microhms à 0° C	δ	$\rho\delta$
Fer.	10	7,8	78
Aluminium	2,9	2,6	7,54
Cuivre.	1,6	8,9	14,24

Nous aurons respectivement pour le fer et l'aluminium relativement au cuivre :

$$\frac{p_2 \times 14{,}24}{78} = 0{,}183 \, p_2 \text{ et } \frac{p_2 \times 14{,}24}{7{,}54} = 1{,}89 \, p_2$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ce qui nous permet de conclure qu'au point de vue du coût, le fer et l'aluminium l'emportent sur le cuivre, dès que leurs prix sont respectivement inférieurs à 0,183 et 1,89 fois celui de ce dernier. Mais le prix d'achat, s'il constitue un élément très important du problème, n'en représente qu'une face.

Il y a encore lieu de tenir compte de divers autres facteurs importants et notamment de la résistance aux influences atmosphériques, de la stabilité mécanique de la ligne, etc.

Fer. — Le fer est tenace (charge de rupture 40 kg par millimètre carré) et peu coûteux. Mais il se détériore rapidement. Même galvanisé, on ne peut guère compter, sous nos climats, sur une durée de plus de quinze ans. Dès lors, si l'on fait entrer en ligne de compte les frais d'intérêts et d'amortissement, on trouve qu'il revient plus cher que le cuivre. En outre, il est très pondéreux relativement à sa conductibilité, ce qui majore le coût du transport et de la pose. Il a d'ailleurs le vice de posséder, en raison de sa grande perméabilité, un coefficient de self-induction élevé, qui le rend inapte à entrer dans la constitution des longs circuits parcourus par des courants alternatifs. Son emploi, limité aux courants faibles, se restreint de plus en plus.

Cuivre et dérivés. — Le métal par excellence pour les usages électriques est le cuivre. Sa conductibilité est très élevée; il résiste parfaitement aux intempéries, en se recouvrant d'une patine d'oxyde stable et inerte, qui protège le métal sous-jacent contre toute attaque ultérieure. Dans des conditions ordinaires, on peut compter sur une durée d'au moins trente ans. Après sa mise hors d'usage, il vaut encore plus de la moitié de son prix d'achat. Sa grande valeur tente les voleurs; aussi, les lignes doivent-elles être surveillées, particulièrement aux environs des grandes villes.

On pare à la résistance mécanique relativement peu élevée du cuivre pur (28 kg par millimètre carré) en y alliant de petites quantités d'étain et en le désoxydant par le phosphore ou le silicium. On obtient ainsi des bronzes phosphoreux ou silicieux de diverses conductibilités et résistances mécaniques, ces deux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

facteurs marchant en sens inverse l'un de l'autre. Par exemple, le bronze Montefiore de 97 % de conductibilité résiste à 45 kg par millimètre carré, celui de 30 % ne rompt que sous une charge de 80 kg par millimètre carré. L'industrie fournit aussi des fils compounds ou bimétalliques, constitués d'une âme d'acier recouverte de cuivre doux, dont les propriétés mécaniques sont analogues à celles des bronzes.

Le diamètre des conducteurs des lignes aériennes ne dépasse pas 8 à 9 millimètres, exceptionnellement 10 à 11. Au delà de ces dimensions, la pose devient impossible et il faut recourir aux conducteurs cordés.

Aluminium [1]. — On avait fondé sur lui beaucoup d'espérances, en raison de sa grande légèreté, jointe à une conductance élevée et à une résistance mécanique suffisante (20 kg par millimètre carré). Mais il n'est pas inattaquable par les agents atmosphériques comme on l'avait cru tout d'abord et son grand coefficient de dilatation facilite, quand la température s'élève, le mélange des fils de mince diamètre. Les contacts sont aussi favorisés par sa légèreté sous l'action du vent. En outre, il présente des difficultés de soudage. Pour ces motifs, l'emploi de l'aluminium se confine jusqu'ici aux longues lignes de peu de conducteurs de gros diamètres, établies dans des pays dont l'atmosphère est pure et sèche.

Tension à donner au fil. — Le fil doit être fixé de manière à pouvoir résister, quelles que soient les conditions atmosphériques. La tension à lui donner variera suivant sa nature, sa section, la portée (distance horizontale des appuis), la température au moment de la pose. En outre, il faudra tenir compte pour les fils minces, de l'action du vent, du givre, de la neige et de la glace.

Action du vent. — Le vent agit surtout par les trépidations répétées qu'il imprime au fil et qui le plient alternativement

---

[1] Massin, *Conducteurs téléphoniques en aluminium* (Annales télégraphiques, 1899, p. 200).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans un sens et dans l'autre. Ces pliures acquièrent leur maximum d'effet aux points d'attache. On annihile leur action nocive, quand les vents sont violents et fréquents (littoral), au moyen de sourdines, dont nous donnerons plus loin la description.

Action du givre. — Le givre se produit par les temps froids et brumeux, l'air étant calme. Il affecte la forme de menus filaments de glace serrés les uns contre les autres (fig. 266), attachés par une extrémité au fil et plus ou moins développés. Une section droite, perpendiculaire au conducteur, donne l'aspect d'une houppe soyeuse, allongée verticalement.



Fig. 266.

Nous avons trouvé, pour la surcharge en cas de givre (1), *60 grammes par mètre courant sur du fil de 1,4 mm de diamètre.* Le fil lui-même ne pesait que 13,7 grammes par mètre.

Le givre est aisément soufflé par le vent; de faibles, mais brusques trépidations imprimées au fil le détachent immédiatement. Son action est d'autant plus importante, que le fil est plus mince et la portée plus longue. L'expérience a démontré que, dans notre pays, il convient, à ce point de vue, de ne pas se tenir en dessous du diamètre de 1,4 mm.

Neige et glace. — Dans les pays montagneux, où les précipitations atmosphériques sont nombreuses et abondantes, celles-ci peuvent acquérir une importance telle, qu'il devient nécessaire d'en tenir compte.

De l'examen de chiffres recueillis dans l'Europe centrale, M. Pillonel (2) admet comme surcharges-limites de neige et de glace :

---

(1) *Les effets du givre sur les fils téléphoniques.* Bulletin de la Société belge d'Electriciens de 1900. p. 52.

(2) *L'équilibre des fils électriques. Conditions de pose.* Brochure de 29 p. chez l'auteur à Martigny (Suisse).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

400 grammes par mètre courant pour le 1 millimètre
1 070 » » » 3 »
1 500 » » » 5 »

Aussi en Suisse, les portées des lignes aériennes à courants faibles, sur poteaux en bois, ne peuvent réglementairement dépasser 50 m pour les conducteurs jusque 100 mm^2 de section totale ($d = 11{,}5$ mm).

Effet de la température. — La courbe que prend un brin élastique tendu librement entre deux points d'appui est une chaînette. On simplifie notablement les formules, tout en leur laissant une exactitude suffisante pour la pratique, en assimilant la chaînette à une parabole. On obtient dès lors, pour la longueur l d'un fil pesant p kg par unité de longueur, tendu à T kg sur une portée de a mètres :

$$l = a + \frac{a^3 p^2}{24\,T^2}. \qquad (1)$$

Lorsque la température s'abaisse de $\vartheta°$, le fil se contracte et sa longueur devient

$$l' = l\,(1 - \alpha\vartheta). \qquad (2)$$

Pour le cuivre, $\alpha = 0{,}000\,016\,554$.

Mais la contraction augmente la tension qui devient T', et de l'excès de tension T'—T résulte un allongement. La longueur l' se modifie conséquemment et prend la valeur :

$$l'' = l'\left[1 + \frac{e}{s}\,(T' - T)\right],$$

e étant l'allongement que prend un fil du métal dont il s'agit, de 1 millimètre carré de section et de 1 mètre de longueur, sous l'effort de 1 kilogramme, et s sa section, exprimée en millimètres carrés. Pour le cuivre $e = 0{,}000\,078$.

Afin de simplifier l'équation, posons $e/s = e'$, qui représentera l'allongement de 1 mètre *du fil considéré* sous l'effort de 1 kilogramme dans les limites de l'élasticité,

$$l'' = l'\left[1 + e'\,(T' - T)\right] \qquad (3)$$

Nous avons alors une nouvelle chaînette, dont les facteurs a, p', l'', T' sont liés par l'équation générale (1).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais il est facile de démontrer que le poids p' par mètre courant reste sensiblement le même après l'altération de forme due à la variation de température, c'est-à-dire qu'on peut poser $p' = p$. En effet, le poids compris dans *la portée* ne varie pas, quels que soient l'allongement ou la contraction du fil

$$pl = p' l''$$

d'où

$$p' = p \frac{l}{l''} = \frac{p}{(1 \pm \alpha\vartheta)[1 \mp e'(T' - T)]}.$$

Etant donnée l'extrême petitesse des coefficients α et $e' = e/s$, le dénominateur ne diffère de l'unité que d'une quantité négligeable. Donc $p' = p$ et l'on a

$$l'' = a + \frac{a^3 p^2}{24\, T'^2}. \tag{4}$$

Remplaçant l'' par sa valeur, chassant le dénominateur et ordonnant par rapport aux puissances décroissantes de T'

$$T'^3 + T'^2 \left(\frac{l' - a - l' e' T}{l' e'}\right) = \frac{a^3 p^2}{24\, l' e'}. \tag{5}$$

Cette équation, dont la solution réelle s'obtient d'un seul coup de règle à calcul (1), permet de résoudre tous les cas qui peuvent se présenter : p, α et $e' = e/s$ sont en effet connus pour le fil dont on fait usage. On se donne a, et T représente la tension normale à adopter pour une température moyenne. ϑ est la différence entre cette température moyenne et celle pour laquelle on veut calculer la tension. ϑ est positif ou négatif selon que la température est inférieure ou supérieure à la température normale adoptée. En fixant cette dernière à 18° et estimant que T doit alors être au plus égale au quart de la charge de rupture totale, M. Cloeren a calculé des tableaux qui contiennent les données utiles relatives aux fils de bronze les plus employés.

---

(1) *Méthode Cloeren-Bour pour la résolution générale des équations du 2e degré au moyen de la règle à calcul.* Bulletin Association Ingénieurs Montefiore, nos 10-11-12 de 1898.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dès que l'on a T', la longueur du fil se détermine par l'équation (4) et la flèche se tire de la relation

$$f = \frac{p a^2}{8 T'}. \tag{6}$$

Appelons t et t' les tensions par unité de section et δ le poids de l'unité de longueur sous l'unité de section. $T = st$, $T' = st'$ et $p = s\delta$. En outre $e' = e/s$.

En remplaçant dans l'équation (5), il vient

$$s^3 t'^3 + \frac{s^3 t'^2 (l' - a - l'et)}{l' e} = \frac{a^3 s^3 \delta^2}{24 l' e}.$$

La section disparaît, il reste

$$t'^3 + \frac{t'^2 (l' - a - l'et)}{l' e} = \frac{a^3 \delta^2}{24 l' e}. \tag{7}$$

La tension unitaire à laquelle on arrive est *indépendante de la section ; elle ne dépend que des facteurs physiques du fil et de la tension unitaire de départ t.*

Opérons les mêmes substitutions dans les équations (4) et (6), nous avons

$$l'' = a + \frac{a^3 \delta^2}{24 t'^2}$$

$$f' = \frac{a^2 \delta}{8 t'}.$$

Les longueurs et flèches sont aussi indépendantes de la section.

On en tire la conclusion que *l'étude des tensions de pose, longueurs et flèches des divers fils d'un métal quelconque, peut se réduire à celle d'un seul fil d'un millimètre carré de section.* Pour obtenir les tensions sous un diamètre quelconque, il suffira de multiplier la tension unitaire par la section ; les longueurs et flèches en sont indépendantes.

En nous basant sur ces remarques, nous avons construit les abaques (fig. 267, 268, 269, 270), relatifs aux tensions de pose et aux flèches des fils de cuivre et d'aluminium.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

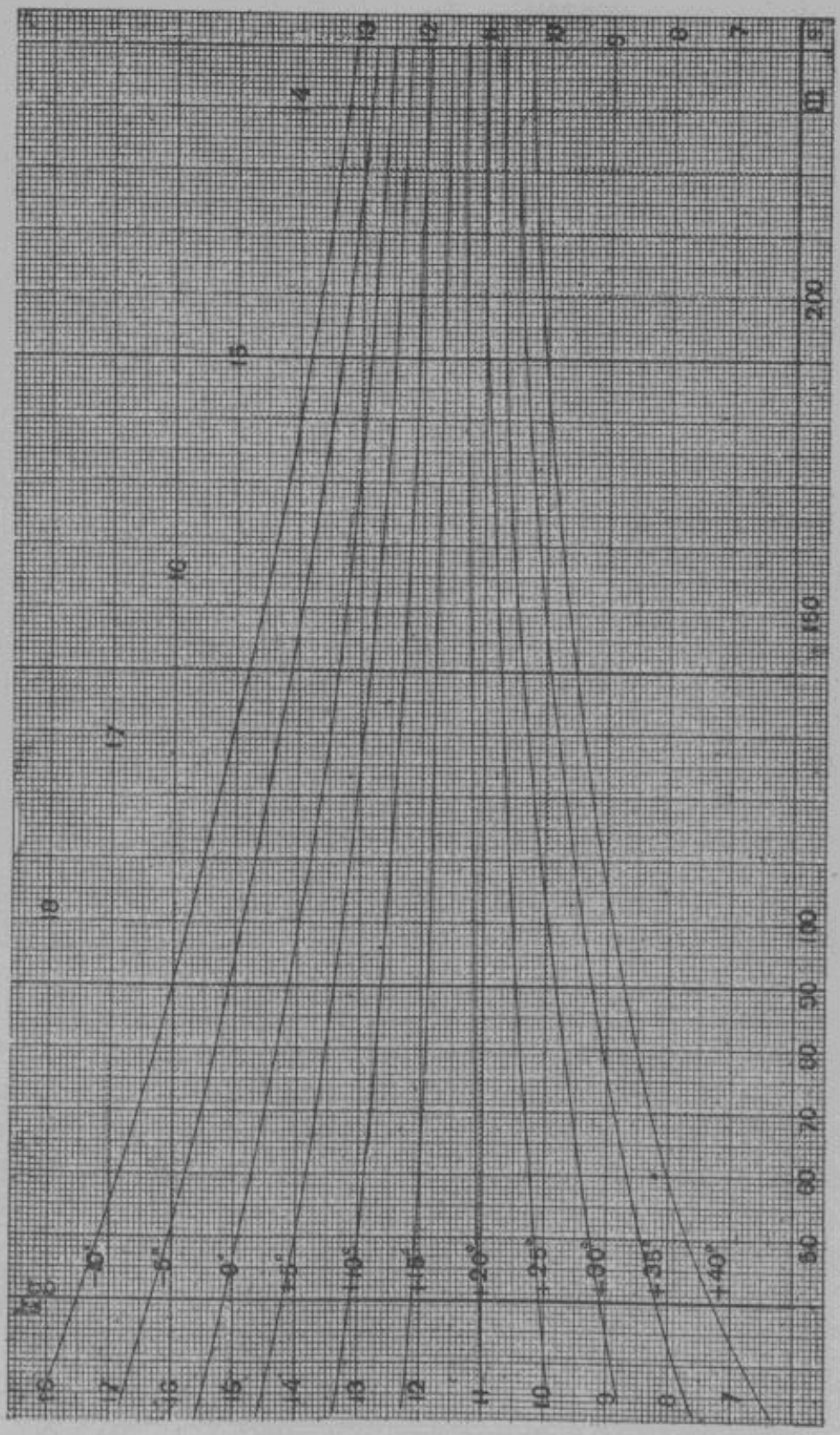


Fig. 267 — Tension des fils de cuivre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

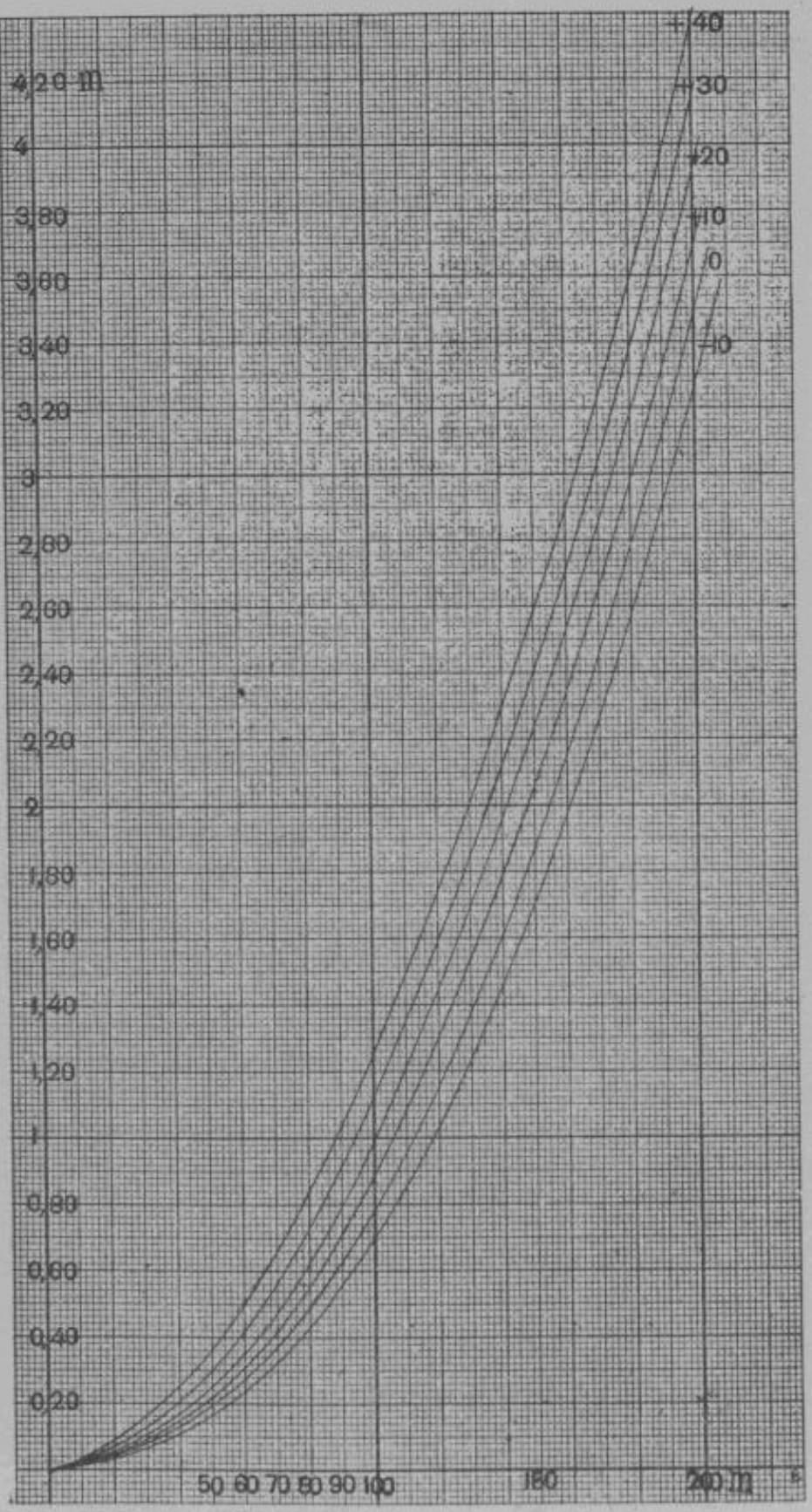


Fig. 268. — Flèches des fils de cuivre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

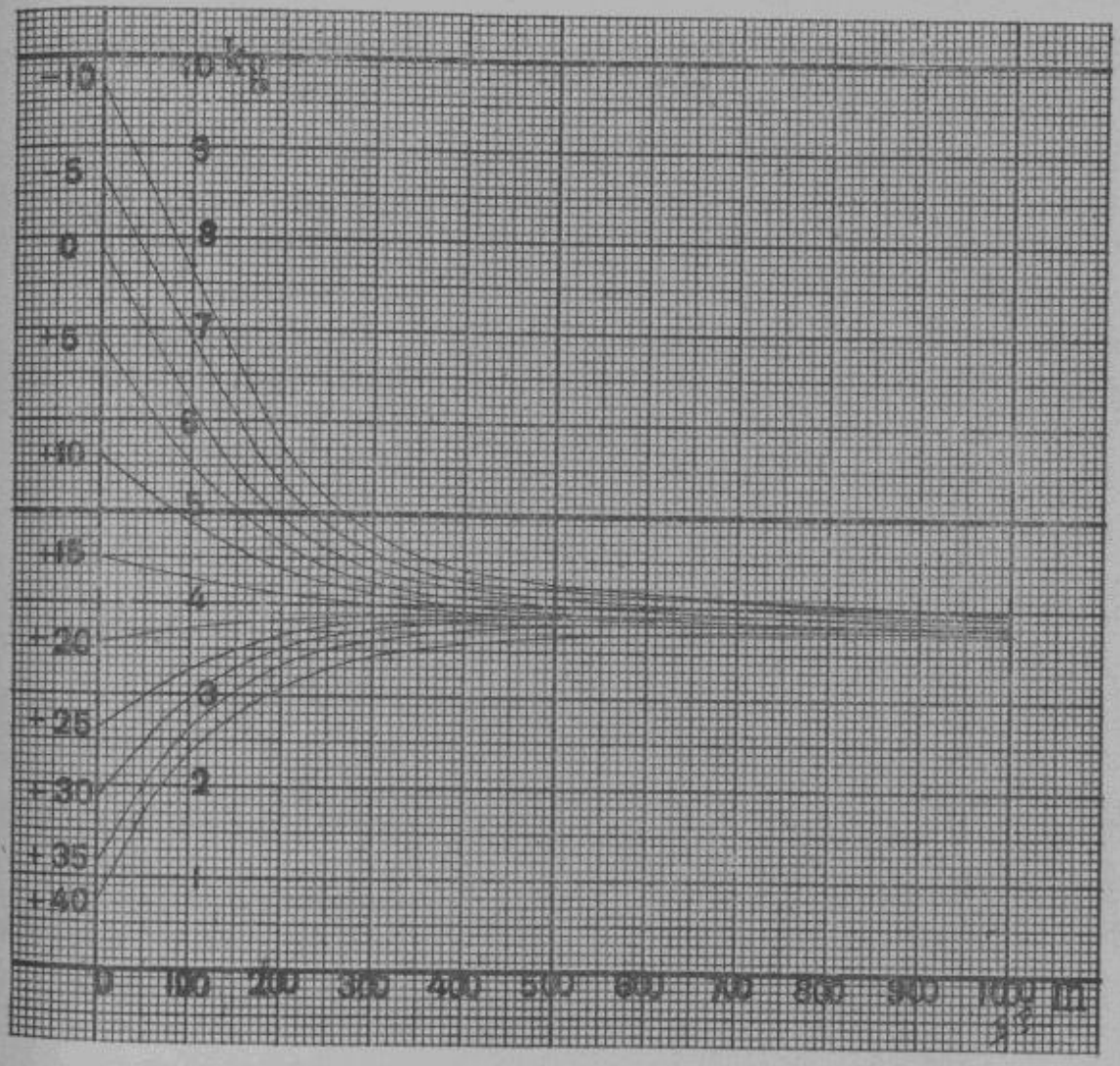


Fig. 269. — Tensions des fils d'aluminium.

Pour les premiers, la résistance kilométrique d'un fil d'un millimètre carré de section est de 16 ohms et son poids 8,9 kg ; pour les seconds, les chiffres correspondants sont 30 ohms et 2,77 kg.

En outre, pour l'aluminium $\alpha = 0{,}000\,023\,13$ et $e = 0{,}000\,13$.

Emploi du dynamomètre. — La tension donnée au fil se mesure au dynamomètre. Celui-ci se compose d'une tige terminée d'un côté par un crochet, de l'autre par un plateau coulissant dans une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

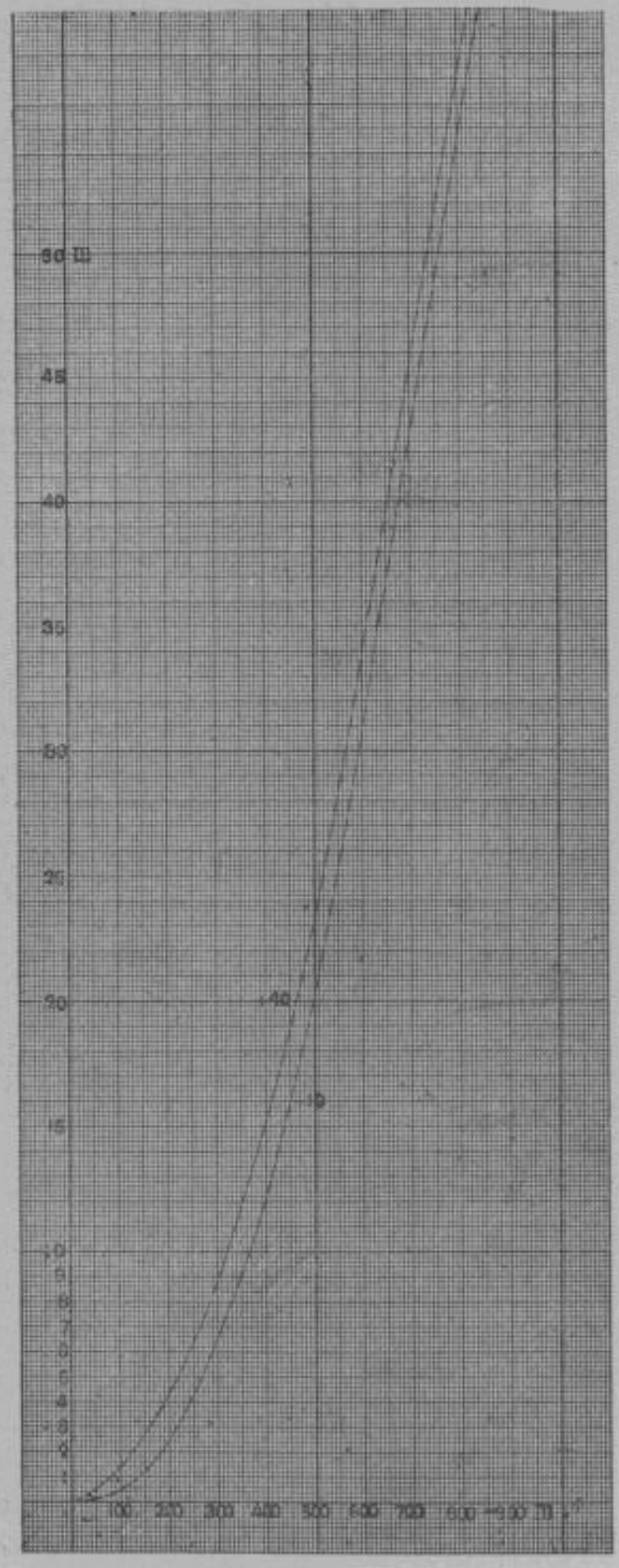


Fig. 270. — Flèches des fils d'aluminium.

enveloppe cylindrique en comprimant un fort ressort à boudin. Un index fixé sur la tige se déplace le long d'une graduation établie empiriquement.

La température est déterminée au moyen d'un thermomètre de poche protégé par une gaine métallique, dont on munit les brigades d'ouvriers procédant à la pose des lignes.

Pince à tirer. — On exerce l'effort de traction nécessaire pour amener le fil à la tension voulue, par l'intermédiaire d'une pince à tirer (fig. 271, 272, 273).

Elle se compose de deux mâchoires pivotant l'une et l'autre autour d'un axe; l'une est actionnée par une bielle au moyen d'un tirant coulissant dans une boutonnière pratiquée dans une flasque commune.

Placé entre les mâchoires, le fil s'y trouve coincé dès que l'on tire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur la bielle, et le serrage est d'autant plus énergique que l'on tire plus fortement.

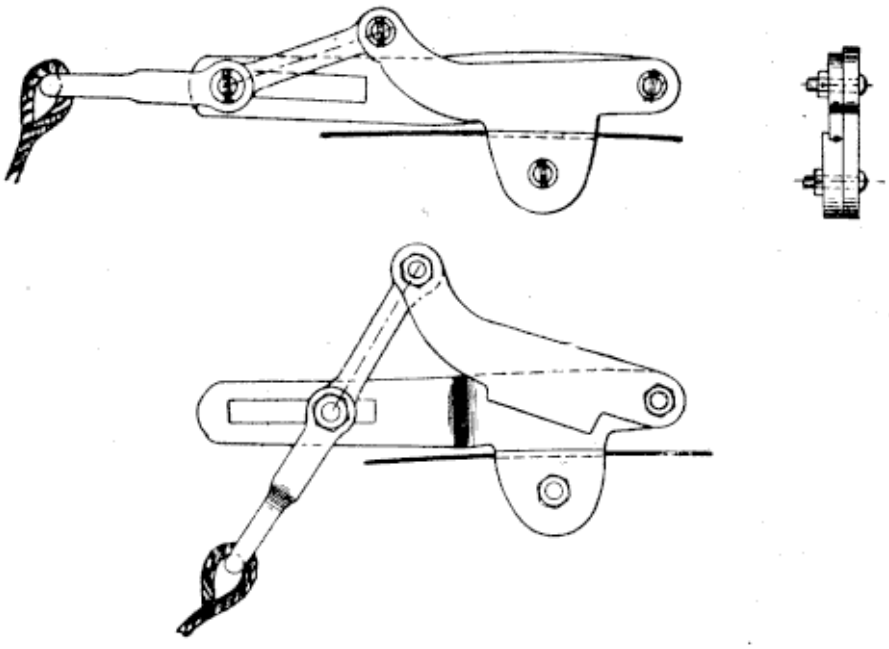


Fig. 271, 272, 273.

Joints. — Le conducteur est fourni en rouleaux présentant une longueur déterminée. Il faut donc réunir entre eux des bouts de fil, ce qui ne laisse pas de présenter quelque difficulté. Un joint doit, en effet, offrir une résistance à la traction et une conductibilité au moins égales à celles des brins eux-mêmes.

Au point de vue de la résistance mécanique, il est prudent de ne pas admettre les dispositifs dans lesquels le métal résistant à la traction est tordu, car la torsion réduit considérablement sa ténacité. Cette réduction peut atteindre 30 % pour les fils en bronze tenace de 1,4 millimètre.

La conductibilité du joint est assurée par la soudure. La présence de celle-ci implique le chauffage du fil. Or un métal chauffé trop fortement se recuit et perd la ténacité acquise par l'écrouissage. On utilisera donc une soudure fluide contenant en poids au moins deux d'étain pour un de plomb, et l'on soudera à la colophane. L'emploi d'acide pour décaper, doit être proscrit, en raison de son action corrosive sur le cuivre et de la difficulté de l'éliminer complètement, l'opération terminée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Manchon Baron. — Il est surtout employé en France. Le manchon Baron (fig. 274) est un petit tube aplati, en bronze, dans lequel les conducteurs à réunir entrent à frottement doux.

On décape le manchon et les fils avec un petit pinceau trempé dans du chlorure de zinc, dont la neutralité est assurée par la présence d'un morceau de zinc dans le liquide. Le manchon est chauffé avec un fer à souder ; on fait couler vivement la soudure, de manière qu'elle le remplisse bien ; enfin, on laisse refroidir lentement le manchon et on le lave à l'éponge pour enlever le chlorure de zinc.

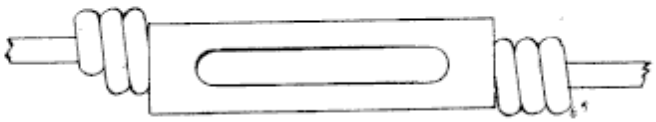


Fig. 274.

Comme la figure l'indique, pour le fil de 3 millimètres et au-dessous, chaque brin est enroulé sur l'autre de quelques spires, contre les côtés extrêmes du manchon. Ces spires obturent les ouvertures latérales du manchon, de manière à s'opposer à toute fuite de soudure avant sa prise. Les conducteurs de diamètre plus fort, sont spécialement recourbés dans l'encoche que présente alors chacune des faces terminales du manchon.

Joint Britannia. – Pour façonner le joint Britannia (fig. 275), on juxtapose les extrémités des deux fils et on les réunit par 30 à 40 spires serrées d'un fil de cuivre étamé de plus faible diamètre. Il faut avoir soin de saupoudrer légèrement de colophane les extrémités à réunir, avant d'enrouler le fil de ligature, afin de faciliter la prise de la soudure entre les fils de ligne. On pourra admettre, pour des conducteurs de 5 millimètres, du fil étamé de 1,5 à 2 millimètres et pour les conducteurs plus minces, du 1 à 1,5.



Fig. 275.

Joint Arld. — Le soudage implique l'emploi de tout un matériel pondéreux et encombrant : fers à souder, réchauds, etc. que l'on a cherché à éviter.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans le joint Arld, employé sur une grande échelle en Allemagne, les extrémités des fils à réunir sont enfilées, en sens inverses, dans un manchon de cuivre électrolytique, dont la section intérieure correspond très sensiblement à celle des fils. Ces extrémités sont poussées de manière à dépasser un peu celles

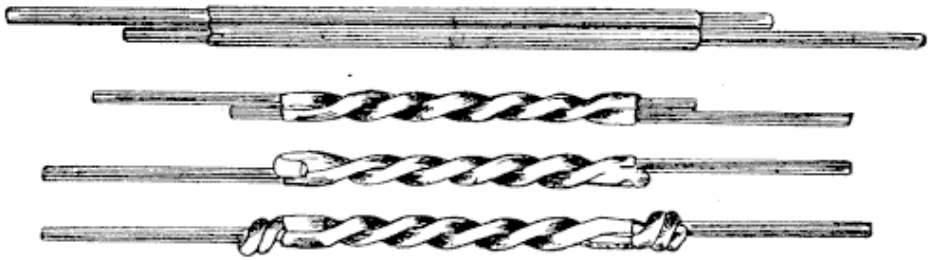


Fig 276, 277, 278 et 279.

du manchon (fig. 276). Celui-ci est ensuite pincé fortement à ses extrémités en même temps que les fils, au moyen de pinces spéciales (fig. 280). Les tuyaux doivent dépasser les pinces de part et d'autre de 2 à 5 mm suivant leur grandeur. Le joint est façonné en tournant plusieurs fois de 360° les deux pinces en sens contraire (fig. 277). On l'achève, soit en recourbant les bouts libres des fils (fig. 278), soit en les enroulant deux ou trois fois autour des fils conducteurs de ligne (fig.279), ce qui affermit le joint et lui donne un aspect plus satisfaisant.

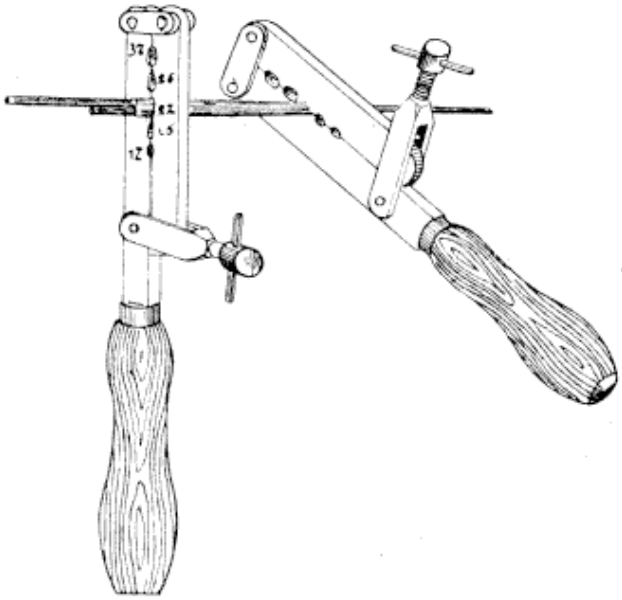


Fig. 280.

Ce joint est supérieur aux précédents, au point de vue de la résistance mécanique et leur équivaut sensiblement quant à la conductibilité électrique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Isolateurs. — Basse et moyenne tension. — Les fils conducteurs se fixent par l'intermédiaire d'isolateurs fabriqués parfois en verre et, généralement, en porcelaine vitrifiée et émaillée. La résistivité de cette substance atteint 5421.10^{12} méghoms à O°. L'isolation qu'elle procure serait toujours amplement suffisante quelle que soit sa forme, si la ligne était perpétuellement maintenue sèche et la tension proportionnée à son épaisseur.

Roulettes. — De fait, les premiers isolateurs étaient constitués par de simples roulettes (fig. 281) se fixant au moyen de vis. Mais par temps de pluie ou simplement de brouillard, ces supports se recouvrent d'humidité et l'isolement devient illusoire, l'eau impure étant conductrice.



Fig. 281.



Fig. 282.



Fig. 283.

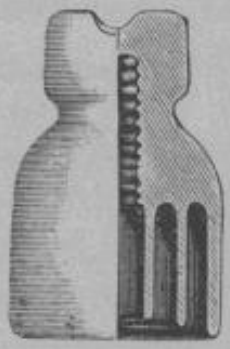


Fig. 284.

Isolateurs a cloches. — Pour assurer le maintien de l'isolement, on a imaginé de donner à l'isolateur la forme d'une cloche et l'on obtient l'isolateur à simple cloche (fig. 282), dont la partie centrale évidée et filetée, sert à sa fixation. L'isolement est ainsi beaucoup mieux assuré, l'électricité ne pouvant s'écouler par le support, parce que la cloche intérieure reste sèche et propre si sa profondeur est suffisante et la tension modérée.

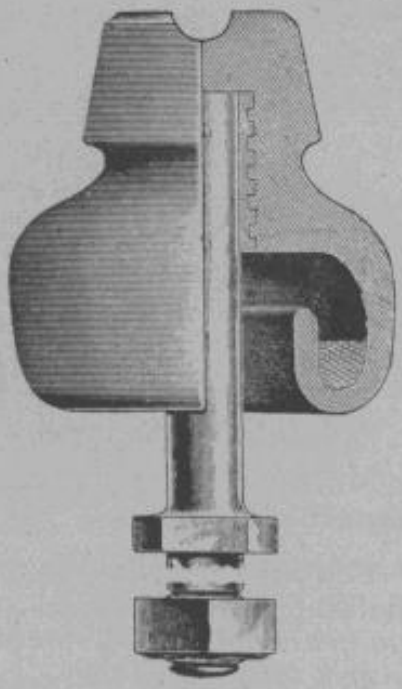


Fig. 285.

On obtient des résultats encore plus nets au moyen de l'isolateur à double cloche (fig. 283) et, pour des tensions plus élevées jusque 15 000 v, au moyen de l'isolateur à triple cloche (fig. 284).

Isolateurs a l'huile. — Particulièrement dès le début de l'emploi des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tensions moyennes (15 000 v), on a utilisé des isolateurs dont la cloche, se repliant sous forme de godet, permet de remplir celui-ci d'huile (fig. 285). Mais ces supports sont fort coûteux d'entretien, le liquide qu'ils contiennent finissant par s'épaissir et se recouvrir de poussières plus ou moins conductrices. Ils sont abandonnés.

Haute tension. (1) — Dès que l'on aborde les hautes tensions (au-delà de 15 000 v), il faut se prémunir contre les effets disruptifs et contre ceux dus à l'ionisation de l'air. La forme de la surface de l'isolateur (plane ou ondulée) perd beaucoup de l'importance que certains constructeurs ont cru devoir lui attribuer : c'est surtout de l'épaisseur de l'isolant et de la distance des conducteurs aux ferrures et fils voisins qu'il importe de se préoccuper; les formes les plus simples sont alors les meilleures, en gardant, comme ensemble, l'aspect d'un parapluie.

Isolateurs en chapelet. — Toutefois en Amérique on préfère, pour les suspensions caténaires (2), l'isolateur en chapelet (fig. 286 et 287), constitué d'éléments distincts, réunis en série et d'autant plus nombreux que la tension est plus élevée.



Fig. 286.

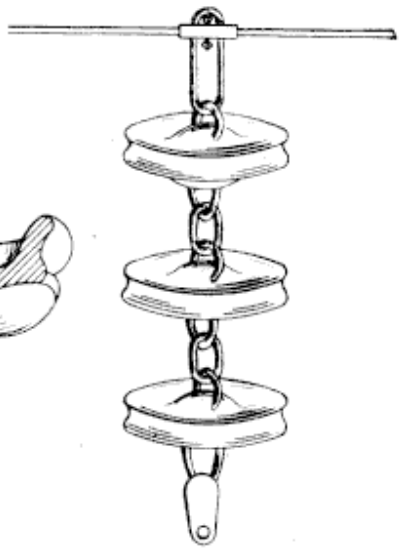


Fig. 287.

Isolateurs en plusieurs pièces. — En

(1) Guido Semenza. *Sur les isolateurs*, Congrès international de Marseille. T. I. p. 71, Gauthier-Villars, Paris 1909.

R. Valabrègue. *Des isolateurs à haute tension*, La Lumière électrique 5/6/09, p. 295.

(2) Le conducteur est suspendu par de nombreux points d'attache à un câble porteur. De cette manière, il reste presque rectiligne.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Europe, on préfère généralement mettre à contribution des isolateurs en porcelaine. Comme cette substance possède une rigidité électrostatique d'autant plus grande qu'elle est mieux vitrifiée, on les compose de plusieurs épaisseurs en pièces séparées, collées à froid avec un mastic de litharge-glycérine pour mieux faire obstacle à l'étincelle disruptive.

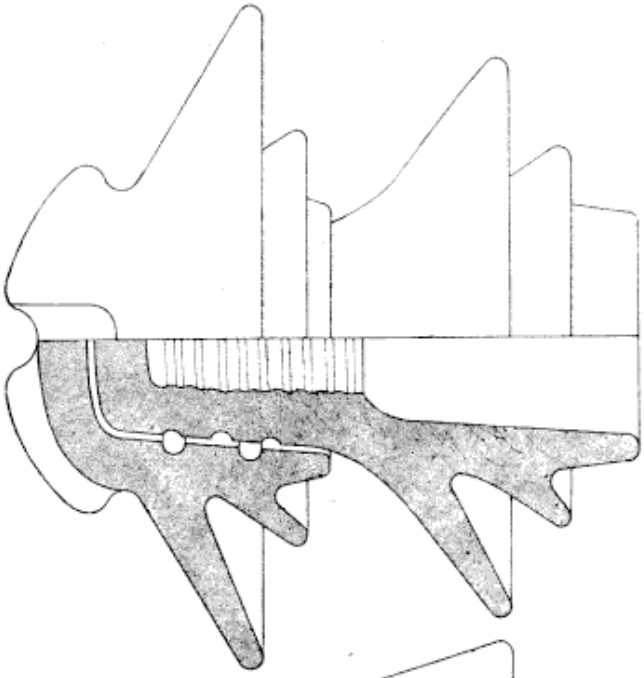


Fig. 290.

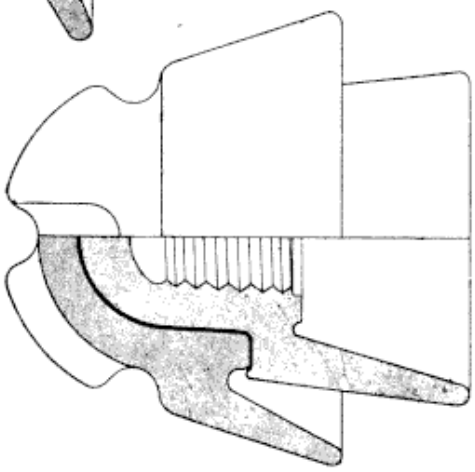


Fig. 289.

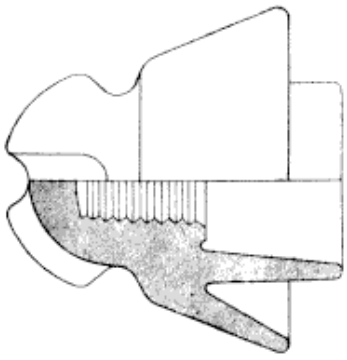


Fig. 288.

Les figures 288, 289, 290, donnent la vue d'isolateurs de la maison Ginori de Milan pour 5 000, 15 000 et 30 à 35 000 volts, essayés sous 40, 60 et 100 000 volts, des poids respectifs de 0,75 kg, 1,8 et 3,7. Le diamètre intérieur du bas de la cloche intérieure (fig. 288) mesure 55 mm.

Dès que la tension de service atteint 18 à 20 000 v, l'isolateur comporte toujours deux pièces et trois pour 40 à 60 000 v et au-delà.

Attache du fil sur l'isolateur. — Le conduc-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur se fixe à chaque isolateur. Voici le mode d'attache du fil de bronze, adopté parl'Administration des Télégraphes belges. Le conducteur est recouvert (fig. 291), sur la partie qui vient dans le col de l'isolateur, de spires serrées du fil de ligature, lequel est généralement d'un diamètre un peu plus faible et en cuivre mou. Chaque bout fait ensuite en sens inverse le tour de l'isolateur et est enroulé de nouveau sur le fil de ligne en BA et CD en s'éloignant du support, puis en revenant vers lui, en une seconde couche de fil.

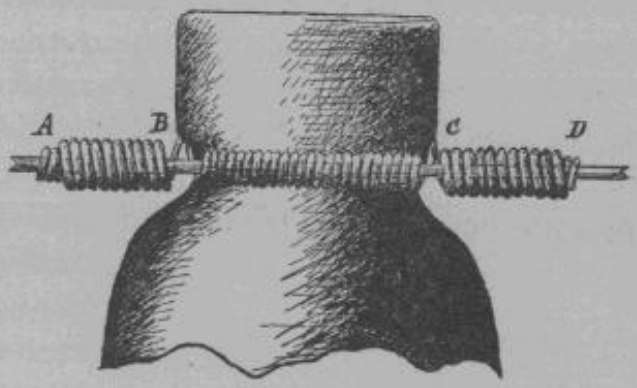


Fig. 291.

Lorsqu'on veut une attache plus stable, on enroule le conducteur une ou deux fois sur lui-même dans le col de l'isolateur, puis on pose le fil de retenue.

En ligne droite, les fils industriels se fixent souvent dans la rainure pratiquée sur la tête de l'isolateur. Voici le mode de ligature adopté par la Société bruxelloise d'Electricité : *deux* fils de ligature sont passés dans le col et viennent se réunir en torsade en A, A', (fig. 292), aux extrémités d'un même diamètre. Occupons-nous de la torsade A de droite. On la conduit verticalement le long de la tête et on ramène les deux fils qui la constituent au-dessus du conducteur, de droite à gauche en BCD. On les passe sous celui-ci, puis on les enroule sur lui en 4 spires serrées en DE en s'écartant de l'isolateur. Les bouts sont alors tordus de nouveau, pour redescendre en F

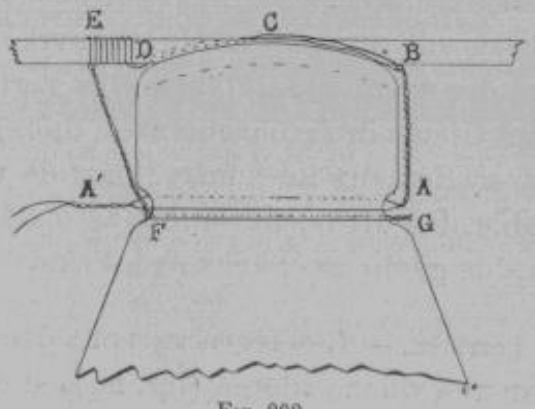


Fig. 292.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vers le col où ils se séparent, embrassent le col de part et d'autre et sont enfin réunis entre eux en une torsade serrée sur le côté opposé à F, en G. On opère de même symétriquement, avec les bouts A′ sur la gauche de l'isolateur.

Dans les courbes, la Société bruxelloise d'Electricité pose le conducteur dans la gorge des isolateurs (côté concave de la courbe affectée par le fil). Un seul fil de ligature est utilisé. On applique son milieu M (fig. 293) dans la gorge de l'isolateur, du côté opposé à celui qu'occupe le conducteur et on le croise sur celui-ci en A A′. Nous ne nous occuperons que du bout A pour ne pas embrouiller la figure. Le bout A est ramené dans le col jusqu'en B où il s'enroule sur le conducteur en 5 ou 6 spires jointives en s'éloignant de l'isolateur, revient passer dans le col pour s'enrouler en D, de l'autre côté des spires que l'on effectue symétriquement avec A′. Cinq ou six spires sont de nouveau enroulées jusqu'en E en s'éloignant de l'isolateur, pour enfin revenir en F se boucler avec l'extrémité du bout A′.

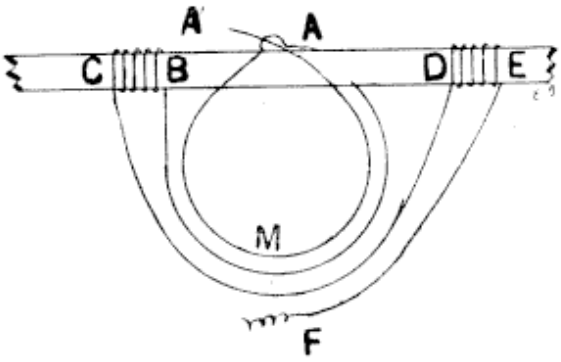


Fig. 293.

Les isolateurs se fixent sur des ferrures ou des consoles galvanisées soit au moyen de chanvre, soit au moyen de plâtre, ce qui donne un assemblage plus rigide. Dans le premier cas, ils sont filetés intérieurement et, dans le second, simplement striés. Le scellement au soufre, parfois utilisé, n'est pas recommandable. On utilise aussi le mastic litharge-glycérine et du ciment rapide gâché avec très peu d'eau.

Ferrures. — Les ferrures sont droites ou courbes et terminées par une queue filetée (fig. 294) si elles doivent être implantées dans des matériaux ligneux ; en queue d'aronde, si on les plâtre dans les interstices des murailles. L'axe de la partie AB doit passer par le col de l'isolateur, afin que la traction exercée par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le fil n'ait pas une tendance à faire tourner la ferrure en la dévissant, en cas de bris d'une des portées.

Les consoles droites, verticales, s'attachant sur des traverses métalliques, portent un bourrelet suivi d'une partie filetée qui sert à les fixer au moyen d'un écrou (fig. 285).

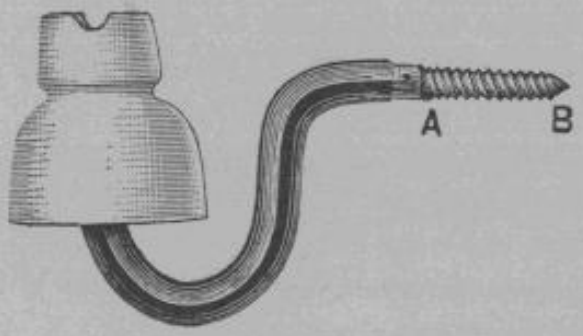


Fig. 294.

Pour économiser la place, on emploie souvent des ferrures à 2, 4 ou 6 et même 8 fils. Tous ces supports en fer doivent être soigneusement galvanisés. Il est utile de remplacer les rivures qu'ils peuvent présenter, par des assemblages par boulons, beaucoup plus solides et durables.

Sourdines. — Les vibrations que le vent imprime aux fils, se propagent par l'intermédiaire des appuis dans les constructions, où elles donnent lieu à un bourdonnement strident extrêmement désagréable. On l'évite en pinçant les conducteurs ou en les munissant de masses de grande inertie aux ventres de vibration voisins des isolateurs, ou en absorbant les vibrations par l'interposition de matières élastiques entre le fil et le point d'appui. On empêche aussi, de la sorte, les pliures répétées et nuisibles du fil, comme nous l'avons fait remarquer antérieurement.

La sourdine généralement employée en Belgique est constituée comme suit (fig. 295) : on serre le col de l'isolateur dans

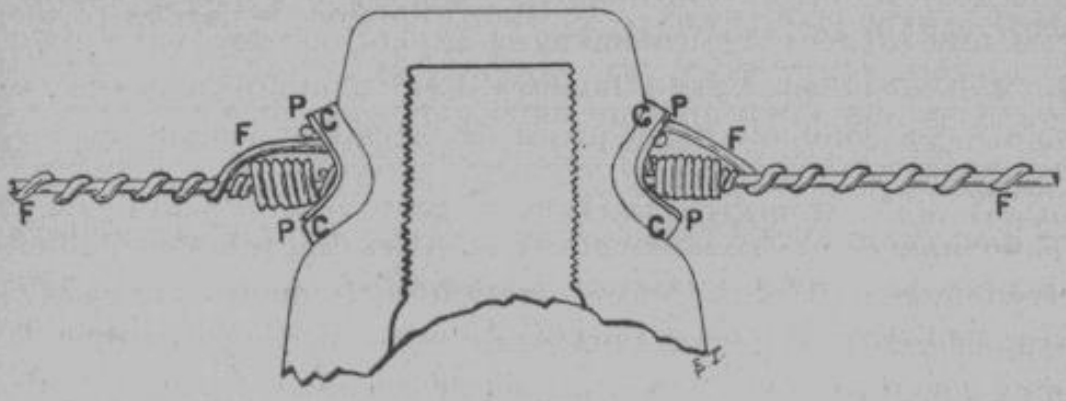


Fig. 295.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un fort anneau en caoutchouc CCCC de 5 millimètres d'épaisseur et de 20 de hauteur. On applique par dessus une mince feuille de plomb PPPP sur laquelle vient se fixer le fil. On la complète, s'il est nécessaire, par un fil de plomb FFFF enroulé autour de chaque brin de part et d'autre de l'isolateur, sur une longueur de 30 centimètres environ. Pour éviter qu'en cas de rupture ce fil pesant ne glisse vers le milieu de la portée, on peut l'enrouler sur un tube en caoutchouc fendu longitudinalement et passé sur le conducteur. Dans ce cas, on supprime la feuille de plomb.

Poteaux en bois. — Les supports sont généralement en bois dans les lignes sur routes. On emploie à cet effet des sapins, pins ou mélèzes bien droits et on leur fait subir une préparation qui a pour but de leur permettre de résister à l'humidité et à l'attaque des parasites, insectes et champignons. On les imprégnait jadis dans notre pays de $CuSo^4$. Mais celui-ci exige des bois verts ; il attaque les ferrements des isolateurs et disparaît à la longue sous les lavages répétés des eaux pluviales. Par sa présence, la vie du poteau, qui ne serait sous nos climats que de cinq à six ans, est portée à environ dix ans. On double au moins cette durée par le créosotage, qui a en outre l'avantage de pouvoir se pratiquer sur les bois secs. On injecte 250 litres par mètre cube de bois.

Les poteaux s'emploient généralement sous les longueurs de 7,5 ; 9; 10,5 ; 12 ; 14; 17 et 20 mètres. La base des trois derniers s'implante de 2 mètres dans le sol, celle des autres de 1,5 mètre.

En ligne droite et pour la pose de quelques conducteurs minces (de moins de 5 millimètres de diamètre) dont les isolateurs sont espacés verticalement de 30 centimètres, on emploie neuf à douze poteaux par kilomètre. Leur hauteur varie avec le nombre des conducteurs, le profil du terrain et les obstacles à franchir.

Supériorité des longues portées.—Les diagrammes donnés précédemment (fig. 267 et 269) mettent nettement en évidence la supériorité des longues portées : plus la portée est longue et moins y sont grandes les variations de tension dues aux modifications de la température.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour que les tensions s'équilibrent constamment de part et d'autre des supports, il convient de constituer les lignes de portées égales. Si, par suite d'inévitables circonstances locales, on est obligé d'admettre une portée plus grande ou plus petite en un point déterminé, il faut modifier les portées adjacentes, de manière à atteindre graduellement cette longueur exceptionnelle et revenir tout aussi graduellement aux portées normales.

En courbe, le nombre de points d'appui doit être augmenté ; il dépend du rayon de courbure et des changements de direction. Si la courbe est prononcée, la résultante des efforts agissant sur les supports a pour effet de les faire fléchir ou de tendre à les arracher du sol. On y remédie en inclinant les poteaux dans la direction de la résultante et en les consolidant au besoin par des haubans, si le terrain est dur, ou bien par des poussards ou jambes de force disposés de manière à résister par compression, si le terrain est meuble.

Enfin, dans le cas où les poteaux sont soumis à des efforts considérables, on les réunit soit par paires, poteaux *doubles* quand ils sont écartés ; *jumelés* quand ils sont accolés ; par trois placés en pyramide, poteaux triples ; par quatre, poteaux quadruples. Leurs assemblages sont consolidés par des boulons, entretoises et ligatures en fil de fer galvanisé.

Poteaux métalliques. — Soumis à des chaleurs excessives et à des pluies diluviennes dans les pays chauds, les poteaux en bois ne se conservent pas ; aussi a-t-on dû recourir aux poteaux métalliques. Dans les colonies françaises, notamment [1], on s'est arrêté aux fers en simple T, dont les dimensions le plus couramment employées sont $10 \times 6 \times 0{,}8$; $10 \times 8 \times 0{,}9$; $10 \times 11{,}5 \times 1$ centimètres. Les ferrures viennent se boulonner sur les faces des ailes du T. Ces supports sont encastrés dans un parallélipipède en béton de 1 mètre de haut et 25 centimètres de côté, coulé sur place. Le logement destiné au poteau est obtenu par l'emploi d'une forme

[1] DUBREUIL. *Lignes sur appuis métalliques en Extrême-Orient.* (Annales Télégraphiques, 1895, p. 385.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en bois ayant les dimensions de celui-ci, et placée dans le moule quand on coule le béton.

Dans les grandes villes, où le nombre des fils s'exagère et où il s'agit de supporter leurs nappes à grande hauteur, on est également obligé d'établir des poteaux métalliques, généralement constitués de fers cornières entretoisés par des fers cornières ou plats, solidement encastrés dans un massif de béton.

L'emploi des poteaux métalliques, d'ailleurs très coûteux, n'est pas toujours possible. On recourt alors aux chevalets posés sur les toitures. Ils sont composés de fermes en fers cornières supportant les traverses porte-isolateurs et consolidées par des entretoises. On les haubanne si besoin est.

Les lignes de moyenne tension sont généralement armées au moyen de ferrures. L'emploi des traverses peut être considéré comme réservé aux lignes de 30 000 à 60 000 volts.

Distance des fils. — Pour les hauts voltages, la distance des fils, exprimée en mètres, doit autant que possible être égale à la tension entre fils en volts, divisée par 30 000, et elle ne doit pas être inférieure à 0,60 m. (1) Pour les bas voltages, la distance est de 0,25 à 0,30 m.

Introduction dans les immeubles. — Le raccordement des fils aériens avec les conducteurs posés à l'intérieur des habitations, s'effectue au moyen de tubes isolants en porcelaine ou en ébonite (fig. 296), dont l'ouverture extérieure est tournée vers le bas, dans le but d'éviter l'introduction de l'eau.

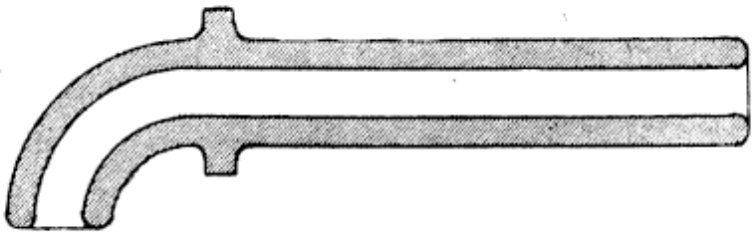


Fig. 296.

(1) Le Roy. *Construction des lignes de transport d'énergie*. Congrès de Marseille. T. I, p. 87. Gauthier-Villars. Paris, 1909.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si les conducteurs sont à bas potentiel, on se contente souvent de les introduire par une ouverture pratiquée dans la boiserie des fenêtres, en ayant soin de leur faire suivre un parcours, dont le tracé présente sa convexité vers le bas, pour s'opposer aux infiltrations. Ils sont recouverts d'un isolant depuis le dernier isolateur.

---

§ 2. — Conducteurs recouverts.

Nature et forme du conducteur. — Cuivre. — La résistance mécanique n'étant ici pour ainsi dire pas mise à contribution, c'est le cuivrepur qui est exclusivement employé, à cause de sa grande conductibilité permettant la réduction de la section nécessaire et par suite l'emploi d'un minimum d'isolant.

Conducteurs cordés. — Au delà d'un certain diamètre, on obtient la section voulue au moyen de fils cordés, afin de laisser au conducteur une souplesse suffisante pour être manié sans trop de difficulté et de lui permettre de céder aisément aux dilatations provoquées par les variations de température.

Les figures 297, 298, 299, 300 donnent la coupe des câbles souvent utilisés. Dans le dernier, l'ensemble des fils constituant un conducteur, affecte la forme d'un secteur, d'où le nom de

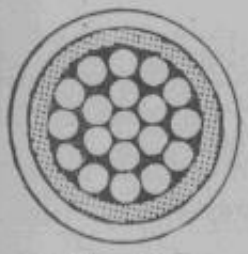


Fig. 297.



Fig. 298.



Fig. 299.



Fig. 300.

conducteurs sectoraux qui leur est donné. Ils sont moins employés que les autres, à cause des difficultés de fabrication qu'ils entraînent.

On distribue parfois les fils suivant des circonférences con-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

centriques (fig. 301). Mais on a à peu près renoncé à l'usage de ces câbles, dont le raccordement est particulièrement difficile ; en outre, leur capacité est très grande.

Isolants. — Caoutchouc. — Un des principaux isolants utilisés pour recouvrir les conducteurs est le caoutchouc, gomme provenant du latex d'arbres qui se rencontrent sous les tropiques. A l'état pur, il se décompose aisément sous la seule action des agents atmosphériques. On évite cette altération en le vulcanisant, c'est-à-dire en y incorporant du soufre, soit à chaud, soit à froid. Jusque 100° C, le caoutchouc vulcanisé accuse une dureté et une élasticité presque uniformes. Il résiste à un haut degré aux agents chimiques et aux dissolvants. Le soufre altérant le cuivre, il est nécessaire d'étamer celui-ci ou de le recouvrir d'abord d'une couche de caoutchouc naturel. La porosité du caoutchouc ne permet pas de l'employer sous l'eau, surtout sous pression ou à grande profondeur.



Fig. 301.

Gutta-percha. — La gutta-percha est également une gomme végétale qui, au point de vue de la conservation, possède des propriétés inverses de celles du caoutchouc. A l'air, en effet, elle se résinifie, se dessèche et tombe en poussière, tandis qu'elle isole parfaitement et se conserve indéfiniment sous l'eau. Elle commence à se ramollir vers 37° C. Comme elle n'adhère pas au cuivre, on recouvre d'abord celui-ci d'un ciment appelé « composition Chatterton », qui contient en poids 3 de gutta, 1 de résine et 1 de goudron de bois.

Le prix des deux substances, dont nous venons de nous occuper, étant élevé et ayant une tendance à monter encore par suite d'une exploitation irrationnelle des forêts où se rencontrent les arbres qui les produisent, on a cherché à leur donner des succédanés, dont le papier représente le prototype et est de plus en plus employé.

Papier. — On utilise le papier fort, tel que celui obtenu du chanvre de Manille, imprégné ou non. Il est enroulé mécanique-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment en bandelettes autour du conducteur en cuivre, jusqu'à obtention de l'épaisseur voulue. Un tuyau protecteur en plomb, étiré à température peu élevée, le soustrait à l'humidité. Le papier s'emploie même pour les hauts voltages; il est moins coûteux et plus stable que les gommes.

Toile vernissée.— Enfin, depuis quelques années on emploie, particulièrement en Amérique, sous le nom de *Varnished Cambric*, des bandes de toile revêtues d'un vernis isolant spécial passé en une ou plusieurs couches. Entre les différentes bandes, il est fait application d'une mince couche d'une matière isolante plastique, également de composition spéciale et qui assure l'adhérence des diverses couches entre elles, tout en leur permettant, au besoin, de glisser un peu l'une par rapport à l'autre.

Canalisations extérieures. — 1. Cables aériens. — Quand la place manque pour la pose des fils aériens, on évite parfois de recourir

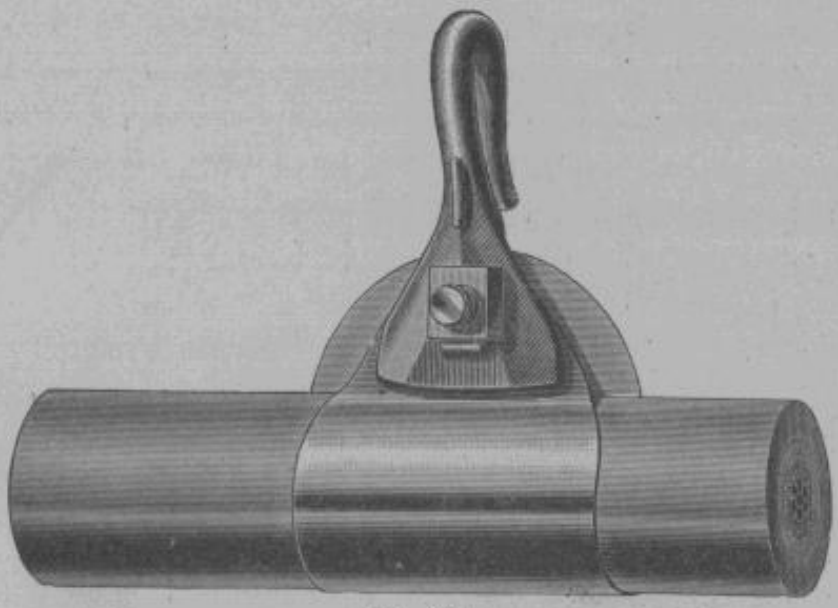


Fig. 302.

aux canalisations souterraines par l'emploi de câbles aériens. Les conducteurs élémentaires sont isolés soit au caoutchouc, et le toron est recouvert d'un ou de plusieurs guipages imprégnés d'enduits préservateurs à base de goudron ; soit au papier, et le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

toron est, comme toujours en pareil cas, inséré dans un tube en plomb.

On suspend le câble aérien à un câble porteur en acier galvanisé, fixé sur des isolateurs. Le câble électrique (fig. 302) s'attache au câble porteur par l'intermédiaire de crochets métalliques ou d'anneaux en porcelaine soutenus par des fils métalliques ou, plus simplement, au moyen de boucles en cuir bouilli.

2. Conducteurs nus posés en caniveaux sur isolateurs. — Les conducteurs sont nus, soutenus sur de faibles portées, par des isolateurs en porcelaine ou ébonite (tramways), dans des caniveaux aboutissant à des trous d'homme où se font les jonctions.

3. Cables tirés dans des conduites. — Un mode de pose très sûr consiste à tirer les câbles, au moyen de cabestans, dans des conduites en fonte, poterie ou fibre spéciale, enfouies dans le sol (fig. 303) et aboutissant à des trous d'homme où se font les

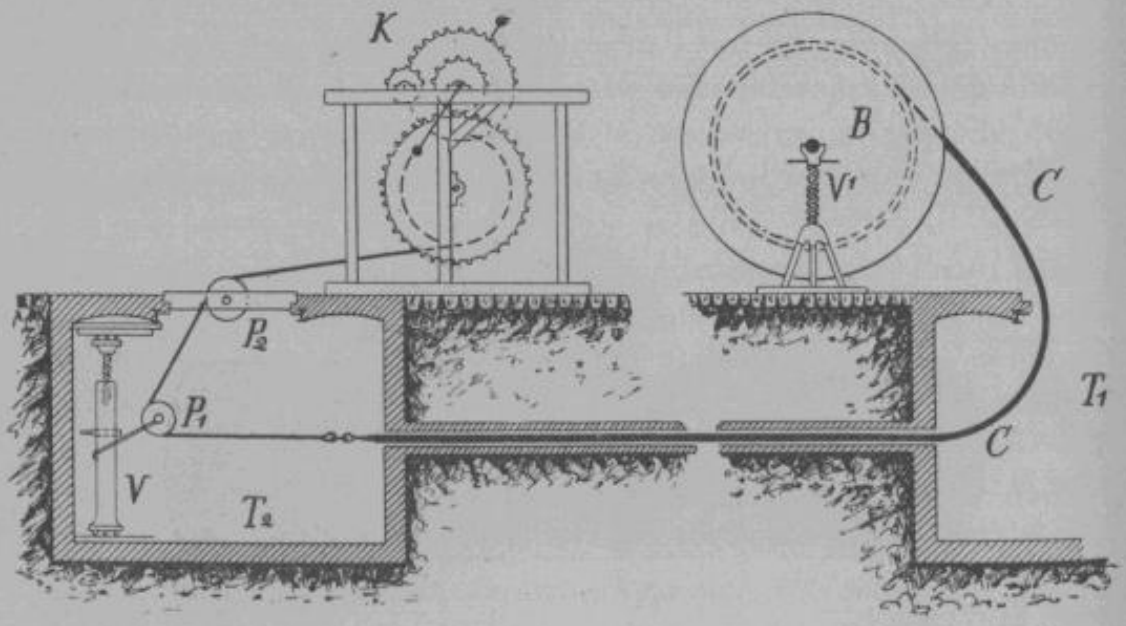


Fig. 303.

jonctions. Un nombre plus ou moins grand de tuyaux sont placés côte à côte, suivant les exigences à satisfaire. On les cimente et les enrobe généralement dans une maçonnerie de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

béton qui en fait un bloc unique, percé d'alvéoles correspondant à chaque câble.

L'eau de condensation ou d'infiltration est recueillie dans des puisards creusés au fond des trous d'homme.

Ce genre de canalisations réduit l'encombrement en plan. Il permet de réserver la possibilité d'ajouter de nouveaux câbles ou de remplacer ceux détériorés ou devenus insuffisants, sans nuire à la chaussée; il constitue la seule solution possible, quand le nombre de câbles à poser dans la même rue devient considérable.

Par contre, il est coûteux pour peu de câbles, et favorise l'accumulation du gaz d'éclairage filtrant du sol ou provenant de fuites accidentelles et qui forme un mélange détonant explosant parfois spontanément; leur installation entrave la circulation pendant longtemps; enfin, en terrains aquifères, l'étanchéité n'est pas assurée.

4. Cables armés. — On utilise beaucoup des câbles armés (fig. 304, 305) dont le toron de conducteurs isolés (enfermé dans un ou plusieurs tubes en plomb, plus particulièrement si l'isolant est du papier) se trouve revêtu d'une ou de plusieurs couches de fers feuillards (fig. 299), fils trapézoïdaux (fig. 300), fils ronds jointifs (fig. 305) ou fils de profils spéciaux (fig. 304)



Fig. 304.

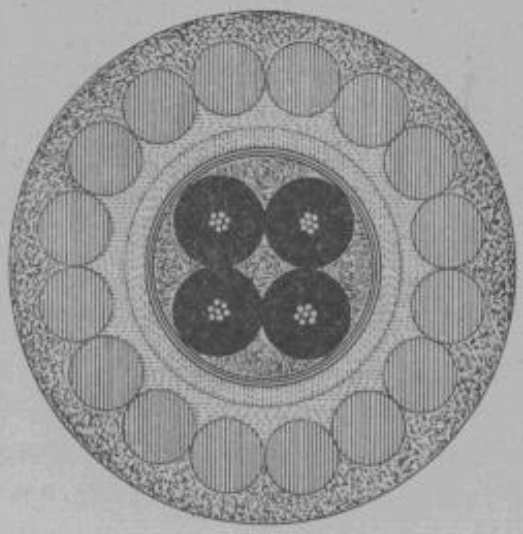


Fig 305.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

enroulés suivant une hélice de pas plus ou moins allongé, eux-mêmes recouverts de guipages en jute imprégné, enroulés en hélice.

On pose ces câbles préalablement enduits de goudron, à une profondeur d'au moins 0,75 m dans une couche de sable et, avant de refermer la tranchée, on les met à l'abri des coups de pioche des terrassiers, en les recouvrant d'un lit de briques ou dalles quelconques suffisamment résistantes.

Ce sont aussi les câbles armés que l'on réserve pour les applications sous-fluviales ou sous-marines.

Comme nous l'avons dit précédemment, les canalisations sont indiquées là où les câbles sont nombreux. Quand au contraire leur nombre est restreint, les câbles armés se recommandent spécialement.

Canalisations intérieures.— Dans les locaux secs et pour de faibles voltages (sonneries et téléphones), les conducteurs peuvent être simplement revêtus d'une matière textile imprégnée d'une substance non hygroscopique, comme la paraffine ou mis sous soie, si le côté esthétique domine.

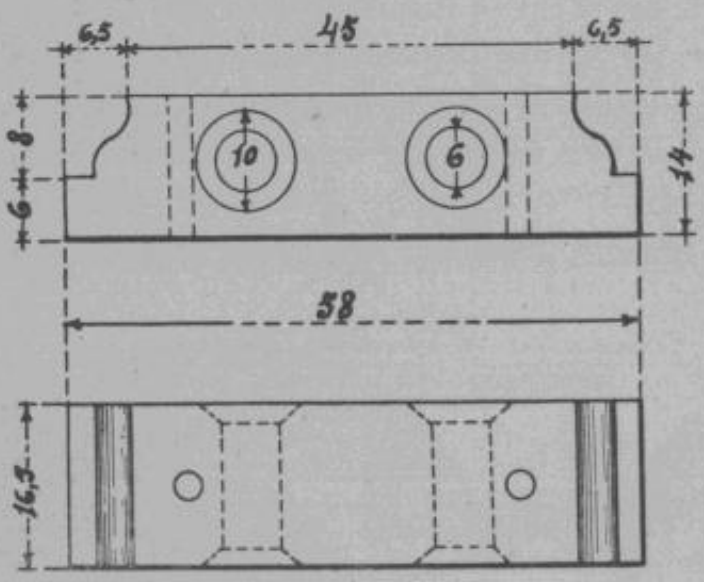


Fig. 306 et 307.

On les fixe par l'intermédiaire de petits isolateurs en os, verre ou porcelaine, sur taquets en bois (fig. 306, 307), ou mieux sur isolateurs télescopiques (fig. 308, 309, 310), lesquels comportent un coin en acier coulé, taraudé suivant son axe d'un logement fileté, dans lequel s'engage une vis permettant de serrer les fils entre un chapeau et un petit cylindre en porcelaine. Les fils sont torsadés. La pose au moyen

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de clous ou cavaliers n'est pas recommandable, parce qu'ils détériorent les conducteurs et les murs.

Quand le voltage s'élève (éclairage électrique) ou dans des locaux humides, l'isolation au caoutchouc ou au papier sous plomb s'impose.

On dissimule souvent les fils sous des moulures spéciales en bois. A cette fin, on les pose dans des rainures parallèles creusées à 1 centimètre de distance dans des lattes, que l'on recouvre ensuite d'un couvercle vissé et non cloué, plus ou moins ouvragé. Le bois étant hygrométrique, ce système est actuellement souvent proscrit dans les habitations.

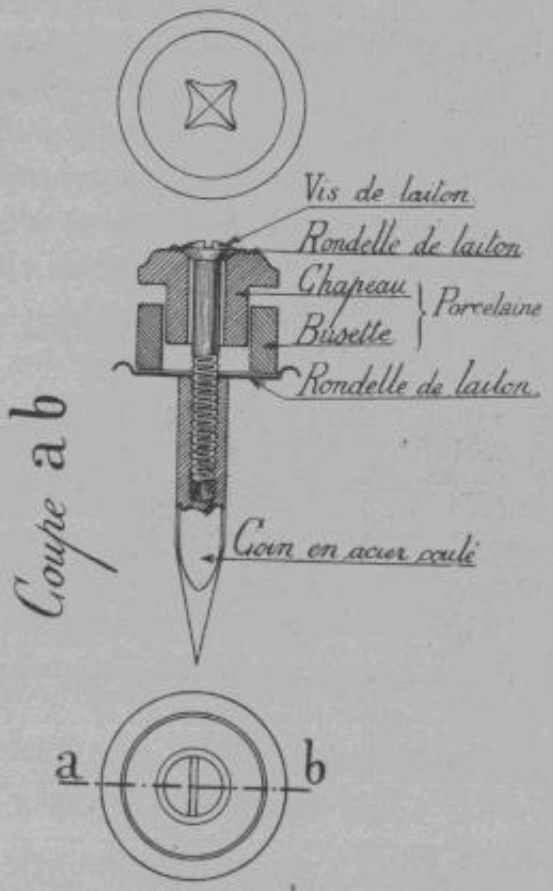


Fig. 308, 309, 310.

Les tubes genre *Bergmann*, en papier comprimé, armés ou non, raccordés au moyen de manchons métalliques s'emboîtant par pression, sont très employés. Pour des courants faibles (section moindre que 3 millimètres carrés), on peut admettre deux conducteurs dans un seul tube. A la traversée des planchers et murs, les fils doivent être enfermés dans un conduit isolant et imperméable, tel un tube en ébonite ou mieux un tube genre Bergmann pourvu d'une gaine métallique.

Dans le système *Peschel* le fil sous caoutchouc est protégé contre toute détérioration mécanique par un tube métallique pourvu d'une fente longitudinale permettant à l'eau de condensation de s'écouler.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin on utilise, système *Ernst Kuhlo* (1), des conducteurs cuirassés formés de fils au caoutchouc pourvus d'une gaine métallique jointive, d'une certaine épaisseur, mais suffisamment souple, en cuivre, laiton ou fer plombé. On peut les poser d'une manière apparente ou sous crépi.

Les conducteurs cuirassés s'emploient également dans les installations dont le neutre est à la terre et, dans ce cas, l'enveloppe métallique sert de fil de retour.

Quand les installations sont isolées, on utilise les câbles cuirassés à deux ou trois conducteurs. La cuirasse joue alors simplement le rôle de fourreau protecteur.

Les câbles cuirassés sont suffisamment souples pour supprimer l'emploi d'accessoires spéciaux tels que coudes, coins, équerres. Ils peuvent être posés sur place dans tous les sens et épouser facilement la forme des moulures, etc.

On n'admet pas, en général, de section inférieure à 1 millimètre carré, soit $d = 1{,}13$ millimètre, sauf dans les appareils d'éclairage, où la section peut descendre à 0,5 millimètre carré, $d = 0{,}8$. *(Réglement de la ville de Bruxelles.)*

Liaison des conducteurs recouverts : 1° Entre eux. — Fils de petits diamètres.—On les enroule l'un sur l'autre, on les soude, puis on recouvre le joint d'un isolant comme de la toile caoutchoutée.

S'il s'agit de câbles au papier, on introduit à frottement les fils à réunir dans des manchons en cuivre mou et l'on écrase le tout au moyen d'une pince de forme appropriée ou on façonne une torsade d'1,5 cm environ que l'on rabat le long des fils. On isole les conducteurs des voisins en passant, au-dessus du manchon ou de la torsade, un manchon en papier ou un tube en caoutchouc suivant la nature de l'isolant employé.

---

(1) Biske. *Conducteurs cuirassés et matériel d'installation du système Ernst Kuhlo.* Bulletin de l'Association des Ingénieurs électriciens Montefiore, T. VI. 1906, p. 314.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Conducteurs de gros diamètres. — On les amène dans une boîte de jonction en fonte où ils sont dénudés, façonnés en biseau, juxtaposés et soudés ou amincis et réunis au moyen de manchons en cuivre pourvus de vis de serrage. La boîte est ensuite remplie d'un isolant liquide comme du goudron et le couvercle boulonné avec interposition d'une feuille en caoutchouc. La sortie des câbles est rendue étanche par un bourrage en jute ou toile goudronnées.

2° **Aux appareils et tableaux.** — Fils minces. — Les fils minces sont simplement pincés dans des bornes ou sous des écrous, après avoir été débarrassés de leur isolant. La boucle doit toujours être *orientée dans le sens du vissage*.

Gros conducteurs. — Si l'on employait ce procédé pour les gros conducteurs, la surface de contact avec la borne ou l'écrou d'attache serait trop réduite et il y aurait danger d'échauffement nuisible. On termine alors le conducteur, préalablement dénudé à son extrémité, par une *bride d'extrémité*, dite aussi *cosse* ou *soulier de câble*, qui assure une surface de contact suffisante à l'endroit de la liaison (fig. 311).

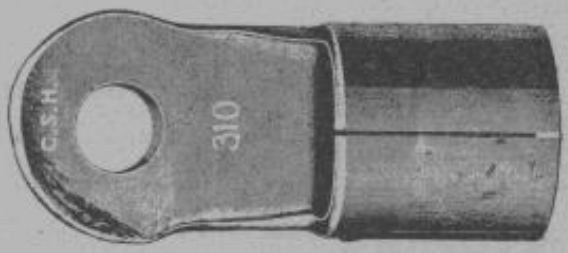


Fig. 311.

Isolement des lignes. — On distingue l'isolement des conducteurs *l'un par rapport à l'autre*, important relativement à l'énergie dissipée en pure perte en dehors des récepteurs et l'isolement des lignes *par rapport à la terre*, important au point de vue de la sécurité.

Le premier se mesure généralement par la méthode de comparaison, T. I, p. 332, en isolant les extrémités des câbles considérés et mettant les autres extrémités en rapport avec un galvanomètre et une pile. On observe la déviation du galvanomètre après une minute d'électrisation.

L'isolement minimum admissible est spécifié par les adminis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trations. A Bruxelles, notamment, on a adopté la règle dite du 1/10 000 : *l'isolement doit être tel que, les appareils étant raccordés, il ne puisse se perdre dans la résistance d'isolement plus du dix-millième du courant normal traversant la canalisation.*

Si, par exemple, une canalisation alimente un appareil consommant 5 A sous 110 V, il ne pourra passer sous cette pression plus de 0,000 5 A à travers l'isolant. En vertu de la loi d'Ohm, $i = e/r$ ou $r = e/i$; la résistance d'isolement devra être au minimum de 110/0,000 5 = 220 000 O.

Essai de rigidité diélectrique. — On attache aujourd'hui beaucoup moins d'importance à la mesure de l'isolement des câbles et l'on prescrit toujours de soumettre ceux-ci, au préalable, à une tension alternative efficace, plus élevée que celle qu'ils supporteront en service normal. Il ne faut toutefois pas aller trop loin dans cette voie, parce que ces essais fatiguent l'isolant.

On admet souvent, après pose, un essai au double de la tension de service, maintenue pendant une demi-heure ou une heure, c'est-à-dire durant un laps de temps suffisant pour permettre à tous les défauts de se révéler (1).

A l'usine même de fabrication, les essais doivent encore être plus sévères (triple de la tension).

Indicateurs de terre. — Un défaut dans l'isolant d'un câble a pour effet de porter en ce point son conducteur à un potentiel d'autant plus voisin de celui de la terre, que le défaut est plus caractérisé. On a en conséquence l'habitude de désigner tout défaut d'isolement notable sous le nom de *terre*.

Pour se rendre immédiatement compte de l'état d'isolement du réseau, on emploie souvent à l'usine le dispositif suivant (fig 312) : Deux lampes à incandescence *a* et *b*, réglées chacune sur la tension de la distribution, sont montées en série entre les

(1) de Marchena. *Les canalisations souterraines*. Congrès de Marseille. T. I, p. 126, Gauthier-Villars. Paris, 1909.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

deux conducteurs principaux de celle-ci. Au point de jonction des deux lampes vient se raccorder une sonnerie trembleuse, mise d'autre part à la terre.

Quand l'isolement est satisfaisant, les deux lampes brûlent faiblement et la sonnerie reste muette. Dès qu'une terre se produit sur un des fils, le fil négatif, par exemple, ce conducteur prend le potentiel zéro, l'autre a par conséquent comme voltage celui de la distribution et la lampe *a* s'allume vivement, tandis que la sonnerie, entrant en action avertit le mécanicien que quelque chose d'anormal se passe. C'est donc la lampe en rapport avec le fil sain qui s'allume, l'autre s'éteignant.

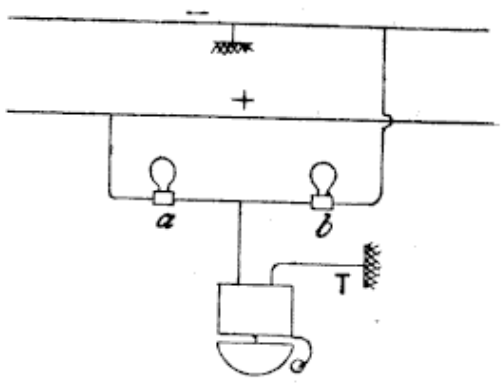


FIG. 312.

M. Picou (1) a indiqué le moyen de transformer l'installation précédente, de manière à permettre l'évaluation de la résistance du défaut. A cette fin, la sonnerie est remplacée par un galvanoscope G (fig. 313), et on intercale un rhéostat R entre la terre T de celui-ci et le fil sain. On a dès lors constitué les éléments d'un pont de Wheastone. En manœuvrant le rhéostat de manière à annuler la déviation du galvanoscope, la résistance approximative du défaut est donnée par celle débouchée au rhéostat.

S'il s'agit d'une installation à courants alternatifs, les lampes sont remplacées par deux condensateurs, simplement constitués de deux feuilles métalliques à larges surfaces très rapprochées

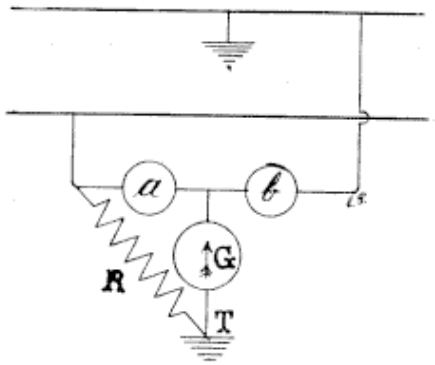


FIG. 313.

(1) *Distribution de l'électricité : Installations isolées*, p. 104, 2e édition. Paris, Gauthier-Villars.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et la sonnerie par un téléphone. A l'état normal, celui-ci reste silencieux; il fait, au contraire, entendre un bourdonnement caractéristique, dès qu'une terre se produit dans l'installation.

§ 3. — Impédance des lignes. Effet Kelvin. Détermination de la section.

Impédance des lignes (1). — Nous avons vu que l'effet de la réactance d'un circuit parcouru par des courants variables est de produire une ésistance apparente ou impédance, plus élevée que la résistance mesurée au moyen des appareils habituels : ponts de Wheastone, etc. On appelle *facteur d'impédance* d'un conducteur parcouru par des courants alternatifs de fréquence déterminée, le coefficient par lequel il faut multiplier la résistance du conducteur pour obtenir son impédance.

C'est donc le facteur K déduit de la formule

$$\sqrt{r^2 + \left(\omega \mathfrak{L} - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = K r.$$

La connaissance de ce coefficient est importante pour le calcul des lignes à courants alternatifs, parce qu'il permet de se rendre compte de la chute de tension, qui est plus élevée que lorsque la même ligne est parcourue par des courants continus de même intensité, attendu qu'elle est égale au produit de l'intensité efficace par l'impédance, toujours plus grande que la résistance.

Dans les lignes aériennes, on ne doit se préoccuper que de la réactance $\omega \mathfrak{L}$, la capacitance étant en général négligeable vis-à-vis d'elle. Dans les câbles concentriques c'est l'inverse.

Le coefficient de selfinduction par unité de longueur, de deux conducteurs parallèles indéfinis de rayon r cm, distants d'axe en axe de d cm, placés dans l'air, dont l'un sert de retour au courant, a pour expression (T. 1, p. 228)

$$\mathfrak{L} = 2\,(1/2 + 2 \log_e d/r).$$

(1) E. Walch. *Transports d'énergie par courants alternatifs*. Bulletin de l'Association Montefiore 1903, p. 193 et suivantes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si l'un des conducteurs est subdivisé en filets parallèles égaux, disposés concentriquement par rapport à l'autre conducteur, son effet magnétique intérieur sera nul ; l'effet magnétique extérieur total est nul aussi, de sorte qu'il ne reste pour le coefficient de selfinduction que le terme relatif au conducteur intérieur

$$\mathfrak{L} = 1/2 + 2 \log_e d/r = 0{,}5 + 4{,}6 \log d/r$$

par cm de longueur et en unités C. G. S.

La même expression est applicable à chaque conducteur d'une ligne polyphasée, dont les brins sont placés symétriquement. Dans le cas de courants triphasés, c'est la disposition des conducteurs au sommet d'un triangle équilatéral qui correspond à la dernière formule. Néanmoins, si les conducteurs sont placés aux sommets d'un triangle isocèle ou même en ligne droite, elle donne encore des résultats suffisamment approchés pour la pratique.

Le coefficient $\mathfrak{L}$ étant déterminé, la valeur de l'inductance par centimètre de longueur est

$$\omega \mathfrak{L} = 2\pi f \mathfrak{L}.$$

Par kilomètre nous aurons $2\pi f \mathfrak{L}\, 10^5$; pour l km $2\pi f l \mathfrak{L}\, 10^5$ et si nous exprimons le résultat en ohms, nous aurons

$$2\pi f l \mathfrak{L}\, 10^{-4}.$$

Le tableau suivant (1) donne l'inductance $\omega \mathfrak{L} = 2\pi f \mathfrak{L}$ par kilomètre de simple fil pour une fréquence de 50.

	$d = 40$ cm	$d = 50$	$d = 60$	$d = 70$	$d = 80$	$d = 90$	$d = 100$
$r = 0{,}2$	0,348	0,363	0,374	0,384	0,393	0,4	0,405
0,25	0,332	0,348	0,360	0,369	0,378	0,386	0,392
0,3	0,323	0,337	0,348	0,359	0,366	0,374	0,380
0,35	0,314	0,328	0,339	0,348	0,357	0,364	0,371
0,4	0,305	0,319	0,331	0,340	0,348	0,356	0,362
0,5	0,29	0,305	0,316	0,326	0,334	0,342	0,340
0,6	0,28	0,294	0,305	0,315	0,323	0,331	0,337
0,7	0.27	0,284	0,295	0,305	0,314	0,321	0,328
0,8	0,262	0,276	0,288	0,297	0,305	0,313	0,319
0,9	0,254	0,268	0,280	0,289	0,298	0,305	0,312

(1) Extrait de l'article de Walch.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

S'il s'agit d'un système monophasé, on doublera la valeur ci-dessus.

Nous pouvons donc calculer maintenant la résistance et l'inductance d'une ligne donnée puis, *connaissant le courant efficace qui doit la traverser, déterminer la force électromotrice efficace à appliquer à l'origine pour obtenir à son extrémité une force électromotrice donnée.*

Courant alternatif simple. — Soient i_{eff} le courant traversant la ligne, r la résistance de chaque conducteur d'inductance $\omega \mathfrak{L}$, et $e_{2\,\text{eff}}$ la tension à l'arrivée supposée en phase avec le courant.

Partons du premier fil de ligne de résistance r et de réactance $\omega \mathfrak{L}$.

Pour le faire traverser par le courant i_{eff}, nous devons appliquer à ses extrémités la force électromotrice OB, fig. 314, résultante de la force électromotrice effective $OA = r\,i_{\text{eff}}$ et de la force électromotrice d'induction $AB = \omega \mathfrak{L}\, i_{\text{eff}}$, déphasée de $\pi/2$ en avant sur la première.

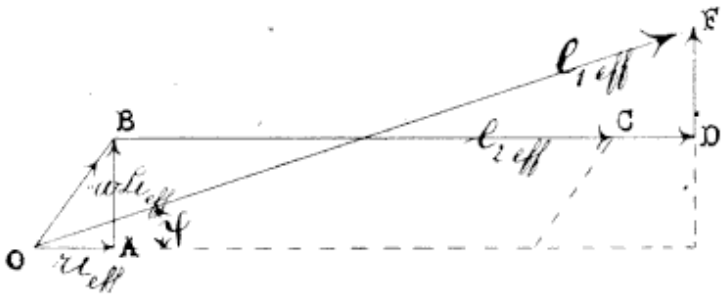


FIG. 314.

Nous arrivons ainsi au récepteur, où nous trouvons la tension $e_{2\,\text{eff}}$. Celle-ci étant en phase avec le courant, nous porterons $BC = e_{2\,\text{eff}}$ sur une parallèle à $r\,i_{\text{eff}}$. A la sortie du récepteur nous trouvons le second fil de ligne. Pour le faire traverser par le courant i_{eff}, nous devrons lui appliquer, dans la direction du courant, la force électromotrice effective $CD = r\,i_{\text{eff}}$ et, à angle droit avec CD, la force électromotrice d'induction $DF = \omega \mathfrak{L}\, i_{\text{eff}}$.

La force électromotrice résultante $OF = e_{1\,\text{eff}}$ sera celle à appliquer aux extrémités de la ligne, à la station de départ.

REMARQUE.— On arrive au même résultat, tout en simplifiant le diagramme, en groupant tout ce qui est relatif aux fils de ligne. Cela revient à considérer les deux fils de ligne comme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

n'en formant qu'un seul, de résistance et de réactance double. On portera donc sur une horizontale OA (fig. 315) la force électromotrice effective totale $2ri_{eff}$, puis, à angle droit, une longueur AB proportionnelle à $2\omega L i_{eff}$, ensuite, sur une horizontale, une longueur BC proportionnelle à $e_{2\,eff}$.

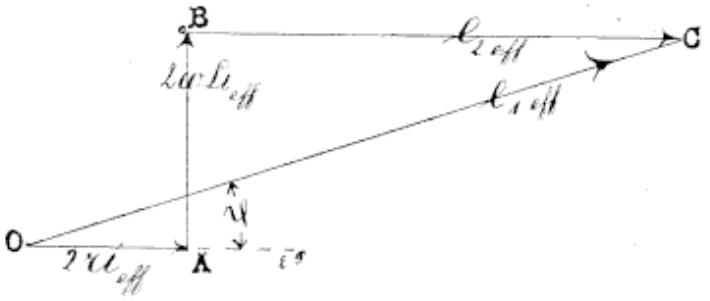


FIG. 315.

Le vecteur OC représentera, à l'échelle admise, la force électromotrice à appliquer à l'origine de la ligne. Son déphasage en avant sur le courant est φ.

Si le récepteur déphase le courant de φ_2 en arrière sur la tension, après avoir porté le vecteur $AB = 2\omega L i_{eff}$ normalement à l'extrémité du vecteur $OA = 2ri_{eff}$ (fig. 316), nous mènerons la droite $BC = e_{2\,eff}$ tension à l'arrivée, faisant un angle φ_2 en avant sur le courant.

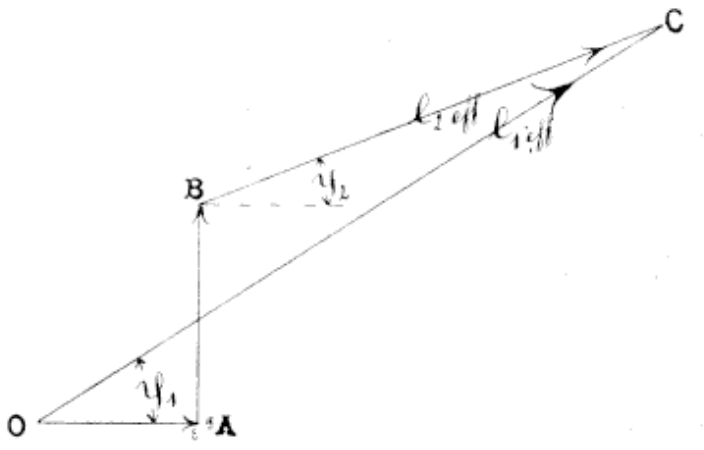


FIG. 316.

Le vecteur OC nous donnera, en grandeur et direction, la tension $e_{1\,eff}$ au départ, déphasée de φ_1 en avant sur le courant et de $\varphi_1 - \varphi_2$ sur $e_{2\,eff}$.

On peut aussi porter en premier lieu la tension à l'arrivée et prendre sa direction comme axe des phases. Les deux diagrammes précédents se transforment alors comme suit (fig. 317, 318).

Sous cette dernière forme (fig. 318), on déduit aisément la relation exprimant φ_1 en fonction de la force électromotrice à l'arrivée et des facteurs de la ligne. On a, en effet,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$e_{1\,\text{eff}} \sin \varphi_1 = e_{2\,\text{eff}} \sin \varphi_2 + 2\,\omega\,\mathcal{L}\,i_{\text{eff}}$$
$$e_{1\,\text{eff}} \cos \varphi_1 = e_{2\,\text{eff}} \cos \varphi_2 + 2\,r\,i_{\text{eff}}$$

d'où
$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{e_{2\,\text{eff}} \sin \varphi_2 + 2\,\omega\,\mathcal{L}\,i_{\text{eff}}}{e_{2\,\text{eff}} \cos \varphi_2 + 2\,r\,i_{\text{eff}}},$$

Etant déphasées de $\pi/2$ sur le courant, les forces électromotrices d'induction ne donnent lieu à aucune perte d'énergie,

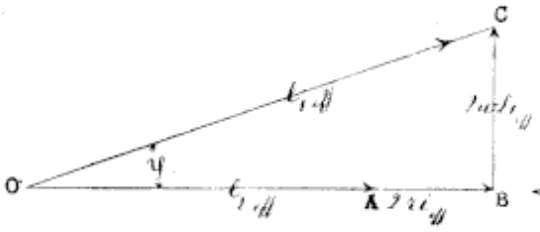


Fig. 317.

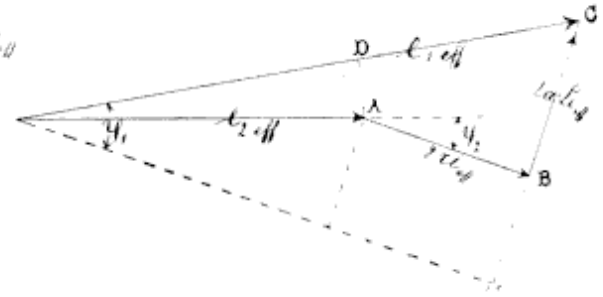


Fig. 318.

mais elles obligent à majorer le voltage au départ, qui devient OC au lieu de OA + AB.

En traçant du point O comme centre (fig. 318), avec OA comme rayon, un arc de cercle jusqu'au point de rencontre D avec OA, la longueur DC donnera la perte en ligne.

On remarquera que, tout en gardant la même section totale de cuivre dans les canalisations aériennes, on réduira beaucoup le voltage à appliquer au départ, en subdivisant les conducteurs. Supposons, en effet, que nous les dédoublions. Leur section étant deux fois plus petite, leur résistance est double, mais le courant qu'ils véhiculent est moitié moindre. La force électromotrice effective à leur appliquer reste donc la même, tandis que la force électromotrice d'induction tombe de près de moitié. En répétant la construction précédente pour les conducteurs réduits, nous voyons que la force électromotrice totale qu'ils nécessitent est dès lors bien moindre.

Courants triphasés. — Faisons d'abord une remarque. L'expression de la puissance triphasée $\sqrt{3}\,e_{\text{eff}}\,i_{\text{eff}} \cos \varphi$ est toujours donnée en fonction de la tension entre fils, soit au départ, soit à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'arrivée, et de l'intensité du courant traversant les fils de ligne, la charge étant supposée uniformément répartie entre eux. Il en résulte que le déphasage φ est celui existant, non entre le e_{eff} et le i_{eff} de la formule, mais entre la tension étoilée correspondante et le dit courant efficace des fils de ligne. Cette tension étoilée, comme nous le savons, est égale à la tension composée, divisée par $\sqrt{3}$.

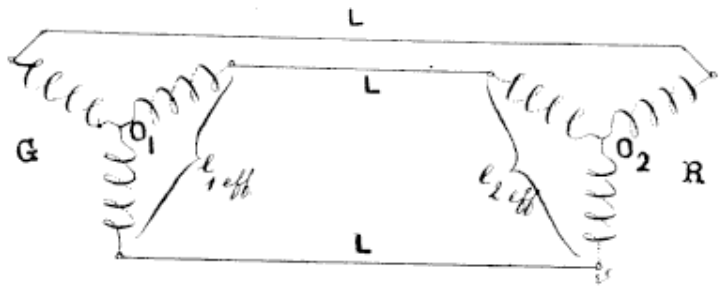


FIG. 319.

Supposons d'abord la ligne sans réactance. Appelons $e_{2\,\text{eff}}$ le voltage efficace appliqué aux bornes du récepteur, w la puissance qu'il absorbe et φ_2 le déphasage du courant en arrière sur la force électromotrice. Calculons le courant i_{eff} traversant les fils de ligne

$$\sqrt{3}\, e_{2\,\text{eff}}\, i_{\text{eff}} \cos \varphi_2 = w$$

d'où l'on tire la valeur de i_{eff}.

La force électromotrice appliquée à chaque enroulement du récepteur étant, comme nous le savons, $e_{2\,\text{eff}}/\sqrt{3}$, (et c'est sur elle que le courant est déphasé de φ_2), nous pourrons maintenant déterminer la valeur de la force électromotrice à développer dans un des enroulements du générateur, puisqu'elle doit équilibrer toutes les autres entre les centres O_1 et O_2 (fig. 319). r étant la résistance d'un fil de ligne, on portera une longueur $OA = r\, i_{\text{eff}}$ suivant l'horizontale, puis, sur une droite AB faisant l'angle

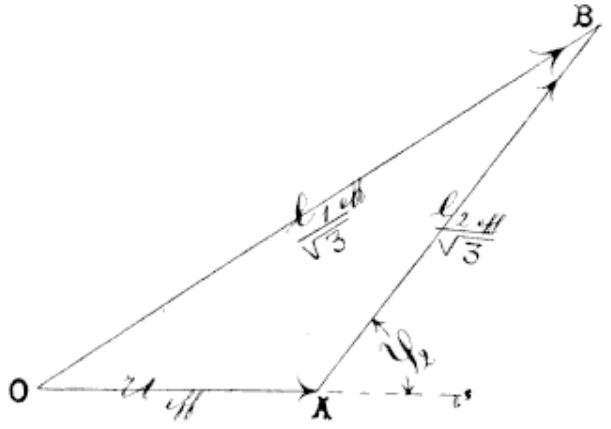


FIG. 320.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

φ_2 en avant avec OA, une longueur $AB = e_{2\,eff}/\sqrt{3}$. OB représentera la différence de potentiel à développer entre O_1 et une borne de ligne. La valeur de la tension à développer entre deux bornes de ligne du générateur sera dès lors $OB\sqrt{3}$ (fig. 320).

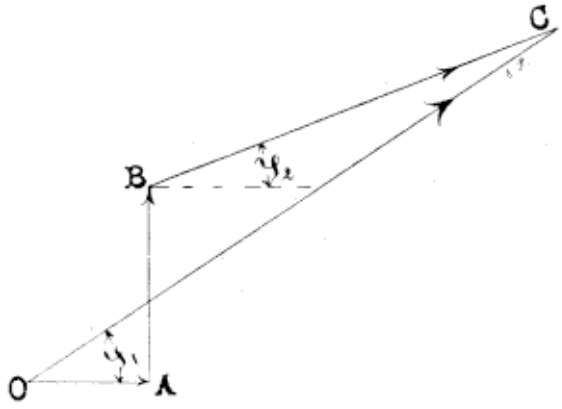


Fig. 321.

Si la ligne présente de l'inductance, on calculera celle-ci. Alors, à l'extrémité du vecteur OA (fig. 321) représentant ri_{eff}, on élèvera une perpendiculaire $AB = \omega \mathfrak{L} i_{eff}$. On tirera ensuite en B une droite $BC = \frac{e_{2\,eff}}{\sqrt{3}}$, faisant avec la direction OA l'angle φ_2 en avant. OC représentera la résultante, comme précédemment.

Ici encore, nous pouvons tracer nos diagrammes en prenant comme axe de phase la tension à l'arrivée. Cela revient à nous placer au centre de l'étoile de la réceptrice pour y composer les tensions.

Nous porterons donc en OA (fig. 322) la valeur $\frac{e_{2\,eff}}{\sqrt{3}}$ de la tension dans un des enroulements de la réceptrice, puis φ_2 en arrière $AB = ri_{eff}$ et enfin $\pi/2$ en avant $BC = \omega \mathfrak{L} i_{eff}$; OC représentera la tension étoilée au départ.

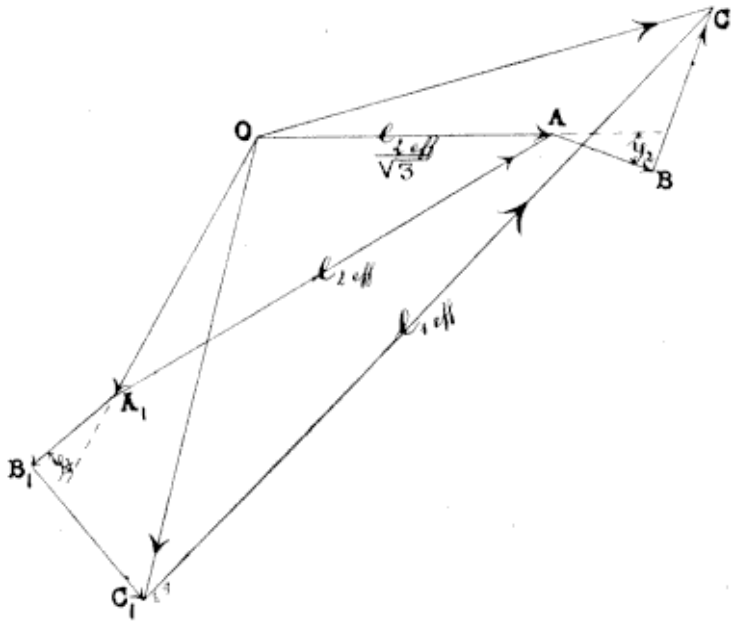


Fig. 322.

Traçons maintenant un vecteur $OA_1 = OA$ en arrière de 120°. Il représentera la ten-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sion dans l'enroulement suivant d'un récepteur étoilé. En répétant la même construction que ci-dessus, OC_1 représentera, en grandeur et direction, la tension étoilée dans l'enroulement correspondant du générateur.

En joignant AA_1, on aura la valeur de la tension entre fils au récepteur, qui n'est autre que celle qui serait appliquée à un récepteur monté en polygone, installé à la station réceptrice.

En joignant CC_1, on a la tension entre fils au départ.

Applic. *Un récepteur triphasé absorbe 1000 kw sous 10 000 v entre bornes, avec un facteur de puissance* $\cos\varphi = 0{,}8$. *Quelle sera la tension aux bornes de la génératrice située à 30 km, l'inductance de la ligne étant supposée négligeable, la section des fils 32* mm^2 *et la résistivité du cuivre employé* $1{,}7.10^{-6}$?

On a

$$1\,000\,000 \text{ W} = \sqrt{3} \times 10\,000 \times i_{eff} \times 0{,}8$$

d'où $i_{eff} = 72{,}1$ A.

$$r = \frac{\rho\, l}{s} = \frac{1{,}7 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^{6}}{0{,}32} = 4{,}37 \text{ O}.$$

On possède dès lors toutes les données pour dresser le diagramme précédent, relatif à ce cas.

Détermination de la section des conducteurs. — La section des conducteurs peut se déterminer, soit d'après les conditions de sécurité (effet Joule), soit d'après la chute maximum de tension que l'on admet ou que limite le bon fonctionnement des récepteurs, soit en se basant sur des considérations purement économiques.

Pour simplifier, nous n'envisagerons que le cas des courants continus. S'il s'agit de courants alternatifs, il faut tenir compte, éventuellement, de l'inégale répartition du courant dans la section (effet Kelvin).

1° **Effet Joule.** — Traversé par un courant d'intensité i, un conducteur cylindrique nu, de résistivité ρ, de longueur l et dia-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mètre d, développera par seconde un nombre de petites calories (T. I, p. 18) donné par

$$0{,}24\, i^2 r = \frac{0{,}328\, i^2 \rho l}{d^2} = \frac{k\, i^2 l}{d^2}.$$

La température augmentera, jusqu'au moment où il y aura équilibre entre la quantité de chaleur développée par seconde dans son sein, et celle qui se dissipe par sa surface pendant le même temps.

Cette dissipation s'effectue de deux façons : par convection et par rayonnement.

La chaleur entraînée par convection et par cm^2, dépend de l'excès t de la température du corps sur celle de l'air ambiant et des dimensions du conducteur $c = k_1 t/d$.

Celle dissipée par rayonnement dépend d'un coefficient k_2.

La chaleur dégagée par seconde par la surface πdl sera

$$\left(\frac{k_1 t}{d} + k_2\right) \pi dl$$

et l'équilibre sera obtenu quand

$$\frac{k\, i^2 l}{d^2} = \left(\frac{k_1 t}{d} + k_2\right) \pi dl \qquad (1)$$

d'où

$$i^2 = \mathrm{K}' d^2 + \mathrm{K}'' d^3. \qquad (2)$$

Pour les fils minces, le deuxième terme disparaît ; pour les fils épais, c'est le premier qui s'évanouit.

Quelles que soient les conditions spéciales auxquelles la canalisation doit satisfaire, il est essentiel que la section soit suffisante pour que l'échauffement ne compromette pas la résistance mécanique de la ligne, si celle-ci est aérienne, ou l'intégrité de son revêtement isolant, si elle est constituée par un fil recouvert. On admet que le plus fort échauffement au-dessus de la température ambiante ne doit pas dépasser 70° C. Le courant maximum admissible étant le double de l'intensité normale, cette surélévation de 70° pourra donc être produite par le double de l'intensité normale, ce qui correspond à une élévation d'environ 10° au-dessus de la température ambiante pour le courant normal.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

LIGNES EN FIL NU. — On peut admettre (1)

$$I^2 = t\,(3,1\,d^2 + 1,2\,d^3)$$

dans laquelle 3, 1 et 1, 2 sont les coefficients pour une élévation de température de 1°. Par conséquent, pour une élévation de 10° on aura

$$I^2 = 31\,d^2 + 12\,d^3 \qquad (3)$$

En fonction de la section, cette formule devient

$$I^2 = 39,5\,s + 17,2\,s^{\frac{3}{2}} \qquad (4)$$

que l'on pourra écrire pratiquement

$$I^2 = 40\,s + 17\,s^{\frac{3}{2}} \qquad (5)$$

Les câbles torsadés répondent aussi à ces formules.

La formule (4) permet d'établir un tableau des sections normales des fils nus :

s en mm^2	d en mm	i	Densité par mm^2
0,75	0,977	6,39	8,5
1	1,13	7,54	7,54
1,50	1,38	9,74	6,5
2,50	1,79	12,93	5,17
4	2,26	17,23	4,3
6	2,77	22,19	3,7
10	3,57	30,68	3
16	4,50	41,05	2,56
25	5,65	56,16	2,25

CONDUCTEURS ISOLÉS AU CAOUTCHOUC A L'AIR LIBRE. — Pour ceux-ci la formule devient

$$I^2 = 100\,s + 21\,s^{\frac{3}{2}} \qquad (6)$$

Les densités *sont sensiblement plus élevées* que celles des conducteurs nus, à cause de l'influence refroidissante de l'isolant.

CONDUCTEURS SOUS CAOUTCHOUC EN TUBES GENRE BERGMANN. — Les valeurs du courant pour les conducteurs placés dans des tubes Bergmann concordent très bien avec les valeurs observées pour des conducteurs nus.

CONDUCTEURS TORSADÉS PLACÉS SUR ISOLATEURS. — Les valeurs

(1) J. TEICHMULLER et P. HUMANN. *Sur la charge des conducteurs employés dans les canalisations intérieures*. Eclairage Electrique du 1/6/07, p. 317.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

relatives aux conducteurs torsadés, placés sur isolateur, correspondent à celles des conducteurs sous caoutchouc.

On peut conclure de ces divers résultats que la loi exprimée par l'équation (2) s'applique avec une exactitude suffisante à toutes les sortes de conducteurs, à condition de déterminer les constantes pour chacun d'eux. Toutefois, les différences ne sont pas suffisamment sensibles, pour que l'on ne puisse s'en tenir aux seules formules (3) et (5) et appliquer, dans tous les cas, les chiffres relatifs aux conducteurs nus.

En pratique, on est limité par les prescriptions municipales ou celles des fournisseurs de courant. Par exemple, le service d'électricité de la ville de Bruxelles n'admet pas que le courant normal dépasse 3 A par mm² pour les sections de 1 à 10 mm²; 2 A par mm² de 10 à 50; 1,5 de 50 à 100 et enfin 1 A par mm² au-delà de 100 mm².

2° **Chute de voltage.** — La chute de voltage dans une canalisation de résistance r, traversée par un courant i, est $ri = \rho 2li/s$. Si l'on s'impose une chute δV, on aura

$$\rho 2li/s = \delta V,$$

équation permettant de déterminer la seule inconnue s.

3° **Condition d'économie ; règle de lord Kelvin.** — Nous venons de voir que la quantité de chaleur dégagée par le conducteur d'une canalisation bifilaire de l mètres est $\rho\, 2li^2/s$ watts. Si la canalisation fonctionne t heures par an, la dissipation d'énergie qui en résulte est de $\rho\, 2l\, i^2\, t/s$ watts-heures.

Quant à son coût, il faut remarquer que la somme des frais de production de l'énergie électrique (comme de n'importe quel produit en général), contient une quantité constante et une quantité proportionnelle à l'énergie développée. En effet, l'usine étant établie, son amortissement reste le même, qu'elle fonctionne plus ou moins. Les frais d'administration sont également indépendants de la production. Au contraire, les coûts du charbon, de l'huile, etc., sont proportionnels à l'énergie produite et ce sont eux seulement qui doivent intervenir dans notre calcul, puisqu'il s'agit de watts-heures *supplémentaires* produits. Appe-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lons p le prix du watt-heure supplémentaire. La dépense par effet Joule sera

$$\rho\, 2li^2tp/s.$$

Cette dépense peut être réduite autant qu'on veut, en majorant la section. Mais alors le coût des canalisations et, par suite, leur amortissement augmente. On conçoit qu'il existe une certaine section pour laquelle la somme des dépenses par effet Joule et d'intérêt et amortissement du capital soit minimum.

Le coût des canalisations comprend : d'une part, le prix du transport des matériaux, des tranchées, des remblais, etc., qui sont sensiblement indépendants de la section des conducteurs; d'autre part, le coût du ou des conducteurs et de leur isolant.

En appelant m le coût des tranchées ou supports par unité de longueur *de conducteur* et n le prix de celui-ci, par unité de volume, le coût de l'isolant pouvant être considéré comme indépendant de s, le prix de premier établissement ressortira, pour une canalisation bifilaire, à :

$$m2l + n2sl = 2\,(m + ns)\,l.$$

a représentant l'intérêt et l'amortissement du capital engagé, la dépense annuelle due aux canalisations seules sera $2(m+ns)la$, soit, pour la dépense annuelle totale :

$$2\,i^2\rho tp/s + 2\,(m + ns)\,la.$$

Elaguons la partie indépendante de la section $2\,mla$, il reste

$$2i^2\rho ltp/s + 2\,nsla.$$

Le produit de ces deux termes étant constant, leur somme est minimum quand ils sont égaux, et nous pourrons dire que : *La transmission la plus avantageuse est celle pour laquelle la dépense annuelle d'intérêt et d'amortissement du cuivre de la ligne est égale à la valeur de l'énergie dont cette ligne entraîne annuellement la dissipation par effet Joule.*

Egalons donc les deux termes ci-dessus ou, ce qui revient au même, leurs racines carrées, ce qui nous permet d'écrire directement :

$$i\sqrt{\rho tp} = s\sqrt{na} \quad \text{ou} \quad s = i\sqrt{\frac{\rho tp}{na}}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La densité de courant la plus économique ressort ainsi à

$$\frac{i}{s} = \sqrt{\frac{na}{\rho t p}}$$

et la chute de tension la plus économique à :

$$\rho 2l \frac{i}{s} = 2l \sqrt{\frac{na\rho}{tp}}.$$

Nous avons supposé i constant. En pratique, le courant traversant les canalisations est presque toujours variable, mais ses variations revêtent généralement un caractère de périodicité permettant de déterminer les valeurs moyennes à introduire dans les formules. En appelant i_1, i_2, i_3, ... les courants passant pendant les temps t_1, t_2, t_3, ... heures; r la résistance de la ligne et t la durée totale d'utilisation des circuits, l'effet Joule moyen sera fourni par une intensité moyenne i_m, telle que $i_m^2 rt = i_1^2 rt_1 + i_2^2 rt_2 + \ldots$

D'après des déterminations faites dans des distributions urbaines, le courant maximum = 2,34 à 3,41 fois le courant moyen déterminé comme ci-dessus.

Il est curieux de noter que la densité trouvée est indépendante de la longueur de la ligne.

Il n'en est plus de même si le problème se pose comme suit : *Quelles sont les valeurs du courant i, de la section s (et par suite la densité du courant) qui permettent de réaliser, dans les conditions les plus économiques, le transport d'une puissance P à une distance l, pour une tension à l'origine égale à e?*

Toutefois les résultats auxquels on arrive, ne diffèrent pas notablement de ceux qui résultent de l'application pure et simple de la règle de Kelvin (1).

Remarque. — La règle de Kelvin étant établie sans tenir compte de la limitation pratique de la densité du courant, ni des exigences des récepteurs quant aux variations tolérables de

(1) Sarrat. *Discussion sur les conditions les plus favorables pour le transport de l'énergie.* Bulletin Montefiore, n° 5 de 1905.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

voltage, peut conduire à des sections inadmissibles. On vérifiera donc, à ces deux points de vue, les résultats auxquels son application conduit.

---

§ 4. — Appareils accessoires : commutateurs, interrupteurs, fusibles, parafoudres et limiteurs de tension.

Un certain nombre d'appareils accessoires, soit de manœuvre, soit de sécurité ou de protection, doivent se placer à l'origine ou en différents endroits des canalisations.

Commutateurs et interrupteurs. — Les *commutateurs* ont pour objet de permettre d'envoyer le courant soit en divers points d'un circuit, soit dans un ou plusieurs autres circuits. Nous en avons rencontré plusieurs exemples. Le collecteur des dynamos n'est rien autre qu'un commutateur tournant ; les adjoncteurs de charge et de décharge des accumulateurs, les lames glissantes des rhéostats de champ sont des commutateurs. Les *interrupteurs* établissent ou suppriment simplement l'admission du courant dans une ou plusieurs canalisations, toujours les mêmes. Ils constituent donc un cas particulier des commutateurs. Mais, comme la constitution de leurs organes essentiels n'est pas sensiblement différente et qu'ils sont plus répandus dans les installations industrielles, c'est sur eux que portera plus particulièrement notre examen. Ils se divisent en deux grandes classes : les interrupteurs à main et les interrupteurs automatiques.

Interrupteurs à main. — A RUPTURE LENTE. — Si la canalisation est à bas potentiel et ne véhicule que des courants peu intenses (moins d'un demi-ampère), l'interrupteur peut consister en une simple lame pivotante que l'on amène, à la main, sur un plot. La lame et le plot sont raccordés aux points à réunir.

RUPTURE BRUSQUE. — Dès que la différence de potentiel ou l'intensité s'élèvent, il devient nécessaire de prévoir un disposi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tif rompant brusquement le circuit, de manière à réduire à un minimum le temps pendant lequel persiste l'arc consécutif à la rupture. L'appareil comporte un (interrupteur unipolaire) ou plusieurs (interrupteur multipolaire) couteaux en cuivre C (fig. 323), pivotant autour d'un axe et sollicités par un ressort R.

Le couteau peut être amené dans les deux mâchoires métalliques MM, réunies à des douilles SS d'attache des conducteurs, au moyen d'un levier pourvu d'une poignée isolante P. Pour rompre le circuit, on soulève le levier P dont un ergot vient faire basculer le couteau C. Sous la traction de R, celui-ci se sépare alors rapidement des mâchoires, coupant brusquement le courant.

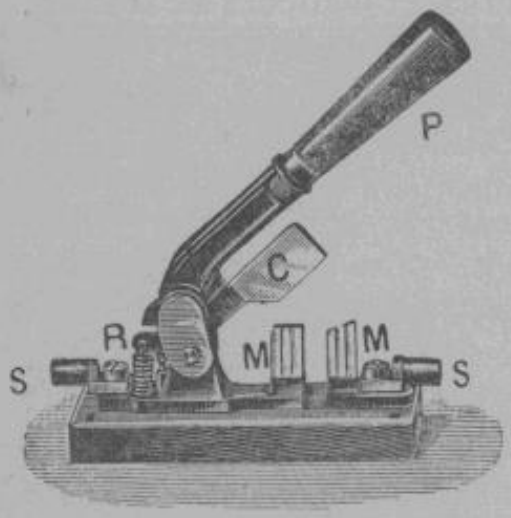


Fig. 323.

On prévient un échauffement dangereux des couteaux et des mâchoires, en leur donnant une surface de contact d'au moins 5 millimètres carrés par ampère. La longueur de la rupture produite doit être au minimum de 1 centimètre par 100 volts dans l'air et par 500 volts dans l'huile.

Interrupteurs avec pare-étincelle. — Dans l'appareil que nous venons d'étudier, l'étincelle de rupture jaillit toujours aux mêmes points entre le couteau et une des mâchoires, d'où détérioration des parties coûteuses de l'appareil. On y remédie en munissant chaque couteau d'une lame supplémentaire A (fig. 324), qui continue à toucher la lame-ressort B rattachée à la mâchoire correspondante, après que le couteau a quitté cette dernière,

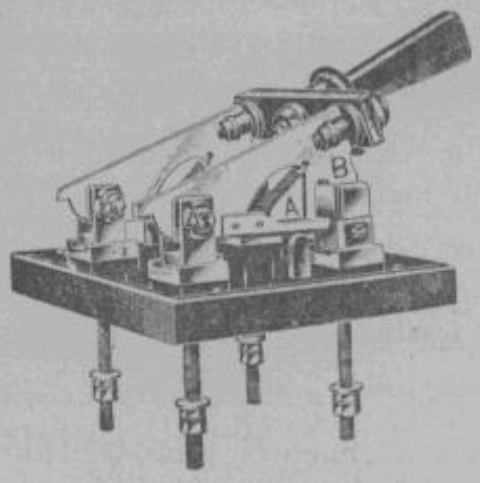


Fig. 324.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puis le ressort sépare brusquement A de B. C'est donc entre ces lames grossières et aisément remplaçables, dont l'une est souvent constituée par un bloc en charbon, qu'éclate l'étincelle de rupture.

Interrupteurs automatiques. — Il peut être nécessaire de couper un circuit dès que le courant tend vers zéro (charge des accumulateurs) ou s'élève jusqu'à une certaine limite (question de sécurité pour l'effet Joule). De là les interrupteurs à minima et à maxima. Ces appareils comportent tous l'emploi d'un électro-aimant, enclenchant un ou des couteaux continuellement sollicités à rompre un ou des circuits sous l'action de contrepoids ou de ressorts. Dès que le courant dépasse les limites fixées, le déclenchement se produit.

A titre d'exemple, décrivons un interrupteur à minima fréquemment employé dans les installations d'accumulateurs. Deux godets G_1, G_2 (fig. 325), remplis de mercure, se rattachent à des

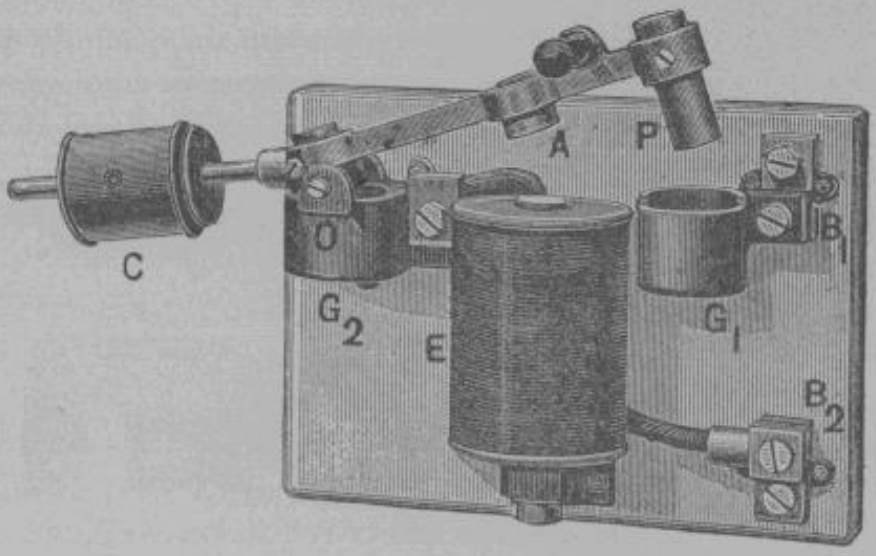


Fig. 325.

bornes de connexion B_1, B_2, le premier directement, le second par l'intermédiaire de l'électro E, dont l'armature A, pivotant autour de l'axe O, est sollicitée vers le haut par le contrepoids C. En abaissant l'armature A à la main, des plongeurs P viennent baigner dans le mercure, le courant peut passer, retenant dès lors l'armature abaissée, si son intensité est suffisante. Quand

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

celle-ci tombe à une valeur déterminée, l'action du contrepoids prédomine et le circuit est automatiquement rompu.

Les interrupteurs employés pour les hautes tensions à partir de 2 000 volts, doivent couper chaque pôle au moins en deux endroits différents. Dans cet ordre d'idées, la Société Voigt et Haeffner admet 4 ruptures de 12 à 16 000 volts, 6 jusque 25 000 et 10 pour 40 000. La rupture se fait toujours dans l'huile.

Fusibles, coupe-circuits ou sûretés. — Les interrupteurs à maxima sont excellents, mais coûteux. En pratique, par raison d'économie, on évite les dangers d'échauffement exagéré, en insérant à l'origine des conducteurs, des fils ou lames en métal fusible, qui sont établis pour fondre dès que l'intensité dépasse le double de l'intensité normale. Le fusible de 10 A fond donc à 20.

Les métaux les plus employés dans ce but sont l'étain, divers alliages de plomb, bismuth, étain, zinc, enfin l'argent et le platine. Ce dernier métal est réservé pour les très faibles intensités, en raison de son prix élevé.

La longueur du fusible ne doit jamais descendre au-dessous de 2 centimètres, pour éviter l'influence refroidissante des attaches.

On doit le protéger mécaniquement en le plaçant, pour éviter les projections de métal fondu, sous un couvercle isolant ou dans des boîtes vitrées à parois suffisamment écartées.

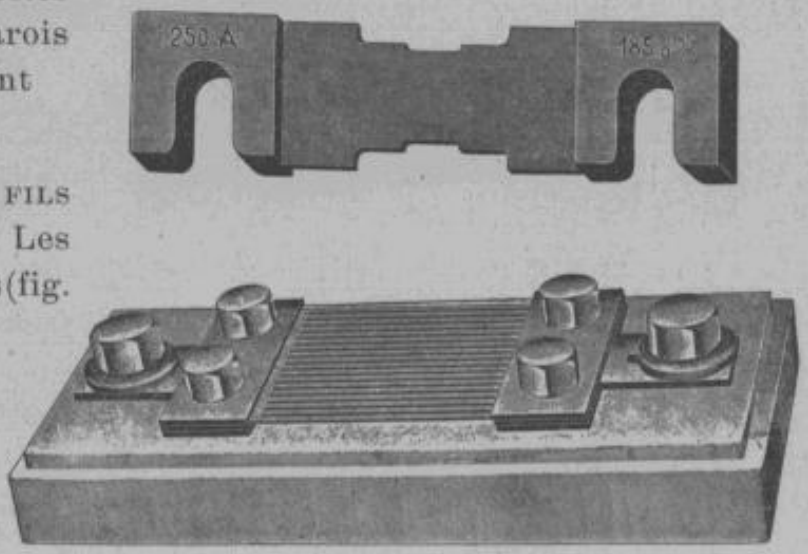


Fig. 326, 327.

Lames et fils multiples. Les lames fusibles (fig. 326) se terminent souvent par des pattes renforcées, permettant de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les serrer dans les bornes. Elles présentent fréquemment en leur milieu un étranglement qui favorise un sectionnement net.

Quand les courants sont intenses, il est préférable de remplacer la lame, dont la grande masse exige un temps notable avant que la fusion ait lieu et qui admet, par suite, de fortes surcharges, par des fils ou lames minces disposés en dérivation (fig. 327). Le fonctionnement de ceux-ci, pour une intensité déterminée, est beaucoup plus certain.

Fusibles Edison. — Le dispositif Edison est tres répandu. Il comporte un bouchon creux en porcelaine (fig. 328), portant à sa partie inférieure un piton B, et extérieurement une vis en métal embouti E. Ces deux pièces sont réunies par un fil fusible; le reste de la cavité centrale est obturé par de l'asbeste, retenu par un couvercle vissé C. Le socle présente un filet de vis embouti, raccordé à une borne, tandis que le fond métallique, qui en est isolé, se raccorde à l'autre borne. Le conducteur à protéger vient se fixer dans les bornes.

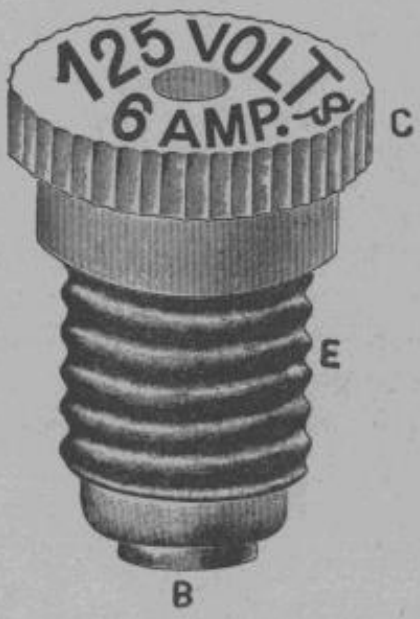


Fig. 328.

En vissant à refus le bouchon dans le socle, le piton B vient prendre contact avec le fond, tandis que la vis E s'applique sur la douille en rapport avec l'autre borne. Le fusible se trouve ainsi inséré dans la canalisation.

Les bouchons et les douilles des diverses intensités courantes sont de dimensions différentes, pour empêcher qu'on puisse les remplacer par des appareils de plus fort calibre.

Quand il s'agit de hautes tensions, il convient d'adopter de longs fusibles, pour éviter la production d'un arc permanent. La longueur atteint 20 et même 40 cm pour 2 000 à 10 000 volts. Le fil est, en outre, entouré d'une masse convenablement divisée,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ayant pour objet de condenser la vapeur métallique, et ainsi d'étouffer l'arc dès sa formation.

On emploie aussi des fusibles très courts en argent, plongeant dans de l'huile contenue dans un tube en porcelaine, tendus par des ressorts en haut et en bas. Si un fil vient à fondre, les ressorts sont brusquement rappelés vers les deux extrémités, augmentant rapidement la distance entre les deux électrodes. La fig. 329 donne la vue d'un fusible de l'espèce pour 35 000 volts.

Dans le cas de la haute tension, les fusibles servent d'interrupteurs (fig. 330). Enfermés dans un tube isolant T, ils se rac-

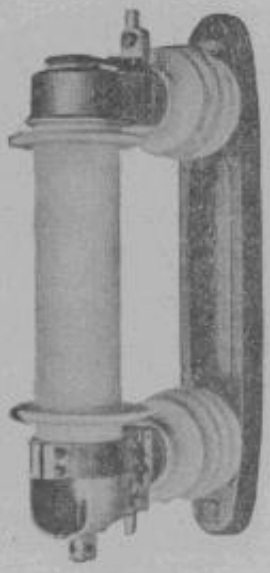


Fig. 329.

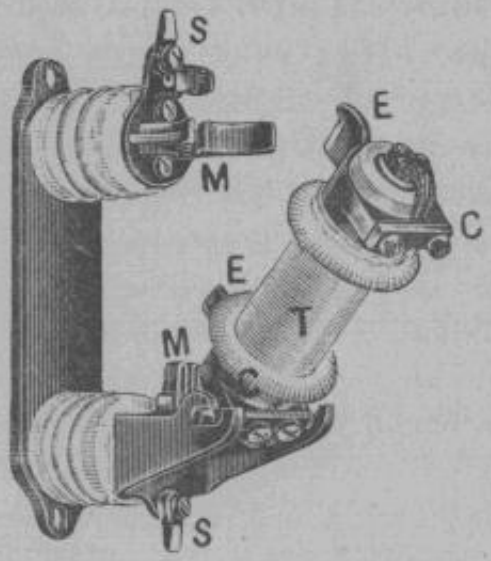


Fig. 330.

cordent par leurs extrémités à un collier C, portant un ergot qui peut s'introduire dans les mâchoires M. La poignée en porcelaine T porte des rebords de sûreté à ses deux extrémités. Le fusible de la fig. 329 est aussi de ce genre.

Emplacement des fusibles. — Un fusible général doit être placé immédiatement après le compteur (en venant des canalisations) dans les installations particulières ou, si celles-ci produisent elles-mêmes leur courant, à la sortie des sources qui les alimentent. On admet qu'une sûreté est suffisante pour des circuits dérivés ne véhiculant pas plus de cinq ampères. En outre,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en raison de leur plus grande facilité à se mettre en courts-circuits, tous les circuits en fils torsadés (fils souples), à conducteurs de polarités différentes, doivent être pourvus de fusibles et, d'une manière générale, *ceux-ci doivent se trouver à tous les changements de section des conducteurs*. De cette façon la suppression de courant causée par leur fonctionnement, n'affecte que le branchement dans lequel un court-circuit s'est produit. *On groupe avec avantage ces appareils sur des tableaux*, de manière à faciliter leur remplacement et la recherche des dérangements.

Si l'on n'admet qu'un fusible par circuit, ils doivent être tous placés dans les fils de même polarité. Comme dans les installations importantes, il est à peu près impossible d'être certain que cette condition sera satisfaite, il est nécessaire, pour obtenir un maximum de sécurité, d'insérer un fusible dans chaque conducteur, c'est-à-dire d'utiliser des fusibles bi- ou tripolaires, selon que les circuits comportent eux-mêmes deux ou trois fils actifs. On n'en place pas dans les fils neutres.

Degré de sécurité obtenu. — Le fonctionnement du fusible est précaire, et cela se conçoit aisément. D'après l'équation (1) précédemment établie, la quantité de chaleur emmagasinée par seconde dans un conducteur de longueur l est, abstraction faite de l'influence refroidissante des extrémités,

$$\frac{k\,i^2\,l}{d^2} - \left(\frac{k_1\,t}{d} + k_2\right)\pi\,d\,l.$$

En appelant M la masse du fusible, c sa chaleur spécifique, t_1 l'excédent de sa température de fusion au-dessus de la température ambiante, le temps T nécessaire pour le fondre sera donné par

$$\int_0^T \left\{\frac{k\,i^2\,l}{d^2} - \left(\frac{k_1\,t}{d} + k_2\right)\pi\,d\,l\right\} d\,t = \mathrm{M}\,c\,t_1.$$

Cette équation est une fonction très complexe de i, l, d, t, à laquelle on pourra satisfaire d'une infinité de manières. Plus i est faible, plus T devra être considérable pour amener la fusion, et l'intensité limite dépendra essentiellement, pour un fusible

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

donné, de la rapidité avec laquelle l'augmentation de l'intensité se produit.

En raison de ce caractère d'incertitude, il conviendra d'accorder la préférence, autant que possible, aux appareils automatiques, dont le fonctionnement peut être assuré à 5 % près de l'intensité limite pour laquelle ils sont établis.

Protection contre la foudre. — Lorsqu'une partie quelconque d'une installation est aérienne, il y a lieu de la protéger par des parafoudres, ainsi que les canalisations en fil recouvert qui s'y raccordent.

Parafoudre des supports. — Il convient de protéger les supports placés sur des éminences. Un dispositif simple pourra être constitué par deux fils de fer galvanisés de 3 à 4 millimètres de diamètre, fixés sur deux faces opposées, venant se terminer en pointes aériennes à la tête du support, et se raccordant au pied de celui-ci, à une plaque métallique (zinc, cuivre ou fonte) d'un demi-mètre carré de surface au moins, enfouie dans le sol perpétuellement *humide*, autant que possible.

Le rôle d'un tel parafoudre est double : il offre une voie aisée à la décharge, *action préservative* et, si l'élévation de potentiel n'est pas trop brusque, il atténue cette dernière s'il ne la supprime, en permettant à l'électricité induite dans le sol de fuser par ses pointes en tendant ainsi à rétablir l'équilibre des potentiels, *action préventive*. Dans le raccordement à la terre, il y a lieu d'éviter les brusques changements de direction.

Fil de terre général. — On rend plus complète la protection, en tendant au-dessus de la ligne un conducteur d'assez gros diamètre, raccordé à la terre comme il vient d'être décrit pour les supports en bois, et directement relié aux appuis métalliques. C'est en somme une réduction de la cage de Faraday. Le système paraît très sûr, mais il est coûteux. En outre, il présente des dangers de court-circuit en cas de rupture du fil de terre.

Parafoudres des conducteurs. — Parafoudres a cornes. — Si la décharge atmosphérique emprunte des conducteurs, il est dési-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rable de l'en faire sortir pour éviter qu'elle n'atteigne les appareils. Or, comme elle affecte souvent la forme d'une décharge oscillante de fréquence très élevée, l'impédance des circuits lui oppose une telle obstruction, qu'elle a une grande tendance à provoquer des décharges latérales, d'ailleurs très destructives pour les constituants de la ligne. Il est donc utile de munir les conducteurs aériens à courants forts de parafoudres à cornes, constitués par une ou plusieurs paires d'arcs métalliques divergents CC_1 (fig. 331), séparés à la base par un intervalle d'air I et raccordés, les uns C au fil à protéger, les autres C_1 à la terre.

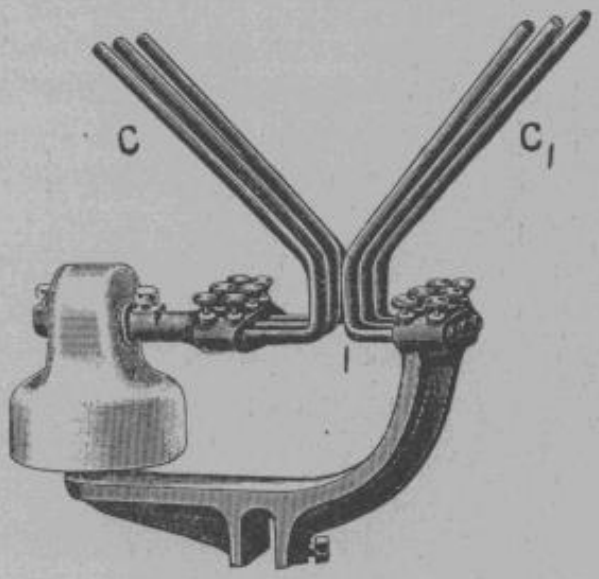


FIG. 331.

Une décharge atmosphérique à haute tension franchit aisément l'espace d'air I, puis, si le voltage de la ligne est suffisant pour alimenter l'arc momentané développé, celui-ci, poussé vers le haut par le courant d'air chaud qui se développe, se propage le long des cornes et s'allonge jusqu'à rupture.

Le nombre de cornes à admettre dépend de la tension de l'installation. On en monte parfois plusieurs en série en réduisant leur distance, ce qui rend le déchargeur plus sensible. Quant à l'écartement minimum, on admet 1 mm par 1 000 volts et au moins 3 mm à la base pour éviter les courts-circuits accidentels : insectes, poussières, etc.

Le déchargeur à cornes n'est pas sans présenter quelques inconvénients : l'arc est trop long à se rompre, ce qui correspond à une dépense non-négligeable d'énergie ; comme il produit un court-circuit sur le réseau, son emploi est incompatible avec celui des moteurs synchrones. On a coutume, aujourd'hui, de mettre en série avec lui, une grande résistance pour limiter le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courant, mais cette résistance présente l'inconvénient de ralentir la décharge statique.

La simplicité d'établissement et le bon marché du déchargeur à cornes à intervalle unique le font souvent conserver, pour la protection des lignes aériennes, dans les régions où les orages sont peu fréquents, ou comme grand secours contre les décharges atmosphériques de très grande énergie. On l'emploie encore réglé bas et monté en série, pour perfectionner le fonctionnement de déchargeurs d'autres types. Pour les autres applications on tend à le remplacer par le déchargeur à cylindres (1).

Déchargeurs a cylindres. — En disposant en ligne droite ou en zigzag sur une plaque isolante, une série de cylindres métalliques parallèles, de préférence en laiton, distants l'un de l'autre de 0,8 mm on obtient un déchargeur très sensible et qui, grâce à l'importance de sa masse métallique, retarde par refroidissement, la transformation de l'étincelle en arc. Ici encore, l'expérience a montré qu'il était nécessaire de placer une résistance en série. Toutefois, pour pouvoir réduire celle-ci suffisamment, il y a lieu de multiplier le nombre de cylindres ou de placer un éclateur principal en tête de la file des intervalles.

Certains constructeurs shuntent une partie des cylindres par des résistances ohmiques. Dans ce cas, l'appareil doit comporter environ le double des intervalles nécessaires pour maintenir la tension de la ligne; la moitié en est shuntée par les résistances. Quand il n'y a pas de décharge, la moitié des intervalles non shuntés maintient la tension de la ligne. Quand celle-ci devient excessive, les intervalles entrent en jeu tout d'abord, puis la décharge se propage entre les intervalles shuntés (voir T. I, p. 305, effet d'une décharge instantanée).

Parafoudres a jet d'eau. — Chaque conducteur de la ligne, se trouve relié à un jet d'eau, fourni par un réservoir qu'ali-

(1) Grosselin, *Protection des réseaux contre les surtensions*, Congrès de Marseille.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mente un tuyau en caoutchouc et cette eau tombe dans une citerne, pourvue d'une bonne communication avec la terre ; ou bien encore, on dispose d'une masse d'eau sous pression, qui s'échappe en un jet vertical, venant frapper une plaque métallique reliée à la ligne.

Celle-ci se trouve ainsi mise à la terre, par une colonne liquide ininterrompue, mesurant 60 cm de longueur et environ 12 mm^2 de section. On évite ainsi toute charge statique sur les conducteurs et le maintien d'un arc n'est pas possible. On complète par des déchargeurs à cornes.

Ces parafoudres ont l'avantage d'être efficaces et peu coûteux. On peut toutefois leur reprocher d'être encombrants et de donner une perte constante à la terre (plusieurs kilowatts par appareil), qui en fait souvent rejeter l'emploi.

Parafoudres des appareils et câbles : PARAFOUDRES A POINTES. — Les machines ou appareils sont généralement protégés par des peignes métalliques à dents aiguës $L_1 L_2$ (fig. 332), raccordés aux fils de ligne. Les peignes sont placés vis-à-vis et à faible distance d'autres peignes reliés à la terre. Pour éviter qu'après un coup de foudre un arc permanent ne les détruise, un fusible est interposé dans le fil qui les raccorde aux lignes.

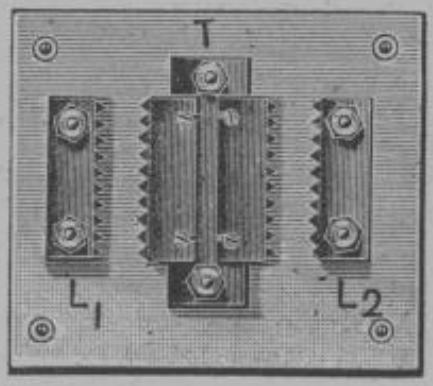


FIG. 332.

On facilite la décharge disruptive entre les peignes en insérant, immédiatement avant les machines, quelques spires de fil dont la faible selfinduction est néanmoins suffisante pour présenter une obstruction insurmontable aux manifestations orageuses de très haute fréquence.

Dans les installations à bas potentiel (télégraphiques et téléphoniques), on assure de plus un écartement très faible des surfaces métalliques en présence, par l'interposition d'une feuille de papier. L_1 et L_2 (fig. 333) sont des plaques raccordées aux fils

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de ligne au moyen des bornes L_1 et L_2. Elles se terminent en peigne vis-à-vis de la plaque de terre T. En outre, une plaque prenant directement appui sur cette dernière, repose sur les deux autres par l'intermédiaire d'une mince feuille de papier.

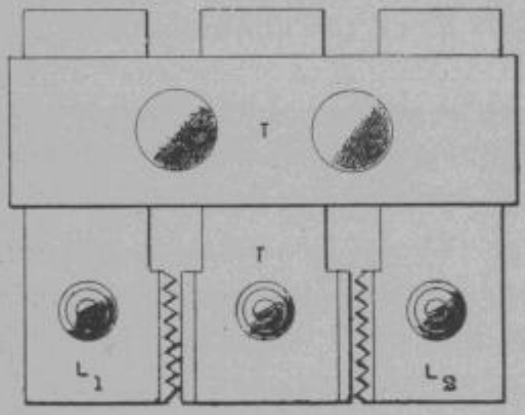


Fig. 333.

On remplace généralement les plaques métalliques par des prismes de charbon dur, séparés par une feuille de mica, pour empêcher que le fonctionnement du parafoudre ne provoque le soudage des plaques et une mise à la terre permanente.

Il est utile de rapprocher les plaques de ligne jusqu'à un millimètre de distance environ, pour permettre la décharge directe des conducteurs l'un sur l'autre.

Parafoudre a vide de Siemens. — Un type très efficace, d'un fonctionnement sûr et ne nécessitant aucun entretien, est constitué par des blocs en charbon striés, raccordés aux fils de ligne, comprenant entre eux un bloc de charbon à stries perpendiculaires aux premières et réuni à la terre. Le tout est enfermé dans une ampoule épaisse, en verre, privée d'air.

Parafoudre électrolytique. — Certains parafoudres mettent à contribution la propriété des soupapes électrolytiques de n'être traversées par le courant quand l'aluminium est anode, que si la différence de potentiel dépasse un certain quantum. Ils sont constitués par des assiettes en aluminium, isolées les unes des autres et baignant dans un électrolyte approprié. On emploie aussi des condensateurs qui se laissent traverser par les décharges atmosphériques de très hautes fréquences et non par les courants industriels.

Protection contre les surtensions : limiteurs de tension. — Ces appareils ont pour objet d'établir la communication avec la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

terre lorsque, par une cause anormale quelconque, la tension s'élève à une valeur telle qu'il puisse en résulter des dommages pour les circuits ou les appareils.

La plupart des dispositifs précédemment décrits, particulièrement ceux à cylindres, conviennent à condition d'être réglés d'une façon suffisamment sensible.

Protection contre les ruptures de fil. — Pour parer aux dangers dus à la rupture de conducteurs portés à haut potentiel, on place à proximité de leurs points d'attache des rampes métalliques de formes diverses, mises sur terre, avec lesquelles ils viennent en contact. Les appareils de sécurité fonctionnent alors à l'usine, tandis que le conducteur rompu, porté au potentiel de la terre, devient inoffensif.

S'il s'agit de fils minces comme les fils téléphoniques, pouvant être accidentellement mis en contact avec des conducteurs à haut voltage, on tend parallèlement au-dessus de ces derniers un ou plusieurs fils de garde de 3 à 4 mm de diamètre, *en bonne liaison avec la terre.*

Un fil mince étant projeté sur cet ensemble, il prendra appui sur les fils de garde puis, venant en contact avec un conducteur à haut voltage, sera coupé sur celui-ci par suite de la grande intensité qu'il véhiculera entre les deux systèmes de conducteurs.

Enfin, lorsque des conducteurs à haut potentiel passent au-dessus des voies publiques, on les entoure généralement d'une véritable cage métallique formée de gros fils longitudinaux de 3 ou 4 mm de diamètre, réunis de deux en deux mètres par des fils minces transversaux (2 mm). Le tout est mis sur terre à chaque appui.

La cage est parfois réduite à un filet de retenue suivant les circonstances locales.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XII.

Transport de l'énergie.

---

§ 1. — Choix du courant.

Nous allons chercher *le poids de cuivre exigé dans les canalisations par les diverses espèces de courant, pour transmettre à la même distance l et avec la même perte par effet Joule, une puissance déterminée* W, *sous un voltage maximum donné entre deux fils consécutifs.*

La résistance d'un conducteur de longueur l, de résistivité ρ et de section s est, comme nous le savons, donnée par l'équation $R = \rho\, l/s$. Puisque son poids $p = sl\delta$, δ étant le poids spécifique, la résistance

$$R = \frac{\rho l^2 \delta}{p} = \frac{K}{p}.$$

Elle est inversement proportionnelle au poids du conducteur.

Pour simplifier, nous supposerons les courants alternatifs en concordance de phase avec leur force électromotrice, c'est-à-dire $\cos\varphi = 1$. C'est une hypothèse qui leur est favorable relativement au courant continu puisque, à force électromotrice maximum donnée, pour transmettre une puissance déterminée, le courant alternatif déphasé de φ doit être majoré dans le rapport $1/\cos\varphi$, et l'effet Joule augmente dans le rapport $1/\cos^2\varphi$. Toutefois, nos conclusions n'en seront pas altérées, le problème étant, pour le courant continu, limité par d'autres facteurs que l'effet Joule. D'ailleurs, au point de vue des diverses espèces de courants alternatifs, la comparaison restera exacte.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Courant alternatif.—$W = e_{eff}\, i_{eff}$. Le courant alternatif exige deux fils de ligne que l'on choisit de sections égales. En appelant p le poids d'un fil de ligne égal à la moitié du poids total P, on a pour sa résistance

$$R = \frac{K}{p} = \frac{2K}{P}.$$

L'effet Joule développé dans le circuit (2 fils de résistance R) sera

$$2 \cdot \frac{2K}{P} \cdot i^2_{eff} = \frac{4KW^2}{Pe^2_{eff}}.$$

Courant continu. — $W = EI$. Si nous opérons la transmission au moyen de courant continu, la tension de celui-ci pourra naturellement être celle maximum qu'acquiert le courant alternatif comparé. Donc le courant continu utilisé aura une tension $E = e_{eff}\sqrt{2}$. Remplaçons dans la valeur de W : $W = e_{eff}\sqrt{2}\, I$ d'où, pour l'intensité du courant continu

$$I = \frac{W}{\sqrt{2}\, e_{eff}}.$$

En appelant P_1 le poids total du cuivre nécessaire, la résistance d'un fil de ligne sera $R_1 = 2K/P_1$ et l'effet Joule

$$2\,\frac{2K}{P_1}\,\frac{W^2}{2e^2_{eff}}.$$

Egalons à l'effet Joule dans le cas du courant alternatif, nous aurons

$$\frac{4K}{P_1}\,\frac{W^2}{2e^2_{eff}} = \frac{4KW^2}{Pe^2_{eff}}$$

d'où $2P_1 = P$ et $P_1 = P/2$.

Le poids total de cuivre exigé par le courant continu, n'est que la moitié de celui requis par le courant alternatif.

Triphasé en étoile. — Envisageons maintenant le cas d'un générateur triphasé en étoile. Chaque branche de l'étoile étant le siège d'une force électromotrice efficace e'_{eff} et d'un courant i'_{eff}, la puissance développée sera

$$3\, e'_{eff}\, i'_{eff} = W, \text{ d'où } i'_{eff} = W/3\, e'_{eff}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Puisque c'est la tension e_{eff} régnant entre les fils de ligne qui gouverne le problème, exprimons la tension e'_{eff} dans un des enroulements en fonction de celle e_{eff} qui règne aux bornes de la machine, c'est-à-dire entre les fils de ligne. Nous avons vu que

$$e'_{eff} = \frac{e_{eff}}{\sqrt{3}}. \quad \text{Donc} \quad i'_{eff} = \frac{W}{\sqrt{3}\, e_{eff}}$$

P' représentant le poids des 3 fils de ligne, on aura pour la perte par effet Joule

$$3 \frac{3K}{P'} \cdot \frac{W^2}{3 e^2_{eff}} = \frac{3K}{P'} \frac{W^2}{e^2_{eff}}.$$

Égalons à la perte obtenue dans le cas du courant alternatif

$$3 \frac{K}{P'} \cdot \frac{W^2}{e^2_{eff}} = \frac{4KW^2}{Pe^2_{eff}}, \text{ d'où } P' = \frac{3}{4} P.$$

Le poids de cuivre exigé par le courant triphasé en étoile est égal aux trois quarts de celui nécessaire pour le courant alternatif.

Remarque. — Lorsque l'intensité du courant n'est pas exactement égale dans les fils de ligne, par suite de dissymétrie entre les circuits récepteurs, le système n'est plus exactement polyphasé, et il y a utilité de réunir les centres de l'étoile par un quatrième fil de ligne. On économise en général ce dernier, en raccordant les centres à la terre.

Triphasé en polygone. — Si le dispositif est en polygone, la force électromotrice existant entre deux sommets consécutifs sera celle e_{eff} admise pour la transmission. En appelant i''_{eff} l'intensité efficace des courants circulant dans chacun des côtés du polygone

$$3 e_{eff} i''_{eff} = W, \text{ d'où } i''_{eff} = W/3 e_{eff}.$$

En appelant i''_{eff} les courants passant dans chaque fil de ligne, nous savons que l'on a

$$i''_{eff} = \sqrt{3}\, i''_{eff} = \frac{W}{\sqrt{3}\, e_{eff}}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'effet Joule a pour valeur

$$3 \cdot \frac{3K}{P''} \frac{W^2}{3 e^2_{eff}} = \frac{3K}{P''} \frac{W^2}{e^2_{eff}}.$$

C'est précisément la même valeur que dans le montage en étoile, de sorte que le poids de cuivre nécessaire avec le montage en polygone reste le même : $P'' = 0{,}75\ P$.

Biphasé avec quatre fils de ligne. — Si nous avons deux circuits séparés pour le biphasé, leur tension sera e_{eff}. L'intensité efficace i'''_{eff} devra satisfaire à la condition

$$2 e_{eff} i'''_{eff} = W \quad \text{ou} \quad i'''_{eff} = \frac{W}{2 e_{eff}}.$$

P''' étant le poids des quatre fils de ligne de résistance

$$r''' = \frac{4K}{P'''},$$

l'effet Joule ressortira à

$$4 \cdot \frac{4K}{P'''} \cdot \frac{W^2}{4 e^2_{eff}} = \frac{4KW^2}{P''' e^2_{eff}}.$$

En imposant la même perte qu'avec l'alternatif,

$$\frac{4KW^2}{P''' e^2_{eff}} = \frac{4KW^2}{P e^2_{eff}}$$

et le poids total de cuivre nécessaire $P''' = P$, c'est-à-dire *est le même que pour l'alternatif.*

Biphasé avec trois fils de ligne. — Un des conducteurs sert de retour au courant des deux autres. En appelant e^{IV}_{eff} et i^{IV}_{eff} la force électromotrice et le courant efficaces dans chacun des circuits

$$W = 2 e^{IV}_{eff} i^{IV}_{eff}.$$

Voyons quelle différence de potentiel va régner entre les deux fils de ligne.

Les forces électromotrices dans chacun des circuits sont à l'instant t :

$$e_1 = E^{IV} \sin \omega t, \quad e_2 = E^{IV} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Leur différence

$$e_1 - e_2 = 2\,E^{IV} \sin\frac{\pi}{4}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) = \sqrt{2}\,E^{IV}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right),$$

c'est-à-dire que le voltage entre les deux fils de ligne vaut $\sqrt{2}$ fois celui existant entre chaque fil de ligne et le retour commun. (On obtiendrait immédiatement cette relation par les vecteurs.) Comme le voltage le plus élevé est égal à e_{eff} par hypothèse, nous aurons :

$$e^{IV}_{eff}\sqrt{2} = e_{eff}, \quad \text{d'où} \quad e^{IV}_{eff} = \frac{e_{eff}}{\sqrt{2}}.$$

Remplaçons dans la valeur de W :

$$2\,\frac{e_{eff}}{\sqrt{2}}\,i^{IV}_{eff} = W, \quad \text{d'où} \quad i^{IV}_{eff} = \frac{W}{\sqrt{2}\,e_{eff}}.$$

Cherchons quelle section nous devons donner au fil de retour. Le courant qui le parcourt à chaque instant est

$$I^{IV}\sin\omega t + I^{IV}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = 2\,I^{IV}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)\cos\frac{\pi}{4} =$$
$$\sqrt{2}\,I^{IV}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right).$$

Donc, le rapport de l'intensité du courant dans le retour à celle dans un des fils de ligne est $=\sqrt{2}$ et le poids du retour doit être $\sqrt{2}$ fois plus grand que celui d'un fil de ligne pour y maintenir la même densité de courant. p^{IV} étant le poids de chacun des fils de ligne, celui du fil de retour sera $p^{IV}\sqrt{2}$.

La perte en ligne sera dès lors

$$2\,\frac{K}{p^{IV}}\,\frac{W^2}{2\,e^2_{eff}} + \frac{K}{p^{IV}\sqrt{2}}\cdot\frac{W^2}{e^2_{eff}} = \frac{K\,W^2}{p^{IV}\,e^2_{eff}}\left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right).$$

Égalons-la, comme dans les cas précédents, à la perte consentie pour l'alternatif

$$\frac{K\,W^2}{p^{IV}\,e_{eff}}\,\frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}} = \frac{4\,K\,W^2}{P\,e^2_{eff}}, \text{ d'où l'on tire } p^{IV} = \frac{\sqrt{2}+1}{4\sqrt{2}}\,P.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le poids total est

$$\frac{\sqrt{2}+1}{2\sqrt{2}}\,P+\frac{\sqrt{2}+1}{4}\,P=1{,}456\,P.$$

En résumé, le transport *à la même distance d'une puissance déterminée, avec la même perte en ligne, sous une différence de potentiel donnée entre deux fils de ligne,* exige les poids de cuivre :

Alternatif	100
Continu	50
Triphasé (étoile ou polygone) . . .	75
Biphasé 4 fils.	100
Id. 3 fils.	145,6

Le coût de la ligne, représentant une fraction d'autant plus notable du coût total qu'elle est plus développée, on s'explique qu'*il ne reste en présence, pour le transport de l'énergie à grande distance, que les courants continus et triphasés.*

---

§ 2. — Courants continus.

Généralités. — Supposons qu'il s'agisse de machines à excitation indépendante ou en série. Appelons e la force électromotrice aux bornes de la génératrice, P la puissance mécanique qu'elle absorbe, e' la force électromotrice aux bornes de la réceptrice, p la puissance mécanique qu'elle restitue, I l'intensité du courant traversant le circuit et R la résistance de la ligne réunissant les deux machines.

Nous savons que les rendements industriels de la génératrice et du moteur ont respectivement pour expression

$$\eta_{ig}=\frac{eI}{P}, \qquad (1) \qquad\qquad \eta_{im}=\frac{p}{e'I}. \qquad (2)$$

Les rendements des appareils transmetteur et récepteur étant fixés, le rendement de la transmission $\eta_i = p/P = \eta_{ig}\,\eta_{im}\,e'/e$ sera d'autant plus grand que l'on perdra moins en ligne. Or, en vertu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de (1), la perte en ligne, $RI^2 = \frac{R P^2 \eta_{lg}^2}{e^2}$ sera d'autant plus réduite que la résistance R de la ligne atteindra une faible valeur, tandis que e, le voltage de départ, sera plus grand.

La valeur $R = \rho 2L/s$, ρ étant la résistance spécifique du métal employé, L la distance sur laquelle se fait le transport et s la section du conducteur. On réduira la résistance de la ligne en employant un métal très conducteur (ρ très faible) et augmentant sa section. On est toutefois limité dans cette dernière voie par le coût du métal qui est proportionnel à sa section.

Pour ce qui concerne e, on n'a guère dépassé jusqu'ici la tension de 14 à 15 000 volts. Ces hautes tensions sont obtenues en montant en série un certain nombre de génératrices, dont la tension individuelle n'excède pas 3 600 volts, à cause des gerbes d'étincelles se produisant alors au collecteur.

En résumé, les deux points dont il y a spécialement lieu de se préoccuper dans un transport d'énergie sont : *diminuer la résistance de la ligne et augmenter la tension autant que possible.*

L'économie due à l'élévation de la tension peut être aisément mise en évidence. La puissance EI devant être transmise par l'intermédiaire d'un conducteur de résistance R, la perte par effet Joule est RI^2. Si nous adoptons une différence de potentiel n fois plus grande, la même puissance sera transmise à l'aide d'un courant I/n, d'où un effet Joule n^2 fois moindre RI^2/n^2. Nous pourrons donc garder le même rendement que précédemment, en donnant au conducteur une section n^2 fois moindre ou une longueur n^2 fois plus grande.

Systèmes utilisés. — Au point de vue du mode d'enroulement de l'induit, on emploiera de préférence l'anneau avec un grand nombre de touches au collecteur, afin de réduire la différence de potentiel existant entre les organes voisins.

Quant aux inducteurs, l'enroulement en dérivation présente l'inconvénient de conduire à des machines coûteuses, par suite de la nécessité de les constituer en fil très fin. En outre, le grand coefficient de selfinduction qui en résulte, rend dangereuses les variations brusques de régime.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsqu'une haute tension est requise, on adoptera donc de préférence *l'anneau Gramme excité d'une manière indépendante ou mieux en série.* Des précautions minutieuses devront être prises pour assurer l'isolation des machines et appareils : les enroulements inducteurs et induits seront spécialement isolés de leurs bâti et arbre; les machines elles-mêmes se fixeront au socle par l'intermédiaire de mastics isolants, tels qu'un mélange de soufre et verre pilé ; enfin, pour augmenter la sécurité, tous les appareils, sièges de la haute tension, seront entourés d'un plancher maintenu sec et posé sur isolateurs.

Excitation indépendante. — Ce mode d'excitation, adopté au début du transport de l'énergie électrique, possède l'avantage de restreindre à l'induit des machines et à la ligne les parties sous haute tension. En outre, une plus grande sécurité est obtenue par l'alimentation des inducteurs à bas potentiel. Mais une difficulté naît lors du démarrage à la station réceptrice, attendu que le récepteur entraînant l'excitatrice, n'a pas ses inducteurs aimantés à l'état de repos et son couple moteur est nul ; d'autre part, le réglage de la vitesse exige des précautions spéciales; aussi préfère-t on, aujourd'hui, recourir aux machines série qui ne présentent pas ces inconvénients et, notamment, possèdent un réglage automatique de la vitesse.

Machines série. — Remarquons d'abord que l'on peut tracer, pour les moteurs , des courbes caractéristiques entièrement semblables à celles que l'on relève sur les génératrices. La caractéristique totale, notamment, se dressera en portant les intensités des courants suivant l'axe de X, et sur les ordonnées correspondantes, une longueur proportionnelle à la force électromotrice à appliquer pour obtenir la vitesse invariable choisie, sous diverses charges.

Considérons maintenant (fig. 334) les caractéristiques extérieure e d'une génératrice et totale E_1 d'un moteur.

A la distance OA de l'origine, menons une parallèle à l'axe des E. Elle coupera les deux courbes suivant les ordonnées AC et AB qui représentent : la première, la force électromotrice

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aux bornes de la génératrice, lorsque, tournant à la vitesse N, elle débite le courant OA ; la seconde, la force électromotrice que la réceptrice exige à ses bornes, lorsque, traversée par le courant OA, elle tourne à la vitesse N. La différence BC représente la chute de potentiel dans le circuit reliant les deux machines. Portons-la suivant AD.

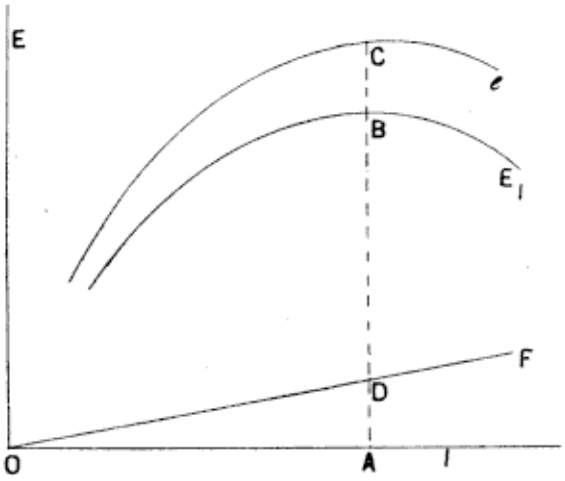


FIG. 334.

Procédons de même pour un certain nombre d'autres valeurs de l'intensité du courant. Nous déterminons ainsi les points d'une courbe qui, en général, s'approche beaucoup d'une droite. Si donc deux dynamos sont construites de manière que leurs caractéristiques restent proportionnelles, il suffira de choisir la résistance r de la ligne de manière que la chute de tension rI soit, pour tous les régimes, égale à la différence des deux caractéristiques. Dans ces conditions, tant que la vitesse de la génératrice restera invariable, celle de la réceptrice se maintiendra sensiblement constante, puisqu'à tous les régimes, il ne restera aux bornes de cette dernière, que la différence de potentiel nécessaire pour la faire tourner à N tours.

Éléments d'un transport à distance. — Le problème à résoudre dans une transmission électrique est généralement le suivant : *Transporter à une distance* L *kilomètres, avec un rendement* η_1, *une puissance* P *watts disponible à la station de départ ; déterminer les machines à employer et la section du conducteur.*

La puissance disponible à l'arrivée $p = \eta_1 P$. Les puissances des machines étant connues, ainsi que leurs rendements industriels que l'on impose, le seul facteur arbitraire sera la tension e aux bornes de la génératrice. On la prendra aussi grande que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

possible. De l'équation (1), précédemment écrite, on pourra dès lors tirer la valeur de l'intensité I du courant $I = \eta_g P/e$. (1)

En appelant R la résistance de la ligne, la perte par effet Joule est $RI^2 = R\eta_g^2 P^2/e^2$.

Cette perte est évidemment égale à la différence des puissances disponibles aux bornes des deux machines, soit

$$\eta_g P - \frac{p}{\eta_m} = \eta_g P - \frac{\eta P}{\eta_m} = \frac{P(\eta_g \eta_m - \eta)}{\eta_m}.$$

On a donc

$$\frac{R\eta_g^2 P^2}{e^2} = \frac{P(\eta_g \eta_m - \eta)}{\eta_m}, \quad \text{d'où} \quad R = \frac{(\eta_g \eta_m - \eta)e^2}{\eta_m \eta_g^2 P}. \qquad (4)$$

En remplaçant R par sa valeur en fonction de la section, on déterminera aisément celle-ci.

Application. — *Supposons que l'on veuille transporter à 20 kilomètres une puissance de 150 chevaux sous 4 000 volts aux bornes des génératrices, avec un rendement total de 0,75.*

Imposons aux machines des rendements de 0,9. De l'équation (1), nous tirons la valeur du courant traversant le circuit :

$$I = \frac{P\eta_g}{e} = \frac{150 \cdot 736 \cdot 0{,}9}{4\,000} = 24{,}8 \text{ A.}$$

(4) donne pour résistance de la ligne

$$R = \frac{(0{,}81 - 0{,}75)\,16\,000\,000}{0{,}9 \cdot 0{,}81 \cdot 150 \cdot 736} = 11{,}9 \text{ O.}$$

La section s se déduira de l'équation

$$11{,}9 = \frac{\rho \cdot 2 \cdot 2\,000\,000}{s}.$$

Si l'on utilise du bronze d'une résistivité $\rho = 2 \cdot 10^{-6}$, on obtient $s = 0{,}67$ centimètre carré.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 3 — Courants triphasés.

Généralités. — La faculté que présentent les moteurs asynchrones de démarrer sous charge les fera préférer. Ici, on est moins limité qu'en courant continu, au point de vue de l'élévation de la tension. On obtient en effet aisément 15 000 volts, dans les générateurs à courants alternatifs. On passera facilement aux très hautes tensions, au moyen de transformateurs statiques, appareils robustes, sans organes mobiles, dont on pourra rendre l'accès impossible, pour éviter les accidents. A la station réceptrice, on repassera au moyen d'appareils semblables de la haute à la basse tension. Les pressions dangereuses resteront ainsi confinées dans les organes fixes inaccessibles et dans la ligne.

L'emploi des hautes tensions est limité par la difficulté de réaliser de bons isolateurs et par l'ionisation de l'air. Celle-ci dépend de l'intensité du champ électrique et, par conséquent, de la courbure extérieure et de l'écartement des conducteurs. Avec de gros conducteurs présentant une surface lisse et espacés de 2 à 3 mètres, on peut atteindre, sans perte excessive, une tension de 120 000 volts en courants alternatifs.

Dès maintenant, il existe des transmissions sous 60 000 volts, telle celle entre Colgate, Oakland et San Francisco, d'une longueur de 358 km.

Calcul d'une transmission triphasée. — Les développements dans lesquels nous sommes entré à propos des courants continus, nous permettent d'être bref. Il suffira, en effet, de procéder exactement de la même manière, mais en faisant usage des valeurs efficaces et en tenant compte des déphasages.

Soit à transmettre par courants triphasés une puissance

$$P = \sqrt{3}\, e_{\text{eff}}\, i_{\text{eff}} \cos\varphi, \quad \text{d'où} \quad i_{\text{eff}} = \frac{P}{\sqrt{3}\, e_{\text{eff}} \cos\varphi},$$

e_{eff} étant la tension entre les fils de ligne au départ et i_{eff} l'intensité du courant qui les traverse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si R est la résistance d'un des fils de ligne, la perte par effet Joule sera

$$3\,R\,i_{eff}^2 = \frac{RP^2}{e_{eff}^2 \cos^2\varphi}$$

η_l étant le rendement que l'on s'impose pour la transmission, on a évidemment

$$\frac{RP^2}{e_{eff}^2 \cos^2\varphi} = P(1-\eta_l), \quad \text{d'où} \quad R = \frac{e_{eff}^2 \cos^2\varphi\,(1-\eta_l)}{P}.$$

De cette équation, on déduit aisément la section d'un des trois fils de ligne et le poids total de la ligne.

La résistance étant inversement proportionnelle à la section, on voit que cette dernière et, par suite, le poids de cuivre, sont inversement proportionnels au carré du cosinus du déphasage.

Les trois fils de ligne sont généralement établis aux sommets d'un triangle équilatéral, pour égaliser l'inductance des trois phases dans la canalisation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XIII.

Distribution de l'énergie.

Les distributions d'énergie électrique se répandent de plus en plus, parce qu'elles permettent d'une part de centraliser le matériel générateur, ce qui entraîne une économie dans les frais de premier établissement, les grandes machines coûtant relativement beaucoup moins que les petites et de ne consommer l'énergie que proportionnellement à la charge; d'autre part, leur arrêt et leur mise en marche sont faciles et instantanés; elles n'exigent qu'une faible surveillance et, enfin, elles permettent d'atteindre un rendement plus élevé, tant des machines que dans le fonctionnement de l'usine elle-même, le facteur de charge s'élevant en même temps que la puissance des installations.

On appelle *facteur de charge* le rapport entre le nombre des chevaux-heures débités annuellement par l'usine et celui qu'elle serait capable de développer pendant le même temps, en marchant nuit et jour à pleine charge.

Nous rencontrons ici l'emploi des courants continus, alternatifs et polyphasés.

---

§ 1. — Courants continus.

Intensité constante. — Les récepteurs sont tous montés en tension dans un circuit en forme de boucle (fig. 335), dans lequel les machines de l'usine entretiennent automatiquement une intensité constante. C'est évidemment le mode le plus simple de montage. Le même courant

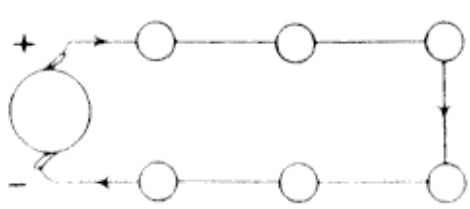


Fig. 335.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

parcourant l'installation, la section et par suite le poids total du conducteur sont réduits à un minimum et le générateur peut être inséré en un point quelconque.

A côté de ces avantages, le système présente l'inconvénient d'être paralysé complètement par la rupture du conducteur d'alimentation. On y pare dans une certaine mesure, s'il s'agit d'appareils d'éclairage, en établissant pour desservir la même zone, plusieurs boucles alimentées chacune par un générateur ; on alterne les récepteurs de chaque boucle. Toutefois, à cause d'une interruption possible de leur circuit, les récepteurs d'une boucle sont dépendants l'un de l'autre. Il est donc nécessaire de prévoir un dispositif les mettant automatiquement en court-circuit, quand leur circuit se rompt.

Appelons R et r la résistance de la ligne et de chacun des récepteurs au nombre de n ; nous aurons

$$i = \frac{E}{R + nr}, \quad \text{d'où} \quad E = i(R + nr).$$

On voit que la tension croît rapidement avec le nombre des appareils d'utilisation et le rendement de la distribution

$$\eta = \frac{i^2 nr}{i^2 (R + nr)} = \frac{nr}{R + nr} = \frac{r}{R/n + r}$$

est d'autant meilleur, qu'un plus grand nombre de récepteurs sont utilisés.

On est donc conduit à de hauts voltages et, inconvénient le plus grave du système, toute l'installation, tant de ligne que d'appareil, doit être prévue et isolée pour le voltage maximum développé à pleine charge. C'est une cause de dépense élevée et un danger qui a fait écarter ce genre de distribution des applications domestiques. Mais il fournit une bonne solution pour des éclairages publics par arcs, très étendus ou, mieux encore, pour la distribution de l'énergie mécanique.

Distribution de l'énergie mécanique. — Dans ce dernier cas : ou l'on utilise directement dans des sous-stations la puissance mécanique développée ; ou l'on y modifie les facteurs électriques des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

réceptrices au moyen d'un des transformateurs à courant continu étudiés précédemment, soit seul, soit conjointement avec une batterie d'accumulateurs.

Génératrices. — Les machines, tant génératrices que réceptrices, sont toutes du type série. En général, chaque boucle est alimentée par une génératrice spéciale qui forme une unité distincte et indépendante. La force électromotrice se règle à l'usine centrale, soit par décalage des balais, soit par modification du flux magnétique de la dynamo en shuntant ses inducteurs, soit par changement du nombre de tours de la génératrice.

Ces opérations se font automatiquement et la dernière est particulièrement recommandable. En employant une machine à vapeur sans volant, à détente constante, dont les masses mobiles sont le plus petites possible, celle-ci règlera sa vitesse d'après l'énergie absorbée. En effet, l'intensité du courant et le flux magnétique étant constants, le couple résistant $C = in\mathfrak{F}/2\pi$ le sera aussi. Supposons qu'à un moment donné on dispose d'une tension totale E et d'un courant i. Si l'on introduit un nouveau récepteur, son effet sera de réduire i et le flux magnétique, puisque l'excitation est en série. Or comme le couple résistant d'une dynamo série dépend exclusivement, comme nous venons de le rappeler, de l'intensité du courant qu'elle débite et de la valeur de son flux magnétique, le couple résistant décroît et la machine à vapeur, trouvant moins de résistance, accélèrera sa marche, d'où résultera une augmentation de tension ayant pour effet de ramener l'intensité à sa valeur normale.

Réceptrices. — Le moteur série alimenté par courant constant possède une vitesse essentiellement variable avec la charge. Il est donc nécessaire de munir les moteurs d'un régulateur qui s'oppose efficacement aux variations de la vitesse, toutes les fois que les applications mécaniques l'exigent. On y arrive aisément en shuntant les inducteurs de manière à faire varier le couple moteur en fonction du couple résistant. Cette opération s'effectue automatiquement. En outre, dans les moteurs puis-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sants, le régulateur de champ est combiné avec un décalage automatique des balais.

Lorsque l'application exige au contraire une variation de vitesse très étendue, tout rhéostat est inutile puisque, par définition, les moteurs série alimentés par un courant constant ont une vitesse variable avec la charge. Il suffit, dans ce cas, de couper automatiquement le courant lorsque la charge tombe brusquement, afin de prévenir un emballement dangereux du moteur.

Sécurité. — On pare à une interruption de circuit dans une boucle de ligne ou de moteur au moyen d'un court-circuit automatique, qui agit dès que le courant tombe à zéro (by pass).

Le voltage maximum pratique des moteurs est 2500 volts.

Récepteurs électrolytiques. — Au lieu de recueillir l'énergie dans les sous-stations au moyen de machines, on peut y installer des batteries d'accumulateurs que l'on chargera à régime constant, pendant la plus grande partie de la journée.

Aux heures de faible débit, les batteries absorbent presque tout le courant; aux heures de grande consommation, elles aident les machines de la centrale à satisfaire à la demande.

Chaque station possède deux adjoncteurs : un de charge, l'autre de décharge, de manière à permettre de régler à volonté le nombre d'éléments intercalés dans la boucle et la tension appliquée aux circuits secondaires d'utilisation.

Si l'on veut éviter les dangers du haut voltage introduit dans les canalisations secondaires, il faut recourir dans chaque sous-station à l'emploi de deux batteries, dont l'une est en charge, pendant que l'autre, séparée complètement du circuit primaire, est en décharge.

Pour substituer une batterie à l'autre sans rompre les circuits et sans introduire la tension dangereuse dans les circuits d'utilisation, on commence par placer en dérivation sur la batterie chargée, une résistance égale à sa résistance apparente ; on la déconnecte du circuit primaire pour la placer en dérivation sur la batterie déchargée ; on isole cette dernière, pour la mettre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ensuite en dérivation sur la résistance et on supprime enfin celle-ci.

Le système est onéreux, à cause du coût élevé des accumulateurs, de leurs frais considérables d'entretien et de la transformation supplémentaire qu'exige l'énergie débitée par les batteries.

Tension constante.— Il importe qu'une distribution à tension constante satisfasse aux desiderata suivants : *le potentiel doit être maintenu entre des limites resserrées, quelles que soient les demandes variables de la consommation ; une indépendance aussi complète que possible existera entre les différents appareils et groupes d'appareils ; enfin le contrôle de la consommation et le réglage du potentiel en un point quelconque de l'installation, pourront s'effectuer de l'usine de production même.*

Conducteurs cylindriques. — Les récepteurs sont groupés en dérivation sur deux conducteurs identiques et homogènes, raccordés à la source (fig. 336). On voit aisément que le courant total traversera les sections AC, BD. En CD, il est diminué de l'intensité i absorbée par le premier récepteur, de sorte que les sections suivantes CE, DF, n'ont plus à transmettre que le courant $I - i$; les sections EG, FH, le courant $I - 2i$ et ainsi de suite, les récepteurs étant supposés identiques.

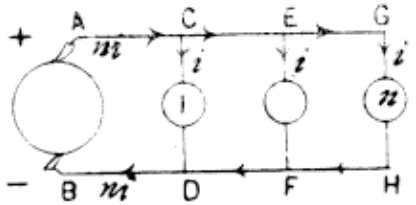


FIG. 336.

Si nous admettons dans les conducteurs d'alimentation du premier tronçon AC, BD, la même densité que précédemment, nous voyons que nous serons conduits à des poids de cuivre beaucoup plus importants que dans le système à intensité constante. Par contre, l'indépendance des récepteurs est ici bien plus grande. L'un d'eux peut être interrompu, sans empêcher le fonctionnement des autres. L'indépendance n'est cependant pas absolue, attendu que la perte de charge produite dans les conducteurs d'alimentation augmente avec le nombre des récepteurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

utilisés, ce qui réduit dans une proportion variable le potentiel disponible à leurs bornes.

Supposons, pour simplifier, n récepteurs, uniformément distribués, absorbant chacun le même courant et situés à la distance l l'un de l'autre. Le premier d'entre eux se trouve aussi distant de l de la source. La résistance de deux conducteurs de longueur l et section s étant $2\rho l/s$, la perte de charge jusqu'au premier récepteur est $\Delta V_1 = 2\rho l n i/s$.

Dans le second tronçon, on perd $2\rho l (n - 1) i/s$.

La perte de charge de la source au 2e récepteur s'élève à :

$$\Delta V_2 = 2\rho l n i/s + 2\rho l (n - 1) i/s = 2\rho l i (2n - 1)/s.$$

De la source au 3e récepteur nous trouvons une perte de

$$\Delta V_3 = 2\rho l n i/s + 2\rho l (n-1) i/s + 2\rho l (n-2) i/s = 2\rho l i[3n - (1+2)]/s.$$

De la source au p^e récepteur :

$$\Delta V_p = 2\rho l i \left[p n - \{1+2+\ldots+(p-1)\}\right]/s = 2\rho l i \left[p n - p(p-1)/2\right]/s.$$

Pour obtenir la chute au n^e récepteur, il suffira de faire $p=n$ dans la formule précédente, ce qui nous donnera :

$$\Delta V_n = 2\rho l i (n^2 - n^2/2 + n/2)/s = \rho l i n (n - 1)/s.$$

Cette chute ne doit pas dépasser une valeur donnée ΔV, de sorte que la section s sera déterminée par l'équation

$$\frac{\rho l i}{s} n (n + 1) = \Delta V \quad \text{ou} \quad s = \frac{n (n + 1) \rho l i}{\Delta V}.$$

La chute jusqu'au p[ième] récepteur devient, en remplaçant s par la valeur que nous venons de trouver

$$\Delta V_p = \frac{2 \Delta V}{n (n + 1)} [pn - p (n - 1)].$$

En particulier, jusqu'au premier récepteur ($p = 1$), on a une chute

$$\Delta V_1 = \frac{2 \Delta V}{n + 1}.$$

Le poids de cuivre des deux conducteurs d'alimentation a pour expression

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$P = 2nls\delta = \frac{2n^2(n+1)\rho l^2 i\delta}{\Delta V},$$

en appelant δ le poids spécifique du métal utilisé.

On remarquera que *le voltage appliqué aux bornes décroît du premier au dernier récepteur; la chute est maximum à pleine charge; le voltage remonte pour les récepteurs restant en activité au fur et à mesure qu'on réduit leur nombre, de manière à s'approcher d'autant plus du voltage de la source que leur nombre est plus restreint.*

Câbles coniques. — Il n'est pas logique de donner aux deux conducteurs d'alimentation la même section d'un bout à l'autre, puisque l'intensité du courant va se réduisant graduellement jusqu'aux extrémités. Supposons que la section soit diminuée régulièrement, de manière à maintenir constante la densité du courant. La section du premier tronçon étant s', celle du second $s'(n-1)/n$, celle du suivant $s'(n-2)/n$, ... $s'2/n$, s'/n.

La chute de voltage dans le premier tronçon aura pour valeur $\Delta V'_1 = 2\rho lni/s'$; celle dans le second tronçon

$$\frac{2\rho l\,(n-1)\,i}{s'\,(n-1)/n} = \frac{2\rho lni}{s'} = \Delta V'_1,$$

par conséquent la chute de la source au second récepteur sera

$$\Delta V'_2 = 2 \,.\, 2\rho lni/s'$$

celle jusqu'au p^e récepteur

$$\Delta V'_p = p \,.\, 2\rho lni/s'$$

et jusqu'au n^e

$$\Delta V'_n = n \,.\, 2\rho lni/s' = 2\rho ln^2 i/s' = \Delta V, \text{ d'où } s' = 2\rho ln^2 i/\Delta V.$$

En remplaçant s' par sa valeur, la chute au p^{ième} devient

$$\Delta V'_p = p\,\Delta V/n$$

et celle au premier

$$\Delta V'_1 = \Delta V/n.$$

Le poids de conducteur sera

$$P' = 2ls'\delta + \frac{2ls'(n-1)\delta}{n} + \frac{2ls'(n-2)\delta}{n} + \ldots + \frac{2ls'\delta}{n} =$$

$$\frac{2ls'\delta}{n}[n+(n-1)+(n-2)+\ldots+1] = (n+1)ls'\delta = \frac{2n^2(n+1)\rho l^2 i\delta}{\Delta V} = P.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il reste le même que dans le cas des conducteurs cylindriques parallèles, mais le fonctionnement de tous les récepteurs est amélioré.

En effet, si nous considérons le premier à partir de la source, la chute qui était $\Delta V_1 = 2\Delta V/n+1$, n'est plus maintenant que $\Delta V/n$, soit sensiblement la moitié. De même nous avons pour le rapport des chutes au p[ième] récepteur

$$\frac{\Delta V'_p}{\Delta V_p} = \frac{n+1}{2n+1-p}.$$

Pour $n = 20$ et $p = 5$, ce rapport $= 21/36 = 0{,}583$.

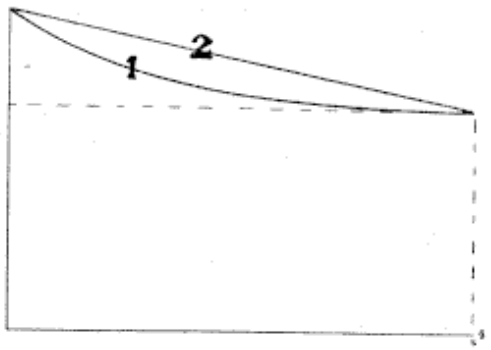
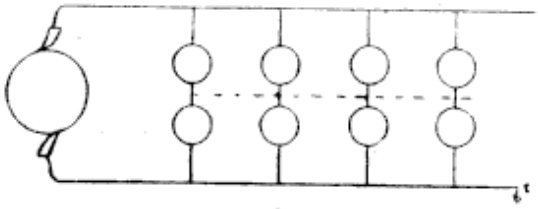


FIG. 337.

En résumé, la chute de voltage sera une courbe fortement parabolique 1 (fig. 337) dans le premier cas et affectera la forme d'une droite 2 dans le second.

Dérivation avec récepteurs en série. — Lorsque les récepteurs sont calibrés pour un voltage sous-multiple de celui de la source, on les monte par séries égales (fig. 338), en dérivation sur les conducteurs d'alimentation. On obtient ainsi une combinaison mixte de la dérivation et du système série.


FIG. 338.

L'inconvénient du montage en série persiste, bien que très atténué : si un des récepteurs vient à être interrompu, il paralyse complètement le fonctionnement de son branchement. On y remédie en adoptant un dispositif automatique remplaçant l'appareil détérioré par un autre, ou par une résistance équivalente. Mais ceci constitue une complication. On se contente souvent de réunir les bornes de mêmes polarités par des câbles intermédiaires. Dans ces conditions, l'interruption d'un récepteur provoque simplement une variation dans le voltage appliqué aux autres et non leur arrêt.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Système à trois fils. — Comme l'a montré Hopkinson, une indépendance presque complète peut être obtenue en associant deux générateurs en tension et reliant les câbles intermédiaires aux pôles communs des machines (fig. 339).

Si les récepteurs sont égaux et fonctionnent simultanément, aucun courant ne traverse le conducteur intermédiaire ou neutre CD. Si tous les récepteurs sont interrompus d'un côté (dans un pont), le conducteur extrême correspondant devient inactif et est remplacé par le conducteur médian CD.

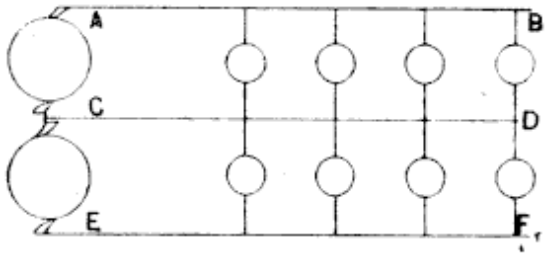


FIG. 339.

Le système, comme on le voit immédiatement, n'exige pour desservir le même nombre de récepteurs, que la moitié du courant requis par le système bifilaire,qui alimenterait directement les récepteurs dont il s'agit par dérivation simple, puisque c'est le *même* courant qui traverse deux récepteurs successifs. Si S est la section des conducteurs du système bifilaire et δ le poids spécifique du cuivre employé, leur poids total sera $2SL\delta = P$, L étant la longueur totale des canalisations, gouvernée par la position des appareils extrêmes d'utilisation.

Puisqu'il passe moitié moins de courant avec le système à trois fils, ses conducteurs peuvent avoir, à même densité de courant, une section moitié moindre. Leur poids sera donc

$$3 \cdot \frac{S}{2} L\delta \text{ ou } \frac{3 \cdot \frac{S}{2} L\delta}{2SL\delta} P = 0{,}75\ P \qquad (1)$$

ou les 3/4 du poids P exigé par le bifilaire.

En réalité, l'économie peut devenir plus grande, car il est toujours possible d'étudier les groupements de manière que le même nombre de récepteurs ou à peu près, reste simultanément en service de chaque côté du fil neutre. On peut dès lors, sans inconvénient, donner à ce dernier une section moitié de celle des autres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans l'équation (1), au lieu de 3 nous aurons donc 2,5 et le poids devient $2{,}5\ SL\delta P/4SL\delta = 0{,}625\ P$.

Tout ceci est établi dans l'hypothèse où la densité du courant reste la même que dans le système bifilaire de comparaison, c'est-à-dire que la chute de voltage garde la même valeur. Une chute de voltage $\rho 2li/s$ ne varie pas, en effet, pour une longueur donnée, tant que la densité i/s reste constante. Mais, puisque nous disposons ici d'une tension double, la perte de voltage consentie peut, sans inconvénient, être double également, ce qui nous permettra d'opérer une nouvelle réduction de section de moitié.

Pour calculer ce que devient le poids de cuivre nécessaire, il suffira de remplacer 3 par 3/2, dans l'équation (1). Nous obtenons ainsi

$$\frac{\frac{3}{2}\cdot\frac{S}{2}L\delta P}{2SL\delta} = \frac{3P}{8} = 0{,}375P$$

et si nous diminuons encore de moitié la section du conducteur intermédiaire, il suffira de diviser par 2 l'équation antéprécédente, ce qui nous donnera $2{,}5SL\delta P/8SL\delta = 0{,}3125P$.

On a l'habitude de mettre le fil neutre à la terre, afin de limiter au voltage d'un seul des ponts la différence de potentiel pouvant se produire entre un point quelconque des circuits et la terre.

L'emploi de machines montées en tension présente des difficultés de réglage; l'encombrement est considérable; la surveillance devient plus difficile et l'entretien plus onéreux. On élude ces inconvénients en utilisant des dynamos uniques de voltage double, mais il faut alors prévoir une disposition qui rétablisse ou permette de rétablir l'égalité du voltage dans les deux ponts, lorsqu'ils sont inégalement chargés.

Compensateur. — On monte en dérivation sur les conducteurs extrêmes (fig. 340), un *compensateur* constitué par une dynamo à excitation B, dérivée entre les conducteurs extrêmes, possédant deux induits D_1, D_2 montés sur le même arbre et connectés en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

série. Les balais adjacents sont réunis au fil neutre. E est la dynamo de voltage double, en rapport avec les conducteurs extrêmes.

Quand le voltage est le même dans les deux ponts, les induits, traversés par le même courant, fonctionnent comme moteurs. Leur consommation est minime, puisqu'ils marchent à vide.

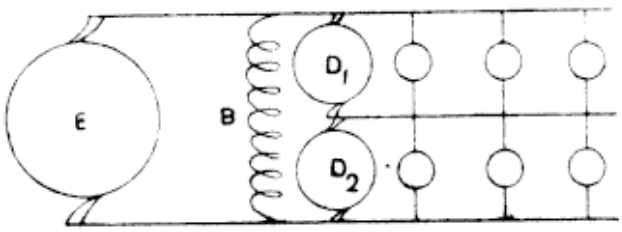


Fig. 340.

Dès qu'un déréglage se produit, l'induit auquel est appliqué le plus grand voltage continue à fonctionner comme moteur ; mais il tourne plus vite et entraîne l'autre dont la force électromotrice s'élève, l'excitation étant restée la même. Comme d'autre part, la force électromotrice appliquée aux bornes de cet induit est devenue plus faible, la force contre électromotrice l'emporte; il fonctionne comme dynamo et débite un courant dans le pont le plus chargé. Une certaine compensation, dont nous allons évaluer l'importance, s'établit ainsi.

Efficacité du compensateur. — Soient V et V' les différences de potentiel existant dans les deux ponts au moment où n récepteurs inertes, d'une résistance de R ohms, fonctionnent dans le premier et n' dans le second $(n<n')$; r la résistance de chacun des induits ; e la force électromotrice engendrée dans chacun d'eux par leur rotation dans le champ indépendant créé par l'enroulement dérivé entre les fils extrêmes.

En appelant I (fig. 341) le courant amené au pont supérieur et repartant du pont inférieur vers la dynamo ; i_1 le courant entrant dans l'induit du pont supérieur et i_2 le courant alimentant les récepteurs de ce pont ; i'_1 le courant sortant de l'induit du pont inférieur et i'_2 le courant

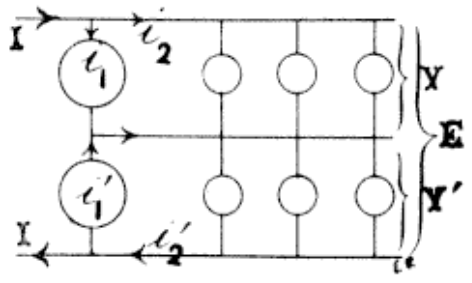


Fig. 341.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

alimentant les récepteurs de ce pont, la première loi de Kirchoff nous donne

$$I = i_1 + i_2 ; \; I = i'_2 - i'_1, \quad \text{d'où} \quad i_1 + i_2 = i'_2 - i'_1 \qquad (1)$$

Mais

$V = e + i_1 r$ d'où $i_1 = V/r - e/r$, $i_2 = Vn/R$, $V' = e - i'_1 r$ d'où $i'_1 = e/r - V'/r$ et $i'_2 = V'n'/R$. En remplaçant dans (1) les intensités par leur valeur, il vient

$$\frac{V-e}{r} + \frac{Vn}{R} = \frac{V'-e}{r} + \frac{V'n'}{R}.$$

Éliminons V' au moyen de la relation : $E = V + V'$,

$$V = E \frac{1}{1 + \dfrac{rn + R}{rn' + R}}.$$

Pour que le réglage soit bon, il faut que la fraction

$$\frac{1}{1 + \dfrac{rn + R}{rn' + R}}$$

diffère de 1/2 d'une quantité inférieure à la variation de voltage tolérable. Par exemple, s'il s'agit de lampes à incandescence, il faudra que

$$\frac{E}{2} - \frac{E}{1 + \dfrac{rn + R}{rn' + R}} \leqslant 0{,}03 \frac{E}{2}$$

quelles que soient les valeurs que le fonctionnement de l'installation assigne à n et n'. Dans une installation déterminée, R est connu; on connaît également les valeurs extrêmes que peuvent prendre n et n'; l'équation précédente limitera la résistance r des induits qui doit être la plus faible possible.

Supposons, pour fixer les idées, $r = 0{,}05$ et $R = 200$ O, avec $n' - n = 100$ au maximum, on aura :

pour $n' = 1\,100$ et $n = 1\,000$ (nombres maxima de récepteurs utilisés). . . . . $V = E \cdot 0{,}495$,

pour $n' = 100$ et $n = 0$ (nombres minima). . $V = E \cdot 0{,}494$,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soit, si E = 220, les valeurs respectives de 108,9 et 108,68, tandis que dans l'autre pont, le voltage monte à 111,1 ou 111,32.

Lorsque le compensateur est à l'usine, on peut le constituer de deux dynamos distinctes, semblables, rigidement accouplées, ayant chacune leur excitation propre (prise entre les conducteurs extrêmes), ce qui permet de modifier celle-ci de manière à tenir compte des chutes de voltage se produisant dans les conducteurs d'alimentation. On rend le réglage plus prompt en dérivant l'excitation sur les ponts et en l'intervertissant pour les deux induits, chacun d'eux étant donc excité par un enroulement dérivé sur l'autre pont.

Si le compensateur se trouve dans un endroit dépourvu d'une surveillance constante, il convient d'utiliser une machine unique, à double enroulement induit et dont les collecteurs sont séparés, laquelle présente l'avantage d'avoir une réaction d'induit très faible, parce que les courants du moteur et du générateur y circulent en sens inverse.

Accumulateurs. — En plaçant en dérivation entre les deux ponts une batterie d'accumulateurs, et réglant le nombre d'éléments insérés de part et d'autre, on peut également rétablir l'équilibre à volonté. Mais les accumulateurs exigent une grande surveillance et un entretien constant.

Système Von Dolivo Dobrowolski. — On peut encore n'utiliser qu'une seule machine de voltage double, en raccordant deux points diamétralement opposés de l'induit A_1, A_2, (fig. 342), à deux bagues isolées, sur lesquelles frottent des balais connectés aux extrémités d'une bobine très réactante B, dont le milieu est raccordé au fil neutre. Cette bobine est constituée par un enroulement peu résistant à grand nombre de spires ; son circuit magnétique est fermé.

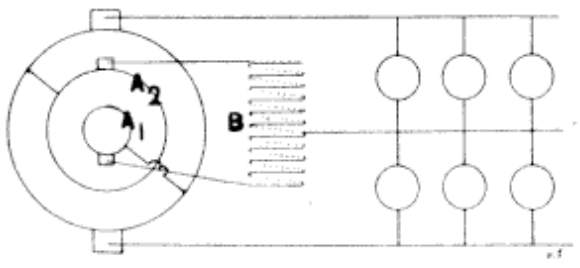


Fig. 342.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Grâce à sa grande impédance, le courant alternatif qui la traverse est extrêmement faible et la dépense d'énergie qui en résulte est minimum. Par raison de symétrie, son centre, c'est-à-dire le fil neutre, se trouve toujours au potentiel moyen de la machine. Quand un déréglage se produit, le courant continu différentiel qui en résulte, rentre dans l'induit ou en sort par la bobine sans perte appréciable, vu sa faible résistance ohmique.

Système à cinq fils. — L'économie de conducteur très notable, obtenue avec le système trifilaire, peut encore être accentuée par l'emploi de 4, 5, ... fils. Mais la complication naît. En outre, l'isolement de plus en plus parfait qu'il faut donner aux conducteurs, limite à 5 fils, soit 4 ponts, le maximum pratique atteint jusqu'ici. A plus forte raison que précédemment, le fil médian devra être mis à la terre et, si une seule machine de voltage quadruple est utilisée, un compensateur à quatre induits devra rétablir automatiquement l'égalité du voltage dans les divers ponts, lors des déréglages.

Distribution par réseau et artères. Généralités. — Quel que soit le mode de groupement adopté, on se trouve rapidement limité par la nécessité de ne pas dépasser la chute maximum admissible de tension. Pour arriver à desservir de grands espaces, il est nécessaire d'assurer la constance du voltage en un certain nombre de points N, N, ... (fig. 343) appelés *centres de distribution*. On conduira de ces points, par des canalisations longeant les rues, des *distributeurs* D, D, ... auxquels se raccorderont les *branchements* d'abonnés B, B, ... Afin d'éviter que ces branchements ne soient paraly-

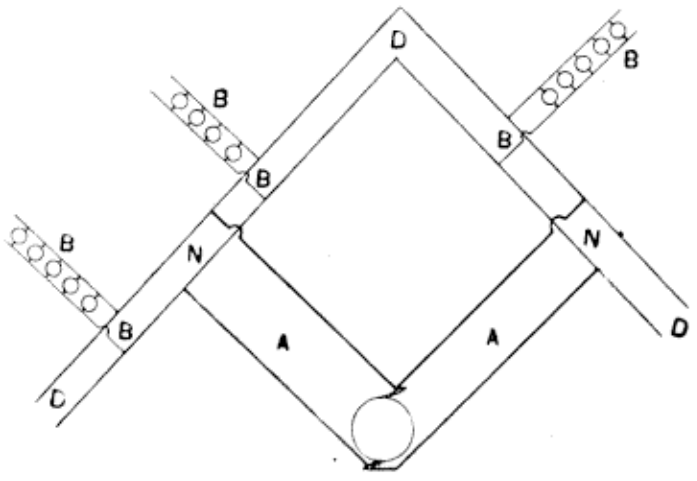


FIG. 343.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sés par la rupture d'un des distributeurs, on réunira ceux-ci partout où ils passent à proximité l'un de l'autre. Un véritable *réseau* se trouve ainsi constitué, que l'on alimente au moyen d'*artères* ou de *feeders* A, A, ... aboutissant dans les boîtes de distribution, installées de préférence au croisement des rues.

Si les artères ont été convenablement calculées, de manière que la perte de charge soit la même dans chacune d'elles, on pourra les raccorder aux mêmes machines à l'usine et les centres de distribution resteront tous au même potentiel. Ils correspondent, en somme, à autant de petites usines secondaires déversant, sous pression constante, l'énergie dans leurs environs.

On saisit dès lors le jeu du système. Pourvu qu'on puisse l'égaliser de tous côtés, la perte de charge dans les artères pourra être quelconque et très élevée, ce qui accroît considérablement la distance à laquelle peut se trouver l'usine centrale et, par conséquent, le rayon et l'efficacité de la distribution. Une chute de 20 % est souvent admise.

Pour régler la perte de charge dans les artères, et ainsi arriver à maintenir le voltage constant dans les boîtes de distribution, il faut pouvoir le connaître en ces points à chaque instant. On obtient ce résultat en soudant aux points de raccordement des artères avec les distributeurs, de minces fils isolés dits *pilotes*, posés dans les canalisations à côté des artères et venant aboutir à l'usine à un ou plusieurs voltmètres.

Répartition de la chute de voltage entre les distributeurs et les branchements. — S'il s'agit d'une distribution d'éclairage, les sections pourront être déterminées en consentant, par exemple, à une perte de 1 à 2 % dans les canalisations intérieures (branchements) et de 2 à 1 % dans les distributeurs. A Bruxelles, on admet une perte de 2 % dans les branchements jusqu'à la lampe la plus éloignée. Afin de faciliter la pose, la section des distributeurs est, en général, laissée constante.

Nombre d'artères. — Il y a intérêt à multiplier le nombre d'artères. En effet, si leur nombre est faible, les distributeurs sont longs et la valeur de la perte $u = \rho 2li/s$ montre que, pour

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la maintenir constante, il faut augmenter la section proportionnellement à la longueur. On a d'ailleurs pour le poids : $p = 2sl\delta = 4\rho l^2\delta i/u$, formule montrant que le poids des distributeurs croît proportionnellement au carré de leur longueur ou de la distance séparant les boîtes de distribution.

Au contraire, le poids des artères est à peu près indépendant de leur nombre, puisque la quantité totale d'électricité qui les traverse reste la même, ainsi que leur longueur moyenne. Supposons que nous alimentions le réseau au moyen d'une seule artère de longueur L et de section S, traversée par le courant total I. La perte $U = \rho 2LI/S$, d'où la section $S = \rho 2LI/U$. Si au lieu d'une artère nous en utilisons deux, elles ne devront livrer individuellement passage qu'au courant I/2 et leur section pouvant être moitié moindre, leur poids total reste le même.

Réglage de la tension. — Au point de vue de la conduite facile et économique de l'usine centrale, il est essentiel de pouvoir faire fonctionner toutes les machines en dérivation sur les mêmes barres de distribution.

1° Dans un premier système, *on maintient la tension constante à la fois dans l'usine et dans le réseau.*

Appelons V la tension dans la boîte de distribution, E celle maintenue constante à l'usine. La différence $E - V = RI$ représente la chute consentie dans les feeders. Pour qu'elle reste constante et que par suite V ne varie pas, il faut qu'à mesure que I augmente, R diminue et vice-versa, ce qui exige que l'on dispose d'un nombre suffisant d'artères d'égale résistance, qui sont mises en service au fur et à mesure des besoins. La surveillance des machines est ainsi réduite à un minimum, mais le rendement général est faible, puisqu'il reste le même à charge réduite aussi bien qu'à pleine charge. Il est, en effet, donné par le rapport constant $VI/EI = V/E$.

2° Le système le plus usité consiste à *faire monter le voltage à l'usine à mesure des besoins.* Comme la demande ne reste pas parallèle à elle-même en tous les points du réseau, il faut pouvoir modifier la perte de charge dans les artères et, par suite, posséder le moyen de faire varier leur résistance. On y insère

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

donc des résistances réglables, qui sont avantageusement composées de tôles en maillechort, nickeline, etc., ou affectent la forme de toiles métalliques. On peut aussi les constituer de fils réunis en quantité et dont on fait varier le nombre.

La manœuvre de ces rhéostats se fera suivant les indications fournies par les fils pilotes raccordés à des voltmètres.

Pour éviter l'emploi d'un trop grand nombre de ces appareils, on pourra faire aboutir les divers fils pilotes à des plots, qu'un commutateur bipolaire à directions multiples permettra de connecter à volonté avec un voltmètre. Mais ceci exige des manœuvres et l'on n'est avisé d'une modification se produisant dans le régime d'un des centres de distribution, que si l'on connecte précisément le voltmètre avec les pilotes du centre considéré. Ce dispositif n'est donc pas recommandable.

Le meilleur système consiste à réunir tous les fils pilotes de même polarité sous la même borne d'un seul grand volmètre général, qui fournira le voltage moyen de tous les centres de distribution. Au besoin, des résistances seront intercalées dans les fils de jonction, pour éviter l'échange de courants trop intenses, entre des distributeurs dont le potentiel peut varier de quelques volts. Le voltmètre général ne donne toutefois, dans ces conditions, qu'un voltage moyen, pouvant résulter de voltages présentant des différences inadmissibles. Il sera donc utile d'insérer dans les fils pilotes de même nom, de petits ampèremètres A_1, A_2, A_3, ... (fig. 344), à graduation symétrique autour du zéro, lesquels, d'après le sens de la déviation de leur aiguille, indiqueront comment on doit manœuvrer les rhéostats d'artères. Quand l'installation fonctionne régulièrement, les ampèremètres doivent tous rester au zéro.

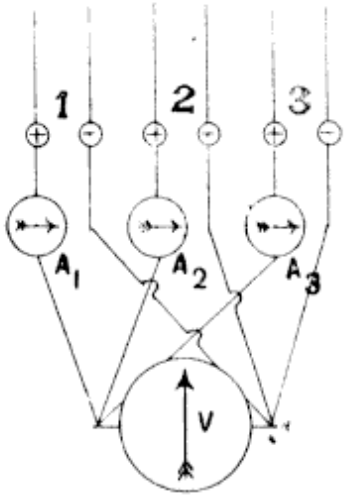


Fig. 344.

Au fur et à mesure de l'accroissement de la demande, le voltage sera élevé à l'usine par la manœuvre des rhéostats de champ des machines, de manière à faire

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

donner au voltmètre général une indication constante. D'autre part, l'examen des ampèremètres permettra de modifier les rhéostats d'artères, de manière à maintenir partout l'égalité du voltage.

Survolteurs. — Lorsqu'une partie du réseau est très éloignée de l'usine, il est parfois nécessaire, pour pouvoir l'alimenter dans des conditions normales, de compenser spécialement la plus forte perte de voltage, dont l'artère qui l'alimente est le siège. On y arrive en montant en tension avec cette dernière, l'induit, mû par un moteur, d'une petite dynamo excitée d'une manière indépendante ou en série.

Dans le premier cas, le réglage de la force électromotrice additionnelle peut se faire en agissant sur l'excitation ou sur la vitesse. Dans le second cas, il se fait automatiquement si les dispositions sont bien prises, la force électromotrice de la dynamo série croissant avec l'intensité du courant qui la traverse.

Limite du rayon de distribution. — Remarquons qu'avec l'augmentation de longueur des artères : 1° leur prix s'élève ainsi que leur coût d'amortissement; 2° la chute de voltage U, à laquelle on doit consentir, devient plus grande, ainsi que l'énergie dissipée UI. Ce sont ces dépenses qui, augmentant proportionnellement à la longueur et à son carré, limitent rapidement le rayon de distribution.

Position de l'usine [1]. — Le poids d'une artère $p = 2Sl\delta$ prend, si l'on y remplace S par sa valeur tirée de l'équation donnant la perte de charge $U = \rho 2lI/S$, la forme : $p = 4\rho l^2\delta I/U = Kl^2I$.

Une seconde artère exigera le poids $p' = Kl^2I'$, et ainsi de suite, de sorte que le poids total sera un terme $P = K\Sigma l^2I$, tout à fait analogue à l'expression du moment d'inertie en mécanique.

---

[1] G. L'Hoest. *Choix de l'emplacement d'une usine dans une installation en dérivation avec perte de charge constante dans les circuits dérivés.* (Bulletin Montefiore, t. I de 1890, p. 45.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Or, on sait que le moment d'inertie est minimum pour le centre de gravité du système, et présente la même valeur pour tous les points également distants de ce centre. On en conclut : *Le meilleur emplacement pour une source de courant est le centre de gravité des récepteurs supposés appliqués aux boîtes de distribution ; tous les emplacements équidistants de ce centre sont équivalents.* La masse des récepteurs est représentée par le courant qu'ils absorbent.

Si l'on établit l'usine de toutes pièces, en ayant une connaissance complète des besoins à satisfaire, on l'installera donc le plus près possible de ce centre de gravité. On sera ainsi amené, tout au moins pour les usines dont l'éclairage constitue la principale ressource, à se fixer au centre d'agglomérations denses, où le terrain coûte cher. On réduira la dépense, en reportant l'usine génératrice hors ville, et ne laissant à l'endroit le plus favorable qu'une sous-station de transformation, alimentée au moyen de courants de haute tension venant de l'extérieur.

---

§ 2. — Courants alternatifs et polyphasés.

L'emploi des transformateurs permet d'étendre à des distances considérables l'action des usines de distribution, en raison des hautes tensions qu'ils permettent d'adopter.

Le système le plus parfait consiste à distribuer l'énergie au moyen d'un réseau à haute tension alimenté par des artères, et sur lequel se dérivent des transformateurs réduisant le voltage à la valeur voulue, aux points d'utilisation. En raison des fortes pressions que l'on peut admettre, et des faibles chutes de voltage qui en résultent, le réseau sera souvent réduit aux simples artères, sur lesquelles viendront se dériver les transformateurs.

Transformateurs isolés. — L'emploi de transformateurs isolés permet de mieux les répartir aux centres de consommation. Les circuits secondaires, qui peuvent être montés à deux ou à plusieurs fils, dans le cas de l'alternatif simple, sont eux-mêmes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

isolés l'un de l'autre pour chaque transformateur, ou tous raccordés entre eux, de manière à former un réseau secondaire. Le premier système a l'avantage de localiser l'effet d'un dérangement aux récepteurs d'un seul appareil ; le second uniformise mieux la tension.

Il y a toutefois lieu de considérer que les bobines primaires restant continuellement en dérivation sur le réseau à haute tension, donnent lieu à une perte constante par hystérèse, courants de Foucault et effet Joule, qui peut devenir considérable. Admettons, en effet, une perte à vide de 2,5 % dans les transformateurs. Si nous avons une installation de 50 000 lampes de 16 bougies correspondant à une puissance de 50 000 × 0,05 kw = 2 500 kw environ, la perte constante due aux transformateurs sera de 2 500 × 0,025 = 62,5 kw et une machine de 85 chx devra constamment tourner à pleine charge à l'usine, pour alimenter les transformateurs marchant à vide. Comme pendant la majeure partie de la journée la consommation est minime, le rendement général de l'installation sera fortement atteint de ce chef.

Transformateurs groupés. — On peut éviter cet inconvénient en groupant les transformateurs dans des sous-stations, dont le personnel ne met les diverses unités en service qu'au fur et à mesure des besoins, de manière à bénéficier autant que possible des avantages de la pleine charge pour les appareils qui débitent.

D'ailleurs, les transformateurs groupés peuvent être calculés pour une puissance moindre que la somme des puissances de transformateurs isolés, satisfaisant au même service, puisque la consommation d'un groupe d'abonnés d'éclairage n'est jamais qu'une fraction relativement faible (0,30 à 0,50) de la puissance totale des installations réceptrices. La fraction est d'autant plus réduite, que les installations sont plus importantes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

§ 3. — Poids de cuivre nécessités dans les réseaux à basse tension par les diverses espèces de courants.

Le calcul des distributeurs donne lieu à des considérations entièrement semblables à celles développées pour les lignes de transport, sauf qu'ici les voltages étant faibles, il n'y a pas à se préoccuper de la tension entre les divers fils de la distribution.

Soit donc à fournir aux récepteurs fonctionnant sous une différence de potentiel e_{eff}, une puissance W, avec une perte donnée par effet Joule.

Alternatif simple. — La puissance reçue par les récepteurs est $W = e_{eff}\, i_{eff}$. P étant le poids total de cuivre nécessaire, la résistance d'un fil de ligne est 2 K/P et l'effet Joule dans les deux conducteurs

$$2 \cdot \frac{2\,K}{P} \cdot \frac{W^2}{e^2_{eff}} = \frac{4\,K}{P} \frac{W^2}{e^2_{eff}}.$$

En admettant deux ponts comme dans le système Hopkinson, avec 3 fils d'égale section déterminant une même chute relative de voltage que dans le bifilaire, le poids ne s'élève qu'à 0,375 P, tombant à 0,3125 P si la section du fil neutre est réduite de moitié.

Courant continu. — Le poids de cuivre sera ici le même que pour le courant alternatif, puisqu'en faisant abstraction de la différence de potentiel maximum entre fils, la distribution se fera sous le voltage continu $E = e_{eff}$.

Triphasé en étoile avec 4 fils. — Le quatrième fil est constitué par un conducteur réunissant les centres des étoiles, afin de permettre le réglage de la tension dans les trois groupes de lampes. e_{eff} étant le voltage entre un fil et le centre de l'étoile, nous aurons $W = 3\, e_{eff}\, i'_{eff}$. En désignant par p le poids d'un fil de ligne, sa résistance est K/p et l'effet Joule total

$$3\,\frac{K}{p} \cdot \frac{W^2}{9\,e^2_{eff}} = \frac{4\,K}{P} \frac{W^2}{e^2_{eff}}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'où 12 p = P. Si le fil supplémentaire a une section moitié de celle des autres, son poids = P/24 et le poids total = P (1/4 + 1/24) = 0,292 P.

Triphasé en triangle.— Calcul semblable à celui pour le transport. On trouvera comme dans ce cas 0,75 P.

Diphasé avec 4 fils de ligne. — Idem, poids P.

Diphasé avec 3 fils de ligne. — $W = 2 e_{eff} i_{eff}$. Le fil de retour véhiculant la somme de deux courants diphasés, devra présenter une section $\sqrt{2}$ fois plus grande. p'' étant le poids d'un fil de ligne, nous aurons pour l'effet Joule

$$\frac{2K}{p''}\frac{W^2}{4e^2_{eff}} + \frac{K}{p''\sqrt{2}}\frac{W^2}{2e^2_{eff}} = \frac{4K}{P}\frac{W^2}{e^2_{eff}}$$

$$P\left(1+\sqrt{2}\right) = 8\sqrt{2}\,p'' \text{ et } p'' = \frac{1+\sqrt{2}}{8\sqrt{2}}P.$$

Le poids total $\frac{1+\sqrt{2}}{4\sqrt{2}}P + \frac{1+\sqrt{2}}{8}P = 0{,}728\ P.$

En résumé, la distribution *à la même distance, de la même puissance, avec le même voltage aux récepteurs et la même perte en ligne*, exige les poids de cuivre :

Alternatif simple et continu	bifilaire	100
	trois fils ou deux ponts d'égale section	37,5
	trois fils ou deux ponts fil neutre de section moitié	31,25
triphasé en étoile à 4 fils		29,2
» en triangle		75
biphasé à 4 fils		100
» à 3 fils		72,8

Considérations générales. — Le courant continu permet l'emploi d'accumulateurs et de moteurs économiques démarrant en charge et de bon rendement. Il convient parfaitement pour l'alimentation des lampes à incandescence et particulièrement de celles à arc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais quand les distances à desservir sont grandes, l'économie de cuivre que permet le courant alternatif le fait recommander particulièrement pour l'éclairage, bien que le rendement des lampes alimentées soit moins bon qu'avec le courant continu.

Lorsqu'il faut, en outre, se préoccuper de fournir dans ce cas de l'énergie mécanique, les courants polyphasés s'indiquent par les qualités précieuses de leurs moteurs : démarrage sous charge, couple moteur constant, entretien et surveillance presque nuls. En outre leurs génératrices sont plus économiques. Cependant, pour la traction, sur les longues lignes, le courant alternatif est toujours préféré à cause de la simplicité de ses installations.

Dans les distributions alimentant à la fois lampes et moteurs, on adopte parfois les courants biphasés, la répartition des lampes pouvant se faire plus simplement qu'avec le triphasé, qui exige trois ponts à équilibrer, tandis que le biphasé à trois fils n'en demande que deux.

Enfin, dans les distributions triphasées, le montage en étoile convient pour les moteurs, parce qu'il permet de relever de 1,43 la tension à leur appliquer, l'équilibre des phases étant toujours assuré, tandis que le montage en triangle se recommande pour les lampes, parce qu'il assure mieux l'indépendance des récepteurs. Deux de ceux-ci peuvent alors être interrompus, sans que le troisième s'en ressente sensiblement.

Lorsque les lampes à alimenter ne représentent qu'une minime partie de l'énergie consommée par les moteurs, rien n'empêche de les brancher sur une des phases, que l'on règle spécialement s'il est nécessaire. On peut aussi transformer aisément, dans ce cas, le courant triphasé e nalternatif simple, à l'aide du système Ulbricht.

Fréquence. — Les grandes fréquences sont favorables pour l'éclairage, mais désavantageuses pour les moteurs, à cause des grandes vitesses mécaniques auxquelles elles conduisent.

Les distributions urbaines étant toujours mixtes, on adopte en général aujourd'hui la fréquence 50.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand l'installation a pour objet principal la distribution de l'énergie mécanique, on admet la fréquence 25, et pour certaines applications spéciales (fours électriques), les fréquences 15 et même 5.

---

§ 4. — Calcul des artères, distributeurs et branchements.

Artères ou feeders. — Les artères se calculent, soit d'après la règle de Kelvin, soit le plus souvent d'après la perte de charge consentie. En appelant ΔV cette perte, I le courant maximum, ρ la résistivité du métal employé exprimée en ohms-centimètres, l la longueur en centimètres du feeder et s sa section en centimètres carrés, on a

$$\Delta V = rI = \frac{\rho\, 2\, l}{s} I.$$

Dans l'application il est plus pratique d'évaluer l en mètres, ce qui divise la résistance par 100 et d'exprimer s en millimètres carrés, ce qui la divise encore par 100, soit en tout par 10 000. Pour que la valeur ne soit pas altérée par ce changement d'unités, il faudra multiplier le produit par 10 000. Il suffit à cet effet de rendre ρ, 10^6 fois plus grand, c'est-à-dire d'exprimer la résistivité en microhms et d'en prendre le 1/100.

On admet souvent $\rho = 1{,}67 \cdot 10^{-6}$, de sorte que la formule donnant la résistance d'un fil de longueur l *mètres* et de section s *millimètres carrés* est

$$r = 0{,}0167 \frac{l}{s} = \frac{1}{60} \frac{l}{s},$$

1/60 représente la résistance d'un mètre du métal dont il s'agit, ayant un millimètre carré de section.

Dans ces conditions la perte de charge s'exprime par

$$\Delta V = \frac{1}{60} \frac{2\, l\, I}{s} \text{ d'où } s = \frac{1}{30} \frac{l\, I}{\Delta V} = \frac{0{,}0333\, l\, I}{\Delta V}.$$

Ex. *Quelle devra être la section d'une artère de 250 mètres de*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

long pour livrer passage à un courant de 60 ampères, sans que la chute de potentiel dépasse 22 volts ?

$$s = \frac{0{,}0333 \times 250 \times 60}{22} = 22{,}7 \text{ mm}^{-2}.$$

La densité du courant atteint $60/22{,}7 = 2{,}64$ ampères par mm^{-2}.

Distributeurs. — Simplification des schémas. — La chute de potentiel entre deux branchements consécutifs réunis par deux fils des résistances respectives r et r' est $r\,\mathrm{I} + r'\,\mathrm{I} = (r + r')\,\mathrm{I}$.

Si les deux conducteurs sont, comme d'habitude, identiques, la chute $2r\mathrm{I}$ correspond à celle qui se produit dans un conducteur de longueur double de celle du bifilaire.

On ne modifiera donc rien à la distribution des potentiels en supposant (ce qui simplifie considérablement les schémas) les circuits unifilaires, c'est-à-dire à retour par une terre de résistance nulle, mais présentant des résistances de conducteurs égales au double de la résistance des conducteurs simples réels.

Au cas où le circuit est à trois fils, il ne sera pas nécessaire de doubler les résistances, puisque la chute dans un des conducteurs sera précisément égale à celle admissible pour les récepteurs utilisés.

Lois des moments. — Conformément à cette hypothèse, soit un un conducteur AB (fig. 345) alimentant par A, n dérivations absorbant respectivement les intensités i_1, i_2, ... de somme I, les résistances des tronçons successifs étant r , r_2, ...

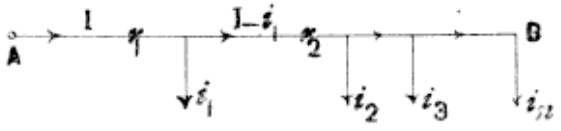


FIG. 345.

La chute totale de potentiel est égale à la somme des chutes dans les divers tronçons, c'est-à-dire

$$\begin{aligned}\Delta V &= r_1\,\mathrm{I} + r_2(\mathrm{I} - i_1) + r_3(\mathrm{I} - i_1 - i_2) \ldots + r_n(\mathrm{I} - i_1 - \ldots - i_{n-1}) \\ &= r_1(i_1 + i_2 + \ldots + i_n) + r_2(i_2 + i_3 + \ldots + i_n) + \ldots + r_n i_n \\ &= r_1 i_1 + (r_1 + r_2)\, i_2 + (r_1 + r_2 + r_3) i_3 + \ldots \\ &= \Sigma\, ri \qquad (1)\end{aligned}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et si l'on appelle *moment d'un récepteur par rapport à la source, le produit de la résistance comprise entre ce récepteur et la source par le courant qu'il absorbe,* la relation précédente peut s'énoncer : *la chute de voltage existant dans deux conducteurs alimentant un certain nombre de récepteurs en dérivation, depuis l'origine de la canalisation jusqu'à la source, est égale à la somme des moments des divers récepteurs par rapport à la source.*

L'équation précédente peut encore s'écrire :

$$\Delta V = (r_1 + r_2 + \ldots)\, I - (r_2 + r_3 + \ldots + r_n)\, i_1 - (r_3 + r_4 + \ldots + r_n)\, i_2 - \ldots - r_n\, i_n$$

ou

$$\Delta V = I \sum_1^n r - i_1 \sum_2^n r - i_2 \sum_3^n r \ldots \qquad (2)$$

Cette dernière relation s'énonce comme suit : *La chute de voltage est égale au moment de la source par rapport à l'extrémité de la canalisation, diminué de la somme des moments des divers récepteurs relativement à la même extrémité* (1).

Distributeur fermé. — Soit un distributeur ABCDEA (fig. 346), alimenté en A et envoyant les courants i_1, i_2, i_3, i_4 à 4 dérivations situées en B, C, D, E.

Il est évident qu'il existe une dérivation alimentée des deux côtés à la fois. Soient C cette dérivation et x l'intensité amenée par le côté BC. Appelons r_1, r_2, ... r_5 les résistances des tronçons AB, BC, ... EA. L'intensité passant en BC étant x,

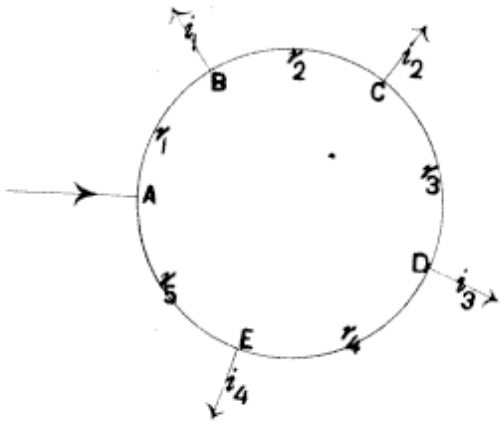


FIG. 346.

(1) Tous les problèmes qui vont suivre peuvent être traités graphiquement. Voir l'intéressant travail de notre ancien élève M. HENRI MICHEL : *Calcul graphique des distributions électriques à courant continu.* Bulletin technique de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole polytechnique de Bruxelles, décembre 1908, et Ramlot, rue Grétry, Bruxelles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

celle circulant en AB sera i_1+x. De même en CD nous aurons: i_2-x, en DE : i_3+i_2-x, en EA : $i_4+i_3+i_2-x$.

Le potentiel en C étant unique, de même qu'en A, les chutes suivant ABC et AEDC sont égales de part et d'autre, de sorte qu'en appliquant l'équation des moments sous sa forme, nous aurons :

$$r_1 i_1 + (r_1 + r_2) x = r_3 i_4 + (r_3 + r_4) i_3 + (r_3 + r_4 + r_3)(i_2 - x)$$

Cette équation, à une inconnue, permet la détermination de celle-ci.

On remarquera que l'on peut, sans inconvénient, couper le distributeur en C, à condition de raccorder chacune des extrémités à la dérivation i_2. On se trouvera exactement dans le cas de deux dérivations simples alimentant l'une, le branchement i_1 complètement et le branchement i_2 pour la portion x; l'autre, les branchements i_4, i_3 complètement et i_2 pour la portion i_2-x.

Comme les distributeurs sont généralement de section uniforme, les longueurs AB, BC, etc... pourront, en général, être substituées aux résistances r_1, r_2, ...

Si l'on s'est trompé quant à la dérivation alimentée de part et d'autre, on trouvera pour x une valeur plus grande que celle du courant dérivé au branchement considéré, si le point de délimitation est au-delà, et une valeur négative s'il est en-deçà.

Dès que l'on connaît le point de convergence des courants et la distribution des intensités dans tous les tronçons situés de part et d'autre, on se trouve dans le cas de conducteurs à alimentation unique quant au calcul des sections.

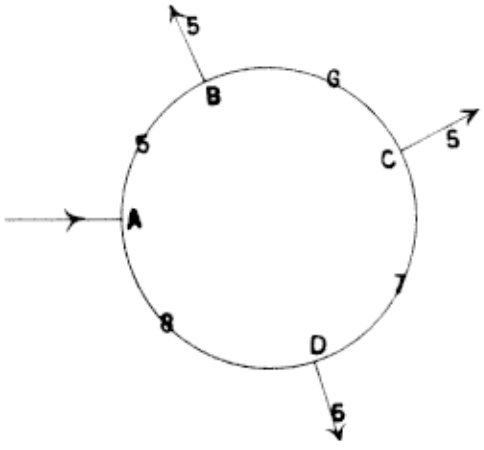


FIG. 347.

Ex. *Soient 3 dérivations de 5 ampères chacune, prises à 5, 6, 7 et 8 m de distance l'une de l'autre et de la source* (fig. 347).

Supposons erronément que la convergence des courants se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fasse à la première dérivation en B. Nous pourrons écrire l'équation :

$$5 \times x = 8 \times 5 + 15 \times 5 + 21\,(5 - x)$$

d'où $x = 8{,}47$ A, montrant que la ligne de démarcation existe au-delà du premier branchement.

Si, au contraire, nous avions supposé qu'elle se trouvait au 3e branchement, nous aurions eu :

$$5 \times 5 + 11 \times 6 + 18 \times x = 8\,(5 - x)$$

d'où $x = -1{,}53$ montrant que le courant est de sens inverse à celui admis en CD.

Il passe $5 + 1{,}53$ dans DA, 1,53 dans CD; $5 - 1{,}53 = 3{,}47$ A dans le conducteur CB et $5 + 3{,}47 = 8{,}47$ dans le conducteur BA. Si la chute est de 2 volts, on aura

$$2 = 2\rho 5/s \times 8{,}47 + 2\rho 6/s \times 3{,}47.$$

Avec $\rho = 1/60$, la section sera de 1,077 mm². Remarquons encore que la répartition entre les divers branchements est commandée par les résistances du distributeur qu'ils comprennent entre eux.

Distributeur ordinaire. — Ouvrons le conducteur ABCDA en A et étendons-le (fig. 348). Nous nous trouvons alors dans le cas du distributeur ordinaire, alimenté par des boîtes de distribution situées à ses extrémités. Si ces boîtes sont maintenues aux mêmes potentiels, le calcul précédent est entièrement applicable. On pourra d'ailleurs utiliser également l'équation des moments sous la forme (2).

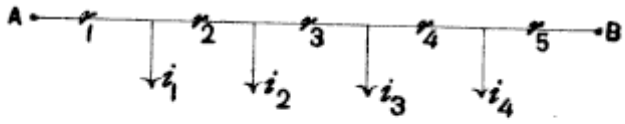


FIG. 348.

Puisque l'on revient au même potentiel à l'extrémité opposée, $\Delta V = 0$ d'un bout à l'autre et l'on a

$$I\,\Sigma_1^n r = i_1\,\Sigma_2^n r + i_2\,\Sigma_3^n r + \ldots$$

aussi bien dans le sens AB que dans le sens BA, ce qui permet de déterminer les courants affluant de A et de B. La connaissance d'un des deux, suffira d'ailleurs pour la détermination de tous les courants émanant du distributeur considéré.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ex. Reprenons nos trois dérivations de 5 A. Appelons I_A le courant émis par A (fig. 349). Nous aurons

$$I_A (5 + 6 + 7 + 8) = 5 (6 + 7 + 8) + 5 (7 + 8) + 5 \times 8$$

d'où $I_A = 8{,}47$ A.

Dès lors, il circulera dans le tronçon 6 une intensité de 8,47 — 5 = 3,47 A ; dans le 3e tronçon 3,47 — 5 = — 1,53 A, c'est-à-dire que ce tronçon amènera un courant de 1,53 A, le suivant 1,53 + 5 = 6,53 arrivant du point B. En appliquant l'équation des moments par rapport au point B, on aurait trouvé directement $I_B = 6{,}53$ A.

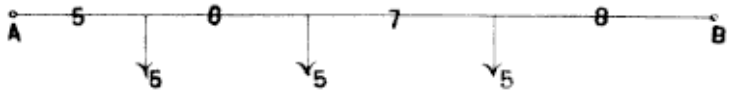


FIG. 349.

REMARQUE. La seconde forme de l'équation des moments reprise ci-dessus peut encore s'écrire

$$I_A = \frac{i_1 \Sigma_2^n r}{\Sigma_1^n r} + \frac{i_2 \Sigma_3^n r}{\Sigma_1^n r} + \ldots + \frac{i_{n-1} r_n}{\Sigma_1^n r}.$$

On a de même pour le courant sortant en B

$$I_B = \frac{i_1 r_1}{\Sigma_1^n r} + \frac{i_2 \Sigma_1^2 r}{\Sigma_1^n r} + \ldots \ldots$$

d'où par addition

$$I_A + I_B = i_1 \left(\frac{\Sigma_2^n r + r_1}{\Sigma_1^n r} \right) + i_2 (\ldots$$

et l'on voit que la dérivation i_1 s'alimente par A d'un courant donné par *le moment de i_1 par rapport à* B, *divisé par la résistance totale du distributeur*; de même elle s'alimente en B, d'un courant donné par *le moment de i_1 par rapport à* A, *divisé par la résistance totale du distributeur et ainsi de suite pour toutes les autres*. C'est ce que l'on peut appeler les *composantes* des courants i_1, i_2 ... aux boîtes ou nœuds A et B.

Section la plus économique. — Nous avons étudié précédemment comment on pouvait déterminer la section la plus avantageuse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour les conducteurs d'une installation donnée. Dans le cas où ces conducteurs alimentent des dérivations *échelonnées* i_1, i_2, ... (fig. 350), situées à des distances l_1, l_2..., la section sera déterminée par l'équation

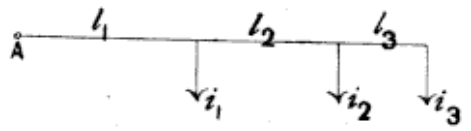


FIG. 350.

$$\Delta V = \Sigma ri$$

$$= \frac{2\rho l_1 i_1}{s} + \frac{2\rho (l_1 + l_2) i_2}{s} + \dots$$

$$= \frac{2\rho}{s} [l_1 i_1 + (l_1 + l_2) i_2 + \dots]$$

d'où
$$s = \frac{2\rho}{\Delta V} [l_1 i_1 + (l_1 + l_2) i_2 + \dots] \qquad (1)$$

et le poids de cuivre nécessaire est

$$P = 2 s (l_1 + l_2 + \dots + l_n) \delta \qquad (2)$$

Mais puisqu'à partir du premier point de bifurcation le courant va constamment en diminuant, on pourra réduire la section, et les deux équations (1) et (2) deviendront

$$\Delta V = 2\rho \left[\frac{l_1 i_1}{s_1} + \left(\frac{l_1}{s_1} + \frac{l_2}{s_2} \right) i_2 + \dots \right]$$

et $P' = 2\delta (s_1 l_1 + s_2 l_2 + \dots)$.

Le problème peut, dans ce cas, être résolu d'une infinité de manières, puisque si la section s_1 a été prise trop faible, on pourra néanmoins arriver au résultat en renforçant la ou les sections suivantes s_2, s_3, ... Mais entre toutes ces solutions, une d'elles conduira à un poids minimum. Nous allons la chercher.

Considérons les deux premières dérivations seulement; nous aurons les deux équations

$$\Delta V = 2\rho \left[\frac{l_1 i_1}{s_1} + \left(\frac{l_1}{s_1} + \frac{l_2}{s_2} \right) i_2 \right] = 2\rho \left[\frac{l_1}{s_1} (i_1 + i_2) + \frac{l_2}{s_2} i_2 \right]$$

et $P' = 2\delta (s_1 l_1 + s_2 l_2)$.

En éliminant s_1 et égalant à zéro la dérivée de P' par rapport à s_2, on obtient la valeur de s_2 rendant P' minimum.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On opère de même pour s_2 et l'on trouve que

$$\frac{s_1}{s_2} = \sqrt{\frac{i_1 + i_2}{i_2}}$$

c'est-à-dire que *le poids de cuivre est minimum, quand les sections sont entre elles comme les racines carrées des intensités auxquelles elles livrent passage.*

On peut aisément généraliser ce résultat en marchant de proche en proche depuis l'extrémité jusqu'à la source.

Application. — *Soient trois distributeurs AB, BC, CA, alimentés en A, B, C, sur lesquels sont dérivées, aux distances indiquées en mètres, des dérivations dont la valeur est exprimée en ampères. Déterminer leur section, de manière que la chute de voltage qui s'y produit à pleine charge, ne dépasse pas deux volts.*

Dans le distributeur AB (fig. 351), le courant I_{AB} sortant de

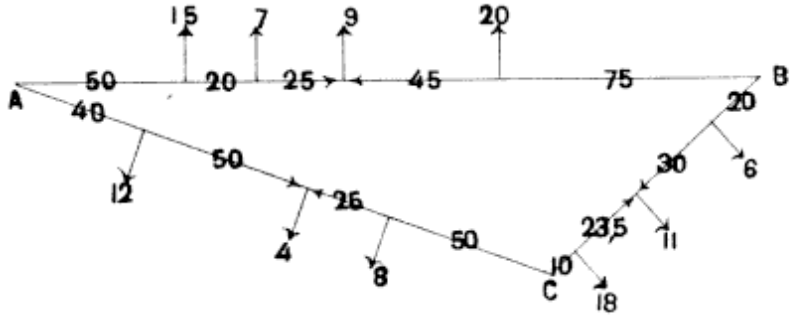


Fig. 351.

A peut se calculer en prenant le moment par rapport au point B.

$$I_{AB} = \frac{75 \times 20 + 120 \times 9 + 145 \times 7 + 165 \times 15}{215} = 28{,}25 \text{ A.}$$

Le courant en A	——›	15	est donc			28,25	
» »	» 15	——›	7	»	»	28,25 — 15 =	13,25
» »	» 7	——›	9	»	»	13,25 — 7 =	6,25
» »	» 9	‹——	20	»	»	6,25 — 9 =	— 2,75
» »	» 20	‹——	B	»	»	— 2,75 — 20 =	— 22,75

Vérification : le courant I_{BA} sortant de B est

$$I_{BA} = \frac{50 \times 15 + 70 \times 7 + 95 \times 9 + 140 \times 20}{215} = 22{,}75 \text{ A.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le point de coupure est en 9.

La section s du distributeur AB sera donnée par l'équation

$$2 = \frac{2}{60\,s}\,(50 \times 28{,}25 + 20 \times 13{,}25 + 25 \times 6{,}25)$$

d'où $s = 30{,}5$ mm². Vérification : la chute entre B et 9 = 2 volts.

Distributeur AC.

$$I_{AC} = \frac{50 \times 8 + 75 \times 4 + 125 \times 12}{165} = 13{,}33\ \text{A.}$$

Le courant dans le tronçon A ——› 12 est 13,33

» » » » 12 ——› 4 » 13,33 — 12 = 1,33

» » » » 4 ‹—— 8 » 1,33 — 4 = — 2,67

» » » » 8 ‹—— C »—2,67 — 8 = — 10,67

Vérification :

$$I_{CA} = \frac{40 \times 12 + 90 \times 4 + 115 \times 8}{165} = 10{,}67\ \text{A.}$$

Point de coupure en 4.

Section $s' = 1/60\,(40 \times 13{,}33 + 50 \times 1{,}33) = 10$ mm².

Distributeur CB.

$$I_{CB} = \frac{20 \times 6 + 50 \times 11 + 73{,}5 \times 18}{83{,}5} = 23{,}88\ \text{A.}$$

Le courant dans le tronçon C ——› 18 est 23,88

» » » » 18 ——› 11 » 23,88 — 18 = 5,88

» » » » 11 ‹—— 6 » 5,88 — 11 = — 5,12

» » » » 6 ‹—— B »—5,12 — 6 = — 11,12

Vérification :

$$I_{BC} = \frac{10 \times 18 + 33{,}5 \times 11 + 63{,}5 \times 6}{83{,}5} = 11{,}12\ \text{A.}$$

Point de coupure en 11.

$$s'' = 1/60\,(10 \times 23{,}88 + 23{,}5 \times 5{,}88) = 6{,}28\ \text{mm}^2.$$

Cherchons maintenant à économiser le cuivre. La section du distributeur AC est de 10 mm². Or le courant passant dans le tronçon 12 ——› 4 de 50 m de long, n'est que de 1,33 A. On pourra réduire considérablement cette section, quitte à renfor-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cer légèrement celle A——› 12. Appelons s'_1 et s'_2 les nouvelles sections respectives des deux tronçons.

Ecrivons que la chute de voltage ne doit pas être modifiée par le changement de sections. La dérivation 4 étant un point de coupure ou de convergence, nous savons que la chute de A à 4 est de 2 volts. Donc

$$\frac{2 \times 40}{60\, s'_1} 13{,}33 + \frac{2 \times 50}{60\, s'_2} 1{,}33 = 2.$$

D'autre part les sections doivent être en raison des racines carrées des intensités des courants, d'où

$$\frac{s'_1}{s'_2} = \sqrt{\frac{13{,}33}{1{,}33}}$$

En résolvant ces deux équations nous trouvons :

$$s'_2 = 3{,}99 \text{ et } s'_1 = 12{,}62 \text{ mm}^2.$$

Au lieu d'un volume de cuivre de $2 \times 90\,000 \times 10$ mm^2 = 1 800 cm^3, il suffira d'un volume de $2 \times 40\,000 \times 12{,}62 + 2 \times 50\,000 \times 3{,}99 = 1\,208{,}8$ cm^3, économie d'à peu près 30 %.

L'artère aboutissant en A devra donc amener 28,25 + 13,33 = 41,58 ampères ; celle aboutissant en B : 22,75 + 11,12 = 33,87 et enfin celle aboutissant en C : 10,67 + 23,88 = 34,55. Vérification supplémentaire : les 3 artères amènent 110 A, ce qui est précisément la consommation de toutes les dérivations.

Connaissant l'emplacement de la station centrale, c'est-à-dire la longueur des artères, il sera dès lors aisé de déterminer leur section d'après une des règles précédemment établies.

Modification de réseaux existants. — Le théorème des moments permet donc de déterminer très simplement les sections des distributeurs. Si, dans une distribution existante, on vient à ajouter de nouveaux récepteurs, la distribution des potentiels se modifie et il y a lieu de faire intervenir d'autres facteurs, pour arriver à la connaissance de la répartition des courants dans les conducteurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Composantes des courants dérivés et potentiels aux nœuds. — Soit un distributeur raccordé à deux boîtes de distribution A, B (fig. 352) alimentant une dérivation i séparée de A et B par les résistances r_1 et r_2, traversées par les courants partiels i_1, i_2.

La première loi de Kirchhoff nous donne :

$$i_1 + i_2 = i. \qquad (1)$$

Si les deux points A et B sont au même potentiel, nous aurons :

$$r_1 i_1 - r_2 i_2 = 0 \text{ ou } \frac{i_1}{r_2} = \frac{i_2}{r_1} \text{ ou encore } i_1 = \frac{i r_2}{r},\ i_2 = \frac{i r_1}{r},$$

propriétés connues, puisque les points A et B peuvent alors être considérés comme soudés l'un à l'autre, r_1 et r_2 étant placées en dérivation dans le circuit parcouru par le courant total i. Nous avons d'ailleurs trouvé ces équations précédemment sous leur forme générale.

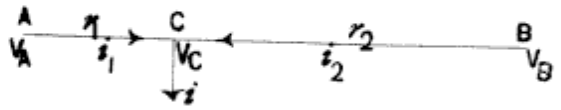


FIG. 352.

Mais, si les points A, B, C, sont à des potentiels différents $V_A > V_B > V_C$, on aura évidemment

$$V_C = V_A - r_1 i_1 = V_B - r_2 i_2$$

d'où

$$V_A - V_B = r_1 i_1 - r_2 i_2. \qquad (2)$$

Les équations (1) et (2), qui existent simultanément, permettent de tirer les valeurs de i_1 et i_2

$$i_1 = \frac{V_A - V_B}{r} + \frac{i r_2}{r}$$

$$i_2 = -\frac{V_A - V_B}{r} + \frac{i r_1}{r}.$$

Ex. I. Soient $V_A - V_B = 0{,}1$ V, $i = 2$A, $r_1 = 0{,}1$ et $r_2 = 0{,}3$ ohm. On aura

$$i_1 = 0{,}25 + 1{,}5 = 1{,}75 \text{ A}$$
$$i_2 = -0{,}25 + 0{,}5 = +0{,}25 \text{ A}$$

La dérivation i est, dans ce cas, alimentée de part et d'autre par des courants concourants de 1,75 et 0,25 A.

II. Si

$$V_A - V_B = 0{,}2 \text{ V}$$
$$i_1 = 0{,}5 + 1{,}5 - 2 \text{ A}$$
$$i_2 = -0{,}5 + 0{,}5 = 0$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il ne passe rien dans le tronçon CB, les deux ampères étant intégralement amenés par le tronçon AC.

III. Enfin si

$$V_A - B_B = 0{,}4\ V$$
$$i_1 = 1 + 1{,}5 = 2{,}5\ A$$
$$i_2 = -1 + 0{,}5 = -0{,}5\ A$$

C'est encore le tronçon AC qui alimente exclusivement i, mais en outre le courant en CB étant négatif, s'éloigne de C.

En résumé, chacun des courants i_1 et i_2 peut donc être considéré comme formé de deux constituants : l'un, $V_A/r - V_B/r$, que l'on peut appeler *courant d'échange* ou de *circulation*, correspond au courant qui passerait dans le conducteur AB sous l'effet de la seule différence de potentiel $V_A - V_B$; il est positif pour le courant partant du nœud de potentiel le plus élevé, négatif pour le courant partant du nœud de potentiel moindre ; l'autre, $i\,r_2/r$ ou $i\,r_1/r$, représente chacune des parties dont la somme donne i : c'est ce que nous avons appelé les composantes aux nœuds. On peut expliquer physiquement ces équations d'une manière simple. Supposons la dérivation ouverte. Alors il ne passe dans le distributeur AB, que le courant de circulation dû à la différence de potentiel $V_A - V_B$ agissant sur la résistance r. Si l'on ferme le circuit dérivé, le courant est renforcé d'un côté et affaibli de l'autre, comme si deux courants émanant des boîtes venaient, l'un s'ajouter au courant d'échange, l'autre s'en retrancher. Les potentiels en A et B varieront d'ailleurs légèrement par suite du passage de ces courants.

Si au lieu d'une seule dérivation, nous en avons plusieurs, la même distribution se maintient, chacune des dérivations s'alimentant aux nœuds adjacents par deux courants composants donnés par des expressions semblables.

On voit donc clairement que, pour se rendre compte de la circulation réelle existant dans les divers tronçons, déterminer les points de coupure et vérifier ainsi les chutes de potentiel maxima, il ne nous suffira plus, comme lorsque tous les nœuds étaient au même potentiel, de décomposer toutes les dérivations en leurs composantes aux nœuds ; puis, partant d'un nœud, d'en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

déduire de proche en proche les courants circulant dans les tronçons : il faudra en outre, ici, tenir compte des courants de circulation dus aux différences de potentiel existant entre ces divers nœuds.

Méthode de Coltri. — Soient 4 nœuds A, B, C, D (fig. 353) d'un réseau quelconque. Réduisons pour simplifier, à une seule dérivation, les prises de courants sur les distributeurs DA, DB, DC ; soient r_1, r_2, et r_3 les résistances comprises entre ces dérivations et les nœuds extérieurs (à haut potentiel) ; V_A, V_B, V_C, V_D les potentiels aux nœuds ; R_1, R_2 et R_3 les résistances totales des conducteurs AD, BD et CD.

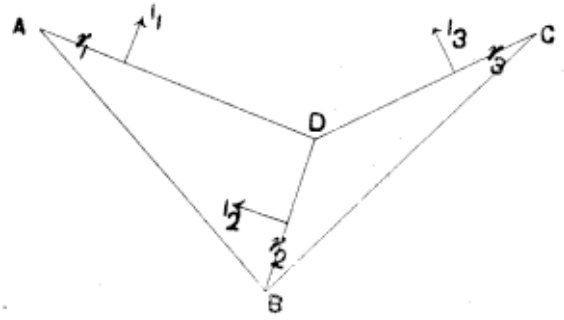


FIG. 353.

La décomposition des courants au point D nous fournira les équations suivantes :

$$\text{Distribut}^{r}\ \text{AD courant sortant de D} : i_1 = -\frac{V_A - V_D}{R_1} + I_1 \frac{r_1}{R_1}$$

$$\text{»} \quad \text{BD} \quad \text{»} \quad \text{»} \quad \text{»} \quad i_2 = -\frac{V_B - V_D}{R_2} + I_2 \frac{r_2}{R_2} \qquad (3)$$

$$\text{»} \quad \text{CD} \quad \text{»} \quad \text{»} \quad \text{»} \quad i_3 = -\frac{V_C - V_D}{R_3} + I_3 \frac{r_3}{R_3}$$

En additionnant et remarquant que la somme des courants aboutissant en D est nécessairement nulle, il vient :

$$\frac{V_A - V_D}{R_1} + \frac{V_B - V_D}{R_2} + \frac{V_C - V_D}{R_3} = \frac{I_1 r_1}{R_1} + \frac{I_2 r_2}{R_2} + \frac{I_3 r_3}{R_3}$$

ou

$$\Sigma \frac{V - V_D}{R} = \Sigma \frac{I r}{R} \qquad (4)$$

On obtiendra une équation analogue pour chaque nœud du réseau, ce qui permettra de déterminer tous les potentiels nodaux. Connaissant ceux-ci, on en tire, à l'aide des équations (3), les divers courants i_1, i_2,... sortant des nœuds et tous les éléments du réseau pourront alors être déterminés.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Application. — Comme application, reprenons le réseau étudié précédemment et supposons qu'après achèvement de celui-ci, une nouvelle prise de courant de 25 A doive être établie à 10 m de la dérivation de 20 ampères dans la section 9 ‹——› 20 du conducteur BA (fig. 351).

Cette dérivation ajoute en B une composante de

$$\frac{130 \times 25}{215} = 15{,}12 \text{ A.}$$

On a dès lors dans B‹—— 20 un courant de $22{,}75 + 15{,}12 = 37{,}87$ A
» 20‹—— 25 » » » $37{,}87 - 20 = 17{,}87$ A
» 25——› 9 » » » $17{,}87 - 25 = -\ 7{,}13$ A

et le point de coupure est transféré de 9 en 25.

La chute de potentiel de B au nouveau point de coupure est

$$\frac{2 \times 75 \times 37{,}87}{\times 30{,}3} + \frac{2 \times 10 \times 17{,}87}{60 \times 30{,}3} = 3{,}13 + 0{,}196 = 3{,}326 \text{ volts.}$$

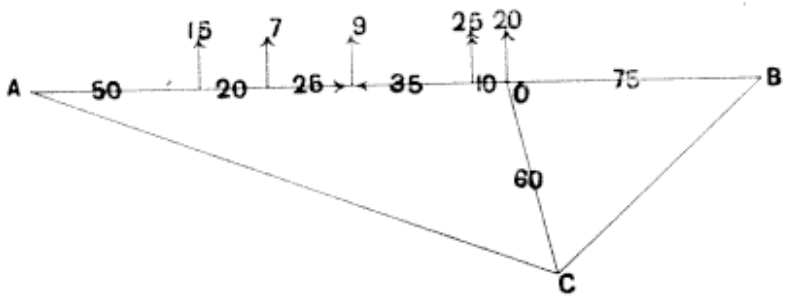


Fig. 354.

Elle est trop élevée. Supposons que, pour l'abaisser, nous réunissions le point de dérivation précédent 20, que nous appellerons O, à la boîte de distribution la plus proche, c'est-à-dire à C située à 60 m. Nous allons chercher la section x à donner à ce raccordement, pour que la chute de voltage ne dépasse pas 2 volts en aucun point (fig. 354).

Il existera entre les trois nœuds A, B, C et le nouveau nœud O une différence de potentiel que nous devons calculer. Nous pourrons alors déterminer les courants. Nous avons donc en somme deux inconnues : la différence de potentiel dont il s'agit et la nouvelle section ; leur connaissance exige deux équations. Nous trouverons l'une, dans l'application de la méthode de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Coltri et la seconde, dans la condition imposée pour la chute maximum de potentiel.

Appliquée au nœud O, la méthode de Coltri donne :

$$\frac{V_A - V_O}{R_{AO}} + \frac{V_B - V_O}{R_{BO}} + \frac{V_C - V_O}{R_{CO}} = \Sigma \frac{ir}{R}$$

ou $$\frac{(V_A - V_O)\,60 \times 30{,}3}{2 \times 140} + \frac{(V_B - V_O)\,60 \times 30{,}3}{2 \times 75} + \frac{(V_C - V_O)\,60\,x}{2 \times 60} = \frac{50 \times 15 + 70 \times 7 + 95 \times 9 + 130 \times 25 + 140 \times 20}{140}$$

Les potentiels V_A, V_B et V_C sont égaux. Donc $V_A - V_O = V_B - V_O = V_C - V_O$ et l'on a :

$$30\,(V_C - V_O)\left(\frac{30{,}3}{140} + \frac{30{,}3}{75} + \frac{x}{60}\right) = 58{,}15$$

ou $$(V_C - V_O)\,(0{,}62 + 0{,}01668\,x) = 1{,}938. \qquad (1)$$

Il faut que le courant dans O ‹——› 25 donne une perte de charge qui, ajoutée à celle existant de C en O, ne dépasse pas 2 volts. Cherchons la valeur du courant dans la section O‹——›25.

En vertu de la première loi de Kirchhoff, l'intensité d'un courant sortant d'un nœud est égale à la somme des courants entrant dans ce nœud, moins la somme des autres courants sortant.

Nous avons comme courants entrant : 1° le courant de circulation amené par CO, soit $\frac{(V_C - V_O)\,60\,x}{2 \times 60}$; 2° le courant de circulation amené par BO soit $\frac{(V_C - V_O)\,60 \times 30{,}3}{2 \times 75}$. Comme courant divergeant autre que celui sortant vers OA, nous ne trouvons que la dérivation 20.

Le courant sortant de O vers A aura donc pour valeur :

$$\frac{(V_C - V_O)\,60\,x}{2 \times 60} + \frac{(V_C - V_O)\,60 \times 30{,}3}{2 \times 75} - 20$$

donnant lieu, dans le tronçon O ‹—— 25, à la chute :

$$\frac{2 \times 10}{60 \times 30{,}3}\left[\frac{(V_C - V_O)\,60\,x}{2 \times 60} + \frac{(V_C - V_O)\,60 \times 30{,}3}{2 \times 75} - 20\right]$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

soit $$\frac{(V_C - V_O)\,10\,x}{30{,}3 \times 60} + \frac{(V_C - V_O)\,10 \times 30{,}3}{30{,}3 \times 75} - \frac{2 \times 10 \times 20}{60 \times 30{,}3}$$

ou $$(V_C - V_O)\left[\frac{10\,x}{30{,}3 \times 60} \times \frac{10}{75}\right] - 0{,}22$$

ou $$(V_C - V_O)\,(0{,}005\,51\,x + 0{,}1332) - 0{,}22.$$

Cette chute ajoutée à $V_C - V_O$ doit être égale à 2 volts, d'où

$$(V_C - V_O)\,(0{,}005\,51\,x + 1{,}1332) = 2{,}22. \qquad (2)$$

En combinant (2) avec (1), on trouve :

$$x = 31{,}2\ \text{mm}^2 \text{ et } V_C - V_O = 1{,}705\ \text{V}.$$

Le courant sortant de O vers A a pour valeur :

$$\frac{1{,}705 \times 60 \times 31{,}2}{2 \times 60} + \frac{1{,}705 \times 60 \times 30{,}3}{2 \times 75} - 20 = 26{,}6 + 20{,}66 - 20 = 27{,}26\,\text{A}$$

donnant lieu à une chute de voltage de

$$\frac{2 \times 10 \times 27{,}26}{60 \times 30{,}3} = 0{,}3\ \text{V}$$

laquelle ajoutée à la perte en $V_C - V_O$ ou 1,70 donne bien 2 volts.

La répartition des courants dans le bras OA est la suivante :

O ——›	25	courant de	27,26 A
25 ——›	9	» »	27,26 — 25 = 2,26 A
9 ‹——	7	» »	2,26 — 9 = — 6,74 A
7 ‹——	15	» »	— 6,74 — 7 = — 13,74 A
15 ‹——	A	» »	— 13,74 — 15 = — 28,74 A.

Dans la nouvelle disposition, le point de coupure est revenu en 9.

Chute de voltage en A ‹——› 9

$$\frac{2 \times 50 \times 28{,}74}{60 \times 30{,}3} + \frac{2 \times 20 \times 13{,}74}{60 \times 30{,}3} + \frac{2 \times 25 \times 6{,}74}{60 \times 30{,}3} = 2{,}06.\ \text{V}$$

La chute maximum de voltage est un peu plus grande que 2 volts, parce que le point de coupure est en 9 au lieu d'être en 25 comme nous l'avons supposé. Elle peut être admise; si la différence avait été trop élevée, les calculs devraient être recommencés, en tenant compte de l'exacte situation du point de coupure, ce qui nous aurait fait trouver pour x une section un peu plus forte ramenant les chutes de potentiel au taux voulu.

Il est à remarquer que les calculs des potentiels doivent être

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

exécutés très exactement et que l'on ne peut utiliser à cette fin la règle à calcul de 26 cm, la plus employée. Avec celle-ci, en effet, l'approximation n'atteint que le 1/100e environ. Or, comme les différences de potentiel qui servent à calculer les intensités ne dépassent pas les 3/100 des potentiels eux-mêmes, il s'ensuit que l'on serait exposé à de graves erreurs. Si par exemple on a fait une erreur en moins de 0,5 % et une erreur en plus de 0,5 % sur la valeur des potentiels de deux sommets consécutifs, au lieu de 3 %, on trouvera pour la différence 4 %, soit une erreur relative de 33 %, conduisant à des résultats inadmissibles.

Modification de M. Buffa. — Pour éviter cet inconvénient, M. Buffa prend les intensités des courants comme inconnues, ce qui avec une approximation d'0,01 dans les opérations numériques, donne les valeurs des potentiels au 0,0001.

Après avoir choisi les sections des distributeurs et déterminé leur résistance, que l'on double s'il s'agit de réseaux bifilaires, on décompose chaque prise de courant (branchement) en ses deux composantes aux nœuds et l'on établit la charge totale de chaque nœud du chef de ces composantes. S'il y a m mailles et n feeders, on prend comme inconnues les *courants de circulation* de $m + n - 1$ distributeurs, en exprimant les courants des autres distributeurs en fonction de ceux-là et des charges des nœuds.

On applique la seconde loi de Kirchhoff aux m mailles parcourues dans le sens des aiguilles d'une montre, ce qui fournit m équations.

En parcourant ensuite les distributeurs en sens inverse des aiguilles d'une montre, on établit n équations supplémentaires, en écrivant qu'entre les points d'arrivée de deux feeders, la chute totale de potentiel est nulle, ou présente une valeur déterminée.

On possède ainsi $m + n$ équations à $m + n - 1$ inconnues. L'équation surabondante, qui présente le moins d'inconnues, est gardée comme contrôle. En écrivant toutes les équations l'une en dessous de l'autre, et alignant dans une même colonne les termes contenant les mêmes inconnues, chaque colonne doit

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

donner une somme nulle, s'il n'y a pas d'erreur. Ceci constitue une vérification précieuse, dès le début des opérations. On élimine alors les inconnues en commençant par celles n'existant pas dans l'équation de contrôle, de manière à vérifier le plus longtemps possible l'exactitude des calculs.

Les courants de circulation étant déterminés, on possède toutes les données pour calculer l'intensité des courants dans tous les tronçons à partir des nœuds et, par suite, les chutes de potentiel.

Branchements. — Le branchement est l'installation particulière qui vient se greffer sur le distributeur. On y rencontre en premier lieu le compteur, des fusibles généraux, un interrupteur général et, enfin, des canalisations allant alimenter les barres d'un certain nombre de tableaux de fusibles d'où rayonnent les circuits d'éclairage généralement de 5 A au maximum (10 lampes au carbone de 16 bougies). Dans les petites habitations un seul tableau de fusibles placé au rez-de-chaussée suffit. Dans les habitations d'importance moyenne, on attribuera un tableau à chaque étage ; enfin, on en trouvera plusieurs par étage, dans les hôtels et immeubles importants.

On indiquera d'abord sur un plan à 2 cm par mètre (1/50) le nombre, l'emplacement et la nature des foyers lumineux. On les groupera en divers circuits de 5 ampères au maximum aboutissant aux tableaux et l'on déterminera également la position des interrupteurs et appareils quelconques.

Calcul des sections. — La perte admise dans les branchements est généralement de 2 °/₀ quand toutes les lampes sont allumées. Dans une canalisation sous 110 volts, on ne pourra perdre au-delà de 2,2 volts. Nous admettrons 2 volts pour réserver une certaine marge (10 °/₀) et permettre l'installation ultérieure de quelques récepteurs supplémentaires sans devoir modifier les circuits principaux.

La formule donnant la section pour une canalisation bifilaire est

$$s = \frac{2\,l\,I}{60\,\Delta V}. \qquad (1)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Afin de tenir compte de l'augmentation de résistance due à l'élévation de température provoquée par l'effet Joule et pour majorer la faible marge adoptée, on peut admettre que la résistance d'un fil d'un mètre de longueur, sous un millimètre carré de section, atteint 1/50 au lieu d'1/60, de sorte que (1) devient

$$s = \frac{l\,\mathrm{I}}{25\,\Delta\mathrm{V}}. \qquad (2)$$

Comme une lampe de 16 bougies au carbone (type le plus employé) consomme très sensiblement 1/2 ampère, la formule écrite ci-dessus devient finalement, en remplaçant I par 1/2 et ΔV par 2,

$$s = \frac{l}{100} \qquad (3)$$

d'où la règle simple : *Pour déterminer la section en millimètres carrés, des conducteurs alimentant une lampe ordinaire au carbone de 16 bougies, il suffit de prendre le centième de la distance en mètres qui sépare cette lampe du compteur.*

Mais ce n'est pas tout. Il faut encore que la densité du courant ne dépasse pas une valeur donnée. Or l'équation (2) devient, en y faisant $\Delta V = 2$:

$$\frac{\mathrm{I}}{s} = \frac{50}{l}. \qquad (4)$$

En admettant une densité maximum de 2 A par mm^2 pour les intensités plus faibles que 50 A, on devra satisfaire à la relation

$$\frac{\mathrm{I}}{s} = \frac{50}{l} \leqslant 2, \text{ d'où } l \geqslant 25 \qquad (5)$$

On n'obtiendra donc une densité de courant tolérable, en d'autres termes la formule (3) ne sera applicable dans les conditions que nous nous sommes fixées, *que si la longueur du circuit de la lampe jusqu'au compteur dépasse 25 mètres. Quand cette longueur est moindre, la section pourra se calculer en admettant 2 A par millimètre carré.*

Les sections minima nécessaires étant ainsi déterminées pour toutes les lampes ou groupes de lampes jusqu'au compteur, il suffira de les sommer sur tous les parcours communs, et d'adopter les sections commerciales immédiatement supé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rieures. Les plus usuelles sont reprises au tableau ci-dessous pour les conducteurs à fil simple et les fils souples à deux conducteurs.

Fils à lumière	s 0,5	0,79	1	1,54	2,01	2,54	3,14	3,8	4,91	5,73	7,07	9,62	12,57	15,9	19,63
	d 0,8	1	1,14	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,5	2,7	3	3,5	4	4,5	5

Fils souples à deux conducteurs	s	2 × 0,5	2 × 0,75	2 × 1	2 × 1,5	2 × 2,5	2 × 4
	d	16 × 0,2	24 × 0,2	32 × 0,2	48 × 0,2	50 × 0,25	120 × 0,25

En pratique, on se contente généralement de déterminer la section d'après le nombre d'ampères, puis de vérifier si, pour la lampe la plus éloignée, la chute ne dépasse pas celle admise. Si cette chute est trop forte, on modifie la ou les sections de manière à la ramener à la valeur voulue.

Si la distribution est à trois fils, les dérivations de 5 ampères seront bifilaires, mais branchées et équilibrées sur les deux ponts des trois barres de tableaux, eux-mêmes raccordés au compteur par des circuits à trois fils, dont la section des conducteurs extrêmes est égale au quart de celle des conducteurs bifilaires déterminés comme ci-dessus.

Il conviendra d'adopter pour les schémas les signes conventionnels usuels généralement admis, et de tenir éventuellement compte des prescriptions imposées par l'usine alimentant l'installation.

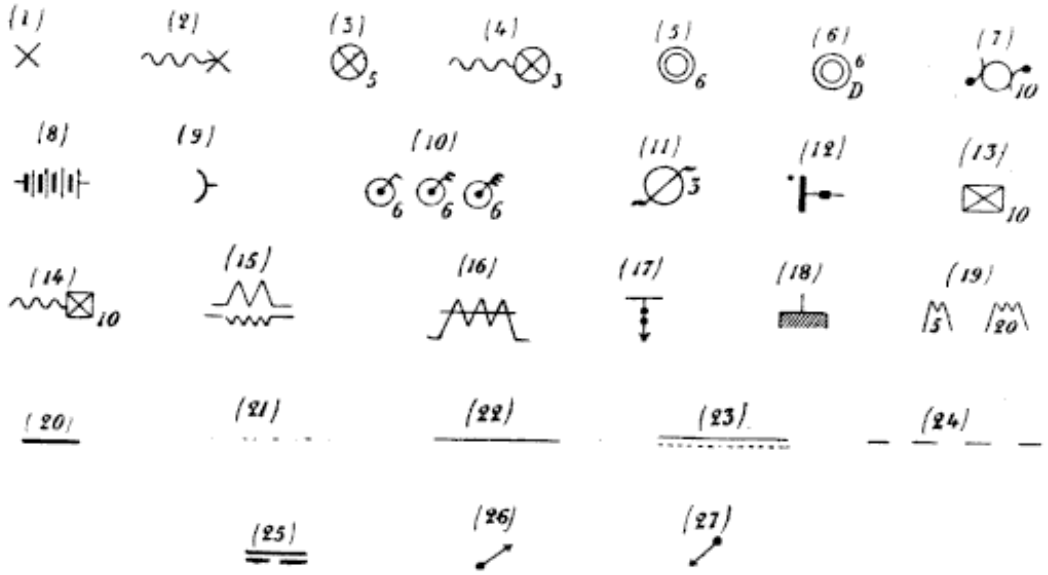
S'il s'agit de lampes ayant une consommation spécifique différant notablement de celle que nous avons admise, on établira aisément des formules analogues aux précédentes, que l'on appliquera sans difficulté en se servant de la règle à calculs.

Réseaux à courants alternatifs.— Dans ceux-ci, il faut tenir compte de l'impédance des conducteurs et, éventuellement, si ces derniers sont gros et les fréquences élevées, de l'effet Kelvin qui accroît la résistance.

On décomposera les courants déphasés en courants wattés et déwattés, auxquels on appliquera les méthodes précédentes, puis il suffira d'additionner partout les courants en phase et, enfin, de combiner les courants totaux suivant le parallélogramme, pour arriver aux courants réels et par suite aux chutes de voltage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Signes conventionnels. — Afin de simplifier les schémas et de rendre plus facile leur lecture, il y a lieu d'adopter des signes spéciaux. Le tableau suivant, extrait de l'ouvrage de M. Eric Gérard (1), donne les plus usités :



(1) lampe à incandescence fixe, (2) lampe à incandescence mobile, (3) lustre fixe avec cinq incandescences, (4) groupe de trois incandescences mobiles, (5) lampes à arc de six ampères, (6) lampe à arc enfermé de six ampères, (7) génératrice ou moteur de 10 kw, (8) accumulateurs, (9) prise de courant, (10) interrupteur simple, interrupteur double et interrupteur triple pour six ampères, (11) commutateur pour trois ampères, (12) coupe-circuit sur une dérivation, (13) résistance ou appareil de chauffage fixe pour dix ampères, (14) résistance ou appareil de chauffage mobile pour dix ampères, (15) transformateur, (16) bobine de réaction, (17) parafoudre, (18) terre, (19) compteur à deux fils de cinq kw et compteur à trois fils de vingt kw, (20) tableau pour distribution à deux fils, (21) conducteur simple, (22) ligne à deux conducteurs, (23) ligne à trois conducteurs, (24) câble multiple fixe, (25) tableau pour distribution à trois conducteurs, (26) colonne montante, (27) colonne descendante.

(1) *Leçons sur l'électricité*, 7me édition, T. II, p. 464. Gauthier-Villars, Paris 1905.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XIV.

Eclairage [1].

Production des radiations lumineuses. — Les radiations lumineuses peuvent être produites industriellement par deux systèmes principaux : 1° par *incandescence*, c'est-à-dire en portant les corps à une température très élevée, et l'on distingue deux processus : l'incandescence proprement dite et l'arc voltaïque; 2° par *luminescence* ou transformation directe de l'énergie électrique en énergie lumineuse. C'est le principe des tubes de Geissler, dans lesquels la lumière est produite par des décharges électriques à travers des gaz très raréfiés.

Nous ne nous occuperons que du premier mode d'éclairage.

---

§ I. — Incandescence.

Lorsqu'on élève graduellement, par effet Joule, la température d'un corps conducteur à point de fusion élevé, on constate, à partir d'un certain point, l'émission de rayons lumineux. D'abord très faible et rougeâtre, la lumière émise se renforce, passe au rouge vif, puis au blanc éblouissant; enfin, si l'incandescence est encore poussée plus loin, le métal fond ou se volatilise.

L'impression physiologique que donne la lumière est, comme on sait, provoquée par des vibrations transversales extrêmement

(1) J. Rodet. *Les lampes à incandescence électriques*, 1907.
A. Berthier. *Eclairage électrique économique*, Dunod et Pinat, 1908.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rapides de l'éther. Ces vibrations sont de diverses fréquences. En faisant traverser un prisme de verre par un pinceau de lumière blanche, celle-ci s'étale suivant un spectre coloré (fig. 355) où l'on retrouve toute la gamme des couleurs de l'arc-en-ciel, depuis le rouge sombre (le moins réfrangible) qui correspond à des vibrations de 394 trillions par seconde, jusqu'au violet extrême, 738 trillions, soit des longueurs d'onde de 0,8 à 0,36 μ (fig. 356).

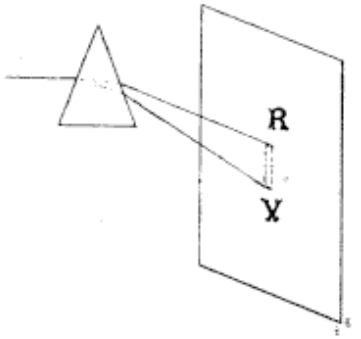


FIG. 355.

Au-delà, s'étend toute une bande de radiations qui se manifestent par des actions chimiques telles que la décomposition des sels d'argent. Le nombre des vibrations y augmente encore.

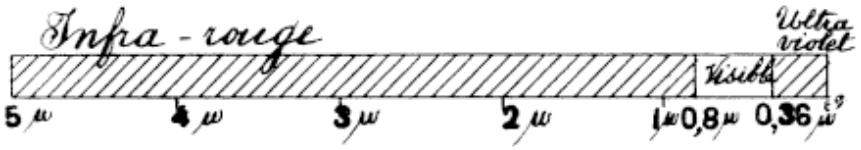


FIG. 356.

En résumé, par l'élévation graduelle de la température, des radiations caloriques de très grande longueur d'onde ou de très basse fréquence apparaissent d'abord, puis, à mesure que l'énergie dépensée croît, la fréquence devient de plus en plus élevée ou, ce qui revient au même, la longueur d'onde de la radiation devient de plus en plus courte, ce qui donne les radiations lumineuses, puis actiniques. En outre, la proportion de radiations visibles augmente avec la température.

Le développement des radiations lumineuses ne se fait donc pas sans un déchet notable d'énergie convertie en rayons ultra-violets, chimiques ou actiniques, en rayons X ou en rayons cathodiques et surtout en rayons calorifiques, et l'on appelle *rendement lumineux* d'une source, le rapport de la puissance qu'elle rayonne sous forme de radiations visibles, à celle qu'elle consomme.

Les vibrations perceptibles à l'œil sont exclusivement com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

prises entre les deux limites que nous venons d'indiquer. Au point de vue de l'éclairage, ce sont celles-là seules qu'il est intéressant de développer, à l'exclusion des autres, puisque ces dernières correspondent à de l'énergie inefficacement dépensée.

Les procédés d'éclairage les plus avantageux sont conséquemment ceux dans lesquels on dégage le moins de ces radiations accessoires. Or, c'est précisément une des caractéristiques de l'éclairage électrique. Par exemple, l'énergie dépensée pour produire la flamme d'une bougie de stéarine est d'environ 86 watts, tandis qu'une lumière équivalente sera produite au moyen d'un arc électrique en dépensant seulement 1/2 watt. Cependant l'utilisation reste très faible, même dans les cas de la mise à contribution de l'électricité puisque, d'après les expé-

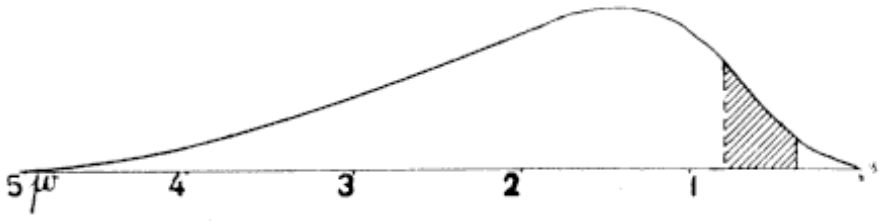


FIG. 357.

riences de Mendenhall, le rendement lumineux d'une lampe à incandescence ordinaire à l'éclat normal est d'environ 2,6 %. Voici, d'autre part (fig. 357), la distribution de l'énergie visible et invisible dans la lumière de l'arc électrique. Toute la partie non-hachurée représente l'énergie inutilisée d'après Langley. La partie hachurée, comprise entre les longueurs d'onde 0,36 et 0,8 μ est la seule utilisée dans l'éclairage.

Il est à remarquer, en outre, que la sensibilité de l'œil varie énormément avec la longueur d'ondes, et les diverses radiations simples sont, par suite, d'une utilité très différente. Les radiations se trouvant sur les confins du spectre visible, ne contribuent pour ainsi dire pas à la vision des objets qui les émettent.

Il faut donc faire intervenir, dans le rendement d'une source, chaque radiation simple pour la part avec laquelle elle contribue à la vision, c'est-à-dire en lui attribuant un coefficient égal à la sensibilité relative que l'œil a pour elle, ce coefficient étant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'unité pour la région de sensibilité maximum et égal à zéro pour les radiations infra-rouges et ultra-violettes.

D'après certaines expériences, il semble qu'à toutes les températures, les corps émettent des radiations comprenant l'étendue complète du spectre. Leur faible amplitude empêche seule de les apercevoir, de sorte qu'il n'existerait pas d'obscurité pour un œil suffisamment sensible. La température agirait surtout en augmentant l'amplitude des ondes émises, ce qui les rendrait visibles.

En séparant à l'aide d'un prisme, les radiations visibles des radiations invisibles et en mesurant l'énergie que représentent les premières, M. Drysdale (1) a trouvé 0,12 w pour la radiation émise par la bougie, en partant de la lumière blanche du filament Nernst et 0,08 w avec la lampe à arc. Il en a conclu que la source *idéale* de lumière blanche doit donner environ 10 bougies par watt et une source monochromatique (jaune-vert) environ 17 bougies par watt.

Qualités des corps à utiliser. — Les corps qu'il est possible d'utiliser devront avoir un point de fusion très éloigné de l'incandescence blanche; garder une grande résistance mécanique aux hautes températures; présenter une résistance électrique élevée, de manière à développer un grand effet Joule spécifique; posséder un pouvoir émissif considérable. On les façonne généralement sous forme d'un cylindre long et mince, recourbé en ovale, en boucle ou en spirale.

Lampes au carbone. — Le carbone a été le plus employé jusqu'ici. Il est très difficilement fusible, peu conducteur, solide; son pouvoir émissif est bon quand sa surface est polie; mais il présente l'inconvénient de brûler à l'air libre, aussi y a-t-il lieu de l'enfermer dans une ampoule privée d'air. Celle-ci se monte sur un culot métallique composé de deux pièces isolées C_1, C_2

(1) Electricien du 2 mai 1908, p. 288.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 358), avec lesquelles les deux bouts du filament sont mis en rapport et qui permettent son insertion dans le circuit.

Fabrication des lampes. — La fabrication des lampes comporte les opérations suivantes : 1° le façonnage et la carburation du filament; 2° son montage dans l'ampoule; 3° l'extraction de l'air; 4° l'étalonnage; 5° le montage de la lampe sur son culot.

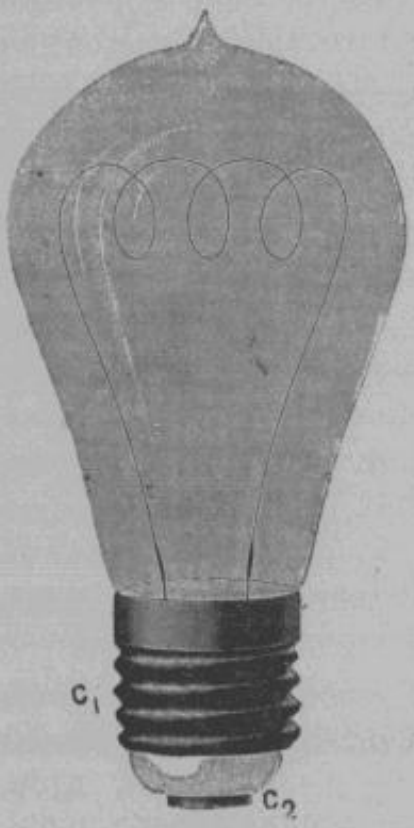


Fig. 358.

1° Façonnage du filament. — On dissout à chaud de la cellulose pure, papier filtre ou coton, dans une solution de chlorure de zinc. La masse pâteuse, mais fluide que l'on obtient, est passée au travers d'une filière en platine, immergée dans l'alcool de bois. Le jet de cellulose liquide se solidifie au contact de l'alcool et prend l'aspect d'un fil blanc. Au sortir de l'alcool on lave pour éliminer le chlorure de zinc, on essuie, puis on sèche sur une calandre. Le filament est ensuite sectionné en morceaux de la longueur voulue. Pour en opérer la carbonisation, on les enroule sur des gabarits en charbon, qui leur donnent les diverses formes requises (simple, double ou triple boucle, fer à cheval, etc.); on enferme ces gabarits dans des creusets en terre réfractaire et les interstices sont bourrés de poussier de charbon pour empêcher l'accès de l'air. Un couvercle, également en terre réfractaire, est ensuite luté sur chacun des creusets, que l'on porte dans un four chauffé à blanc (1500°), où ils séjournent 12 à 36 heures. Les filaments de cellulose sont alors transformés en carbone. On les sépare des gabarits, et on mesure au micromètre leur diamètre qui varie entre trois et cinquante centièmes de millimètre environ.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'opération de la carburation, encore appelée *renforcement* ou *nourrissage*, a pour but de rendre le filament plus homogène, en le revêtant d'une couche de carbone brillant, qui possède, en outre, un pouvoir émissif notablement plus grand que la surface terne primitive. A cet effet, le filament est plongé dans un hydrocarbure gazeux, puis porté à l'incandescence. L'hydrocarbure se décompose et son carbone se dépose à la surface du filament. Les sections les plus minces de celui-ci étant les plus résistantes, il s'y développe plus de chaleur, la précipitation y est plus active, d'où l'uniformisation de la section. On arrête l'opération quand le filament a atteint la résistance électrique voulue.

2° Montage dans l'ampoule. — Il faut maintenant le munir de deux conducteurs métalliques qui le soutiendront dans l'ampoule et permettront de lui envoyer le courant de l'extérieur.

Ces conducteurs doivent traverser le verre, ce qui soulève une grosse difficulté provenant de la différence des coefficients de dilatation des deux matières, laquelle expose à des fêlures et à des rentrées d'air. Le platine seul, ayant un coefficient de dilatation très voisin de celui du verre, convient. Mais comme il coûte fort cher, il importe de le réduire au strict nécessaire ; aussi ne l'utilise-t-on que pour la traversée du cristal. On le prolonge, à l'extérieur de l'ampoule, par un fil de cuivre venant se souder au culot de la lampe et, à l'intérieur, par un fil de nickel tubé à son extrémité pour recevoir la branche correspondante du filament. Les trois métaux : cuivre, platine et nickel, soudés dans cet ordre les uns aux autres, sont introduits par paires dans de petits tubes en cristal dont on évase une des extrémités au chalumeau, tandis que l'on fond l'autre pour la pincer autour des deux parties en platine. Le filament est monté en introduisant chacune de ses branches dans la partie tubée correspondante des conducteurs ; on le soude à l'aide d'une pâte spéciale à base de goudron, puis les attaches sont séchées à l'étuve. Il n'y a plus qu'à introduire le filament et son support dans l'ampoule, à l'y souder et à munir cette dernière, à l'extrémité opposée à la soudure, d'un tube par lequel se fait le vide.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° Extraction de l'air. — L'extraction de l'air s'effectue en général à l'aide de pompes à mercure du type de la pompe Sprengel, et parfois en mettant en œuvre des moyens chimiques (procédé Magliani). Pour reconnaître si le vide est parfait, on reproduit avec l'ampoule l'expérience des tubes de Geissler. A cet effet, on la met en communication avec les pôles d'une bobine de Ruhmkorff; si le vide est bon, il n'y a pas d'effluve; le contraire a lieu si l'ampoule contient des traces d'air.

4° Étalonnage. — Les lampes, reconnues bonnes, sont soumises a divers essais de contrôle, puis étalonnées une à une au photomètre.

5° Montage sur le culot. — Enfin, on lute au plâtre le culot sur le col de l'ampoule et on soude les deux bouts de cuivre sur les pôles du culot. La tendance actuelle est de supprimer le plâtre, qui donne lieu à des dérivations dans les locaux humides.

Suppression du platine. — Dans ces dernières années, on a cherché à supprimer complètement l'emploi du platine. On a utilisé, avec succès paraît-il, des aciers au nickel ayant le même coefficient de dilatation que le verre et des rubans en cuivre ayant moins d'o,1 mm d'épaisseur, lesquels, sous cette minceur resteraient parfaitement adhérents au verre.

Divers modes d'attache des lampes. — Indépendamment des formes du filament et de l'ampoule, et du voltage spécial pour lequel elles sont calibrées, les lampes à incandescence se différencient par le mode d'attache de leur culot dans le support en cuivre ou laiton, dénommé *socket*.

Lampe Edison. — Le culot Edison (fig. 358) est un des plus employés. Il se visse dans un socket présentant en creux la même forme et déjà étudié à propos des fusibles.

Lampe Swan. — Dans la lampe Swan (fig. 359), les électrodes métalliques extérieures de l'ampoule, recourbées en œillets, viennent s'attacher à deux crochets. Les contacts sont assurés par un ressort à boudin qui tend à écarter l'ampoule de son support.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fermeture a bayonnette (fig. 360 et 361). — Le culot porte diamétralement deux goupilles que l'on engage dans les rainures du socket. Lorsque les goupilles sont arrivées à fond de course, on fait effectuer au culot une certaine rotation, de manière à caler les goupilles dans les retours des bayonnettes. Les fils métalliques continuant le filament, se rattachent à deux électrodes sur lesquelles viennent presser avec force deux ressorts en rapport avec les conducteurs de la canalisation lorsque le culot est fixé dans le socket.

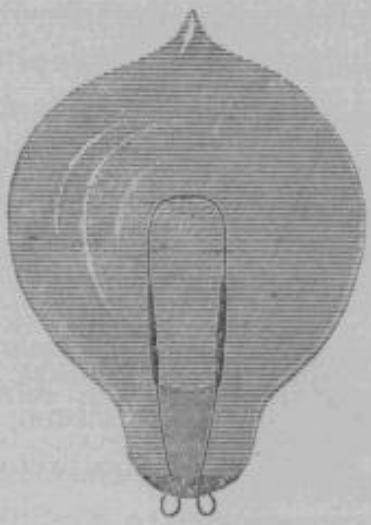


Fig. 359.

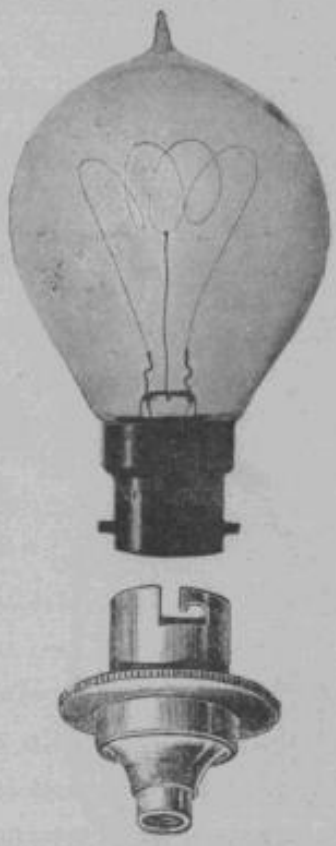


Fig. 360 et 361.

Lampe portative. — Les lampes portatives se montent sur un fil souple dont les conducteurs sont fixés à des fiches (fig. 362), fendues longitudinalement pour les rendre plus élastiques ; on les insère dans les cylindres métalliques creux d'une *prise de courant* rattachée, d'autre part, aux conducteurs d'alimentation.

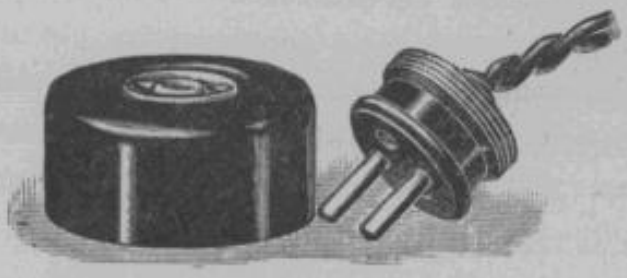


Fig. 362.

La lampe elle-même se fixe dans une monture spéciale à poignée (fig. 363) et, quand elle doit être manipulée plus ou moins brutalement, elle est protégée par un grillage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lampe hermétique. — Si la lampe doit être installée dans un endroit humide ou contenant des vapeurs pouvant attaquer ses parties métalliques, on la fixe dans une monture en porcelaine (fig. 364) hermétiquement fermée par un globe épais de verre.

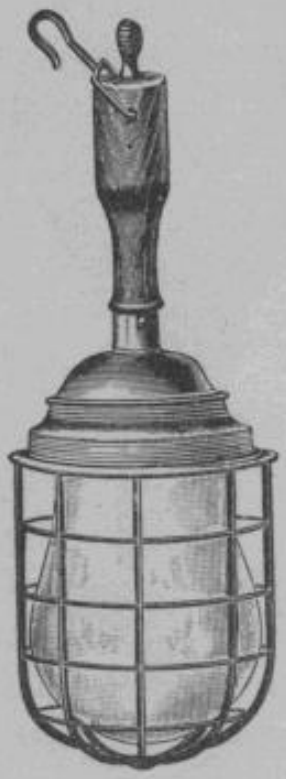


Fig. 363.



Fig. 364.

Intensités lumineuses et voltages. — On trouve des lampes à incandescence de toutes dimensions, dont l'intensité lumineuse varie d'une faible fraction de bougie (usages médicaux, exploration des cavités internes) à 100 bougies décimales et davantage. Les plus usuelles donnent 5, 10, 16, 25, 32, 50 bougies. Les voltages pour lesquels on les calibre peuvent être quelconques : depuis 1 et 2 volts jusqu'à 250. Les tensions usuelles sont 100, 110 et, depuis quelques années, 220 et 250 volts.

Dimensions des filaments. — Pour produire un effet lumineux déterminé, il faut dépenser un certain quantum de puissance électrique, abstraction faite de la variation des pertes pouvant provenir de la nature du régime. Or la puissance électrique dépensée par effet Joule dans un filament de longueur l, section s et résistivité ρ a pour valeur

$$\frac{e^2}{r} = \frac{e^2}{\rho\, l/s}.$$

Cette expression montre que le rapport de la longueur à la section du filament doit augmenter proportionnellement au carré de la différence de potentiel appliquée. Si le voltage double, la longueur du filament doit devenir quatre fois plus grande, à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

égalité de section et en supposant ρ invariable. Au fur et à mesure que le voltage appliqué à la lampe s'élève, le filament devient donc plus long, plus mince pour réduire la longueur et il est alors nécessaire de le supporter spécialement. La figure 210 en montre un exemple. Pour les voltages de 220 à 250 volts, on place souvent deux filaments en tension. Dans les lampes de tramways, où il faut aussi parer à l'effet destructif des vibrations, le filament s'attache par une ou deux pattes en verre au sommet de l'ampoule.

Variation de la consommation spécifique avec le voltage normal et l'intensité lumineuse.— Il est évident que plus un filament devient mince, plus il se trouve dans de bonnes conditions pour rayonner sa chaleur, et plus il faudra majorer la puissance qu'on y dépense, pour le maintenir à une température déterminée. Par conséquent plus le voltage est élevé, plus la consommation spécifique doit être grande. C'est ce que l'on constate en effet. Alors que la consommation des lampes ordinaires de 16 bougies atteint 3,6 watts par bougie sous 200 volts, elle s'abaisse à 2 watts par bougie sous 30 volts.

Pour le même motif, à égalité de voltage, les lampes de faible intensité lumineuse consomment proportionnellement plus que les autres. La température atteinte par le filament est de 1600° à 1800°; il commence à émettre des rayons lumineux à partir de 594°.

Variation de la consommation spécifique avec l'âge de la lampe. — Par l'usage, la surface du filament devient poreuse. En admettant que la puissance électrique dépensée reste la même, le filament devient moins chaud, puisqu'il se refroidit plus que si sa surface était restée unie. Il émet donc un flux lumineux moindre, sa teinte est moins blanche et son rendement lumineux inférieur. D'autre part, la désagrégation du filament augmente sa résistance et l'énergie électrique dépensée devenant moindre, la température diminue. Enfin, le carbone évaporé se condense sur la surface interne de l'ampoule et intercepte notablement le flux lumineux, d'où troisième cause de baisse du rendement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On estime qu'une lampe électrique doit être remplacée quand sa puissance lumineuse est tombée de 20°.

Fonctionnement à voltage réduit. — Une lampe ordinaire à filament de carbone commence à devenir lumineuse pour une tension d'environ 20 °/₀ de la tension normale de fonctionnement.

Fonctionnement à haut voltage. — En dépassant le voltage normal d'une lampe, on améliore le rendement, mais on est bientôt arrêté par un phénomène imprévu. Les substances réfractaires (comme le carbone), portées à l'incandescence par le passage d'un courant électrique, émettent en effet des ions en plus ou moins grande quantité. Ces projections d'ions amènent la désagrégation du filament, provoquent le noircissement de l'ampoule et réduisent, pour ces deux causes, la vie utile de la lampe. On est donc conduit à faire un compromis entre l'amélioration du rendement et la prolongation de la durée des lampes, et le régime le plus avantageux dépendra évidemment du rapport entre le prix de la lampe et celui de sa consommation horaire.

Le tableau suivant, qui se rapporte à une lampe de 16 bougies sous 110 volts, montre l'accroissement rapide de l'intensité lumineuse avec le nombre de watts dépensés.

V	91,6	98	104,2	107,5	113,7	120	132,7	144,7
A	0,415	0,447	0,479	0,495	0,527	0,561	0,63	0,702
Bougies.	4,8	7,4	11,1	13,2	18,7	23,5	45	72
Watts par bougie.	7,9	5,92	4,5	4,03	3,2	2,65	1,85	1,46

Tension de rupture. — Si l'on élève encore la tension, le filament se brise. M. Bainville (1) a déterminé expérimentalement la tension de rupture de diverses lampes à incandescence à filament de carbone établies pour la tension normale de 110 volts. Il a trouvé les nombres suivants :

Intensité lumineuse normale à 110 volts en bougies décimales.	5	10	16
Tension de rupture en volts.	225	250	300

(1) *Société internationale des Électriciens*, 3 mai 1905.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fonctionnement sous courant alternatif. — La durée de fonctionnement d'une lampe à filament de carbone est plus longue quand cette lampe est alimentée au moyen de courant alternatif qu'avec du courant continu, ce qui s'explique par ce que nous avons dit ci-dessus.

Coût de l'éclairage par incandescence au carbone. — Les lampes de 16 bougies 110 v coûtent, prises en gros, environ 0,55 fr. On en distingue deux espèces : celles dites de *longue durée* consommant 3,5 watts par bougie en moyenne et durant 800 heures; celles dites de *faible consommation*, n'exigeant que 2,5 watts en moyenne par bougie, dont la durée peut être évaluée à 400 heures environ. Pour celles-ci la température du filament dépasse 1600°. Il est à remarquer qu'avec le courant alternatif, les durées sont beaucoup plus longues comme nous l'avons déjà fait remarquer, l'évaporation cathodique étant alors reportée également sur les deux électrodes.

On peut aisément se rendre compte qu'il est toujours avantageux d'utiliser les lampes *poussées* ou à faible consommation spécifique.

Le coût d'une heure d'éclairage avec celles-ci ressort en effet à

$$P = \frac{0,55}{400} + \frac{16 \cdot 2,5}{100} p = 0,001\,375 + 0,4\,p$$

p étant le prix de l'hectowatt-heure.

Le coût d'une heure d'éclairage avec la lampe de longue durée revient à

$$P' = \frac{0,55}{800} + \frac{16 \cdot 3,5}{100} p = 0,000\,688 + 0,56\,p.$$

La différence $P' - P = 0,16\,p - 0,000\,687$ sera positive, c'est-à-dire que les lampes de longue durée seront plus coûteuses que les autres, tant que $0,16\,p - 0,000\,687 > 0$ ou $p > 0,0043$ fr, et, avec les coefficients admis ci-dessus, le coût de l'éclairage sera le même pour les deux catégories de lampes, quand $p = 0,0043$ fr ou que le kwh vaut 0,043 f.

Ce prix est tellement bas qu'on ne l'atteint jamais dans les distributions urbaines où le kilowatt-heure se vend à environ

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

0,20 f dans les conditions les plus économiques. On peut donc dire qu'il existe toujours un grand intérêt à utiliser des lampes de faible consommation spécifique.

Remarque. En Suisse, Autriche et Allemagne les lampes à incandescence sont classées en trois catégories A, B, C, pour lesquelles la durée effective et utile, limitée à 0,8 de la valeur initiale, doit être respectivement de 300, 600 et 800 heures. En Angleterre les deux durées mentionnées dans notre calcul sont prévues : 400 et 800 h.

Lampes aux oxydes alcalino-terreux. — Lampe Nernst. — M. Nernst est arrivé à une consommation de 1,8 watt pour les lampes de 16 bougies, à 1,5 pour celles de 160 bougies et au-dessus, en employant des oxydes de zirconium, de thorium, d'erbium, d'yttrium et de cérium mélangés par trois. Ces corps n'étant sensiblement conducteurs que vers la température de 600°, il faut les chauffer préalablement, d'où nécessité d'un allumage spécial, obtenu soit à la main, soit automatiquement au moyen d'une spirale de platine, éliminée ensuite du circuit. En outre, il faut prévenir l'effet de la variation de résistance du filament avec la température.

La lampe Nernst comporte donc : le filament, le radiateur ou échauffeur avec son interrupteur et le régulateur.

Le *filament* est étiré à la presse, suivant la forme d'un bâtonnet ou d'un petit cylindre creux, ayant tout-à-fait l'aspect de la porcelaine.

Le *radiateur* sert à chauffer le filament jusqu'à 700° environ, température à laquelle il devient assez conducteur pour admettre le courant. Il se compose d'un fil de platine noyé dans un cylindre en pâte réfractaire. Le tout est roulé en spirale autour du filament qui s'échauffe par rayonnement. Le diamètre de la spirale est toutefois suffisamment grand et les spires assez écartées, pour que la lumière émise par le filament ne soit pas *sensiblement interceptée*. Le radiateur n'agit qu'à l'allumage de la lampe; l'*interrupteur* coupe automatiquement son circuit, dès que la conductibilité du filament est suffisante.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le *régulateur* prévient l'augmentation indéfinie de température et maintient cette température à la valeur convenable. Il est indispensable pour prévenir la combustion du filament et des variations d'intensité lumineuse inadmissibles avec le voltage. Il est constitué par un fil de fer très fin, de 25 à 80 ohms, contenu dans une petite ampoule remplie de gaz inerte (hydrogène ayant pour objet de favoriser le refroidissement) et monté en série avec le filament. La conductance du fil métallique suivant une loi inverse de celle qui régit le filament, si les diamètres, les dimensions et la pression du gaz inerte remplissant l'ampoule du régulateur sont bien choisis, la résistance de l'ensemble du filament et de son régulateur, reste sensiblement constante. La température atteinte par le bâtonnet est de 2325°, son rendement lumineux = 4,17 %.

Les lampes Nernst (fig. 366) se montent dans une ampoule ouverte à la partie supérieure, non seulement pour protéger le filament contre les chocs, mais aussi pour le mettre à l'abri des courants d'air pouvant l'éteindre par abaissement de sa température.

Les organes sont disposés comme suit : B_1 B_2 (fig. 365), bornes d'amenée du courant, E électroaimant dont l'armature formant interrupteur, ferme en I le circuit de la spirale de chauffage S ; R résistance compensatrice ; F bâtonnet incandescent.

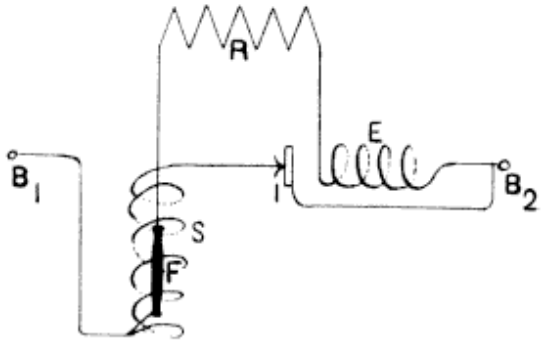


Fig. 365.

Quand le courant est admis dans la lampe, il ne passe d'abord que dans le circuit de chauffage. Dès que la résistance du bâtonnet est tombée à une valeur suffisante, l'électroaimant attire son armature et le circuit de chauffage est coupé.

La lampe de 25 bougies sous 110 v possède un seul bâtonnet de 0,64 mm de diamètre et de 16 mm de longueur. Elle absorbe un courant de 0,427 A.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La lampe de 500 bougies sous 220 v présente 6 bâtonnets en quantité, de 0,64 mm de diamètre et de 30 mm de longueur.

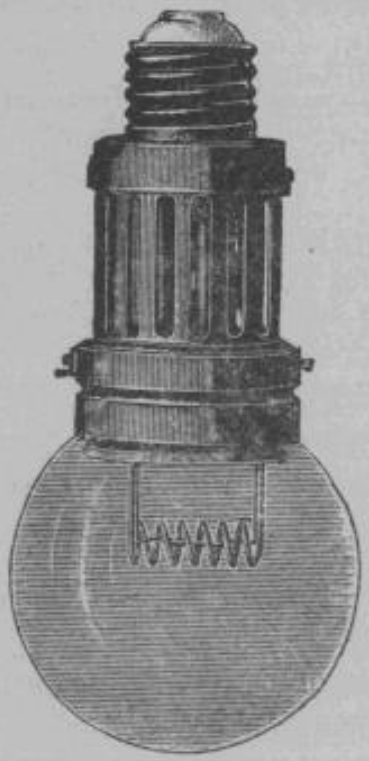


Fig. 366.

La durée moyenne de la lampe Nernst est de 400 à 700 h, mais le brûleur, composé du filament et de la spirale de chauffage, est indépendant du reste de la lampe et doit seul être remplacé. La consommation spécifique augmente avec le temps, de manière qu'après 50 ou 60 h elle n'est guère plus économique que les lampes au carbone. Elle a l'avantage de fournir une lumière blanche, ne dénaturant pas les couleurs. Par contre, un grand inconvénient réside dans la lenteur de son allumage qui exige 40″ environ. On a essayé de le pallier de diverses manières, sans être arrivé à des résultats satisfaisants. C'est ce qui explique l'échec industriel de cette lampe.

Lampes à filament métallique. — On fabrique depuis quelques années des lampes à filaments métalliques qui, pouvant être portés à plus haute température que les filaments de carbone, et étant doués de propriétés émissives plus prononcées, exigent une dépense beaucoup moindre d'énergie pour obtenir un effet utile déterminé. En outre, ils sont moins sensibles aux variations de voltage, la résistance des métaux croissant avec la température.

Ce qui les caractérise, c'est la très grande longueur des filaments très ténus, 0,02 à 0,03 mm de diamètre, due à la meilleure conductance des métaux. Cette grande longueur, qui atteint 0,70 m et au-delà, a exigé l'étude de supports spéciaux permettant de la développer complètement sous un faible volume.

Bien que ces lampes coûtent beaucoup plus cher que celles au carbone et que leur vie soit souvent moindre en raison de leur très grande fragilité, elles restent néanmoins plus économiques, ainsi qu'il est aisé de le calculer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Admettons que la lampe au carbone de 16 bougies coûte 0,55 f, qu'elle consomme 3 w par bougie et que l'hectowatt-heure soit facturé à 0,05 f; si P est le prix d'une lampe à filament métallique de 16 bougies consommant b watts par bougie, l'excédent de son prix d'achat sera regagné après un nombre d'heures

$$H = \frac{P - 0{,}55}{0{,}16\,(3 - b)\,0{,}05}. \qquad (1)$$

Pour comparer les diverses lampes entre elles, le plus simple est de déterminer le coût de la bougie-heure ou, éventuellement, de la lampe-heure de 16 bougies, ainsi que nous l'avons fait précédemment.

Lampe Auer. — En employant un filament d'osmium, qui ne fond qu'à 2500° environ, le docteur Auer a pu produire la bougie décimale en dépensant 1,5 watt au début.

La lumière obtenue est fort belle, d'un blanc doré, la durée 1000 heures environ et le pouvoir lumineux baisserait peu avec le temps.

Le filament d'osmium, porté à l'incandescence, ne possède plus aucune rigidité. La lampe Auer doit donc être utilisée dans la position verticale avec son support en haut.

Si la lampe de 16 bougies coûte 2,5 francs, l'application de la formule (1) montre qu'à partir de 162 heures de fonctionnement, la lampe Auer devient plus économique que celle au carbone.

Lampe au tantale. — La maison Siemens fabrique une lampe au tantale, consommant également 1,5 w par bougie au début. La lumière en est aussi fort belle. Durée 1000 à 1500 h. L'intensité lumineuse baisse de 20 % en 400 à 600 h. Le tantale, qui fond vers 2275°, est très conducteur; le filament doit donc posséder une grande longueur; aussi a-t-il été nécessaire de le disposer en zig-zag (fig. 367), entre deux rangées circulaires superposées de petits crochets d'attache isolants, supportés par une tige en verre, terminée haut et bas par deux lentilles de même substance, dans lesquelles les crochets sont implantés. Lorsque le filament casse, si les bouts viennent en contact ils se soudent et la lampe continue à fonctionner.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'application de la formule (1) montre qu'au prix de 2,25 f, l'excédent de coût sur les lampes au carbone est regagné après 141 h seulement.

Les lampes au tantale, alimentées par un courant alternatif, ont une vie beaucoup plus courte que lorsqu'elles sont alimentées en courant continu, fait dû sans doute aux vibrations pro-

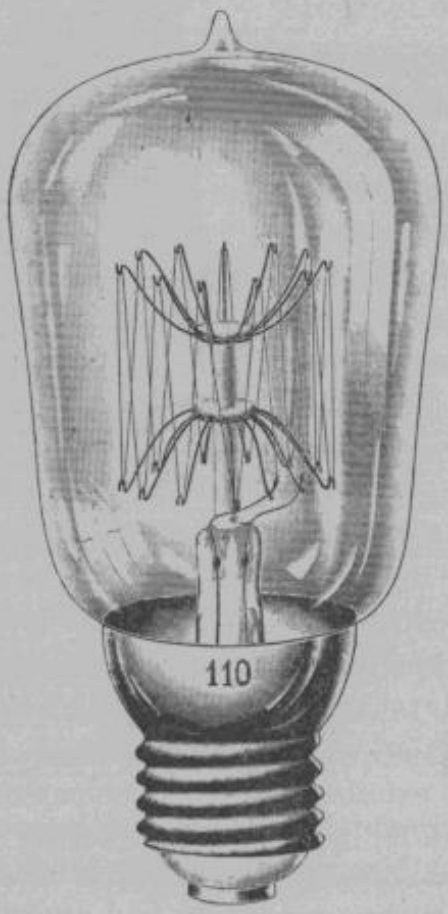


Fig. 367.

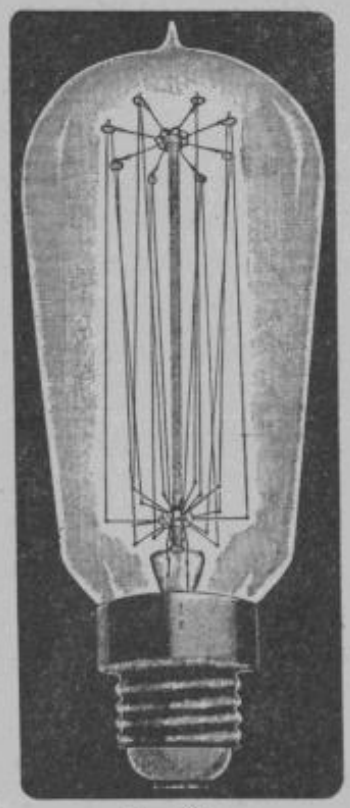


Fig. 368.

voquées par les réactions électromagnétiques existant entre les tronçons de fil voisins. A la fréquence 60, leur durée n'est guère que de 308 h.

Lampes Wolfram, Osram.— Elles sont : la première au wolfram, la seconde au tungstène. Consommation environ 1,15 watt par bougie au début (fig. 368), durée moyenne 1000 heures, très faible diminution du pouvoir éclairant avec l'âge.

L'équation (1) montre, qu'au prix de 2,50 f pour la lampe de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

16 bougies, il commence à y avoir bénéfice à partir de 131 heures environ.

Lampes diverses. — On fabrique aujourd'hui des lampes à filament de zirconium, d'iridium,... dont la consommation descend, en général, à 1,15 watt environ par bougie. D'après M. Blondel (1), c'est le tungstène qui présenterait les propriétés les plus avantageuses pour la fabrication et le meilleur rendement lumineux.

Consommation spécifique des lampes à incandescence et variation de la puissance lumineuse avec le voltage. — On peut se rendre compte théoriquement des conditions de fonctionnement des lampes à incandescence.

L'intensité lumineuse horizontale en bougies peut, en effet, s'exprimer par

$$L_h = k\ (EI)^m$$

k étant un coefficient dépendant du filament. Or R étant la résistance du filament, $R = E/I$ d'où $EI = E^2/R$ et $L_h = k\ E^{2m}/R^m$.

Mais la résistance R d'un filament métallique varie elle-même en même temps que E. Et la loi de variation de R en fonction de E change avec la durée de la lampe; pour une même lampe, au bout de 200 h, la résistance, au même voltage, a augmenté considérablement avec les lampes au carbone et moins sensiblement avec celles à filament métallique.

De sorte que si l'on s'impose la détermination d'une formule plus simple, dans laquelle l'intensité lumineuse soit uniquement fonction du voltage, telle que

$$L = k\ E^n$$

il est évident, qu'au fur et à mesure que la lampe avancera en âge, les constantes k et n se modifieront d'elles-mêmes. D'autre part, pour des lampes de même nature et de même âge, les constantes k et n dépendent des régimes auxquels auront été soumises ces lampes.

---

(1) *Les Procédés modernes de l'Eclairage électrique*, Exposition de Marseille 1909, p. 374.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. Hirschauer (1) a trouvé par expérience les valeurs suivantes de k et n :

lampe au carbone. .	$L = 3{,}7 \times 10^{-12} \times e^{6{,}3}$
» Nernst . . .	$7{,}1 \times 10^{-2} \times e^{10}$
» à l'osmium. .	$7{,}5 \times 10^{-6} \times e^{4{,}2}$
» au tantale . .	$2{,}8 \times 10^{-8} \times e^{4{,}3}$
» Osram . . .	$3{,}4 \times 10^{-7} \times e^{4}$

La mesure était faite suivant la direction perpendiculaire à l'axe de la lampe, sauf pour la lampe Nernst où on l'effectuait suivant cet axe.

L'exposant n joue un rôle très important, au point de vue de l'effet produit par des variations de tension sur l'intensité lumineuse. Supposons que la tension subisse des variations de $p/2$ °/₀ au-dessus et en-dessous de la valeur normale ; les valeurs correspondantes de L seront

$$L_2 = k\,(1 + p/200)^n\, e^n$$

et

$$L_1 = k\,(1 - p/200)^n\, e^n.$$

En développant en série et négligeant les termes à partir de ceux en p^2, on trouve

$$L_2 - L_1 = 2\,n\,\frac{p}{200}\,k\,e^n = \frac{n\,p\,k\,e^n}{100}$$

qui montre nettement que la variation absolue de l'intensité lumineuse croît rapidement avec la tension pour une lampe donnée.

Quant à la variation relative, elle est donnée en °/₀ par l'égalité

$$100\,\frac{L_2 - L_1}{L} = np.$$

On voit que la variation relative de l'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence ne dépend que de l'exposant n et de la variation de tension relative p. Si l'on suppose par exemple

(1) *Influence des variations de tension sur l'intensité lumineuse des lampes à incandescence*. La lumière électrique du 21/3/08, p. 377.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$p=5$, on peut, d'après le tableau ci-dessus, déduire le suivant :

Lampe au carbone	. . .	31,5 °/₀
» Nernst	. . . .	50 °/₀
» à l'osmium	. . . .	21 °/₀
» au tantale.	. . .	21,5 °/₀
» Osram	. . . .	20 °/₀

montrant nettement la supériorité des lampes à filament métallique, au point de vue de la fixité de la lumière.

Mise en activité des lampes.— Les lampes à incandescence sont, en général, alimentées en dérivation et commandées individuellement au moyen d'un petit interrupteur dont la figure 369 montre une des nombreuses formes :

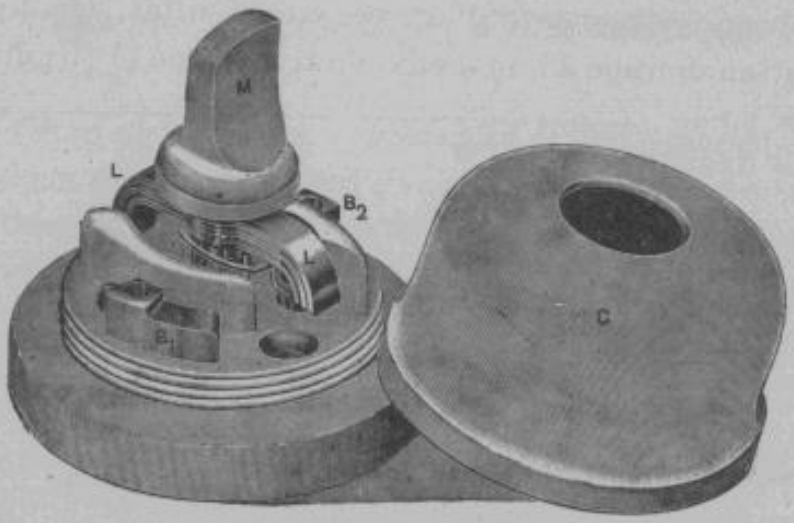


Fig. 369.

M manette, C couvercle, L L lames frottantes, B_1 B_2 blocs de contact.

L'interrupteur est souvent fixé dans le socket de la lampe (fig. 370, 371), poignée A.

Lorsque les lampes sont groupées, leur mise en activité peut donner lieu à quel-



Fig. 370.

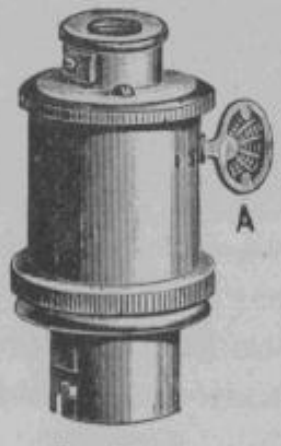


Fig. 371.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ques problèmes intéressants, que nous passerons rapidement en revue.

COMMANDE DE PLUSIEURS POINTS. — Il est souvent utile de pouvoir commander un groupe de lampes d'un ou de plusieurs points. Les figures 372 et 373 montrent deux types d'interrupteurs permettant d'arriver au résultat. Quelle que soit l'orientation donnée à l'un d'eux, l'autre coupe le circuit dans une de ses positions et le ferme dans l'autre.

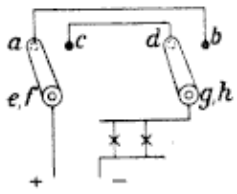


FIG. 372.

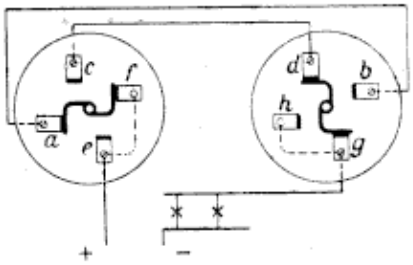
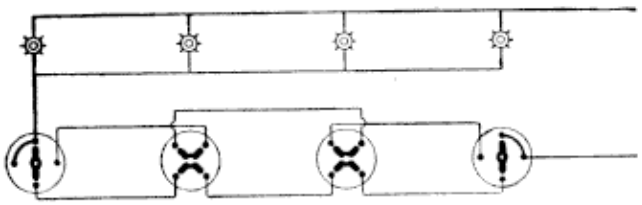


FIG. 373.

Si plus de deux commutateurs sont requis, les appareils intermédiaires satisfont au schéma (fig. 374); ce sont, somme toute, de simples inverseurs.


FIG. 374.

COMMANDE ALTERNATIVE DE DEUX GROUPES. — Pour commander un groupe ou un second groupe à volonté (fig. 375 et 376), la lame pivotante *ac* de l'interrupteur peut prendre quatre positions : dans la situation indiquée, le groupe supérieur de lampes est relié à la canalisation; vient une touche de repos ou morte où tous les circuits sont coupés; puis une touche *b* reliée au second groupe; enfin, une nouvelle touche isolée.

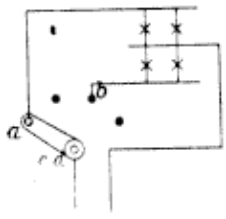


FIG. 375.

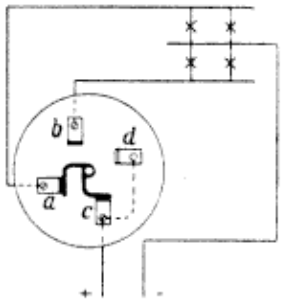


FIG. 376.

COMMANDE ALTERNATIVE ET SIMULTANÉE. — L'interrupteur représenté (fig. 377 et 378) allume le groupe inférieur des lampes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans la position indiquée ; il met en activité les deux groupes quand ses pièces mobiles touchent à la fois les plots *a* et *b* ; un plot plus loin, le groupe supérieur seul reste en activité, tandis que tout est éteint à la dernière touche.

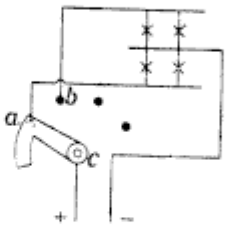


FIG. 377.

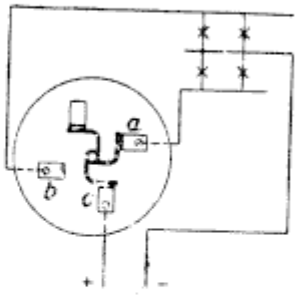


FIG. 378.

§ 2. — L'Arc voltaïque.

Arc au carbone.— Production de l'arc à courant continu.— Lorsque deux crayons de charbon, entre lesquels on peut maintenir une tension d'environ trente-cinq volts sont portés en contact, puis séparés à quelques millimètres l'un de l'autre, on constate que le courant passe par un pont de vapeurs conductrices produites par l'électrode négative et engendrées par le passage du courant lui-même ; il existe un courant de vapeur qui se déplace avec une grande vitesse de l'électrode négative vers l'électrode positive. *Le spectre de l'arc est, en effet, celui du corps constituant l'électrode négative ;* il est indépendant de la nature du gaz compris entre les électrodes, ainsi que de la nature de l'électrode positive, excepté indirectement par l'effet de la vapeur éventuellement émise par cette dernière.

La production continue du courant de vapeur exige une dépense d'énergie, nécessaire pour échauffer l'électrode à la température d'ébullition, et pour produire la vitesse de déplacement. Cette énergie doit être fournie par le circuit électrique, sous forme d'une chute de tension entre les électrodes de l'arc.

La température du courant gazeux à une pression constante dans l'espace environnant, est constante et égale à la température de fusion du corps constituant l'électrode négative.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'après les théories modernes (1), la conductibilité résulte de la présence d'ions libres; il faut donc, pour établir un courant entre les deux électrodes, qu'il y ait production continue d'ions dans l'espace qui les sépare. Malgré le caractère apparent de l'arc au charbon, dans lequel le carbone se vaporise en grande quantité à la surface de l'anode et se dépose en partie à la pointe de la cathode, on doit attribuer le rôle essentiel à la projection d'électrons négatifs par la pointe de la cathode, et considérer seulement la vaporisation de l'anode comme un phénomène secondaire et non indispensable.

Grâce à la mobilité bien plus grande des ions négatifs, qui semblent être ici des électrons négatifs libres, dont la masse ne dépasse pas celle d'un atome, ces corpuscules, projetés du pôle cathodique, atteignent une vitesse plus considérable que les corpuscules plus lourds, venant de l'anode ; cet effet ne se voit pas dans les arcs industriels ordinaires, mais il apparaît avec une netteté surprenante dans les arcs de grande intensité entre charbons purs et surtout minéralisés ; par exemple, avec un arc d'une intensité égale ou supérieure à 80 ampères, on voit la flamme de l'anode minéralisée projetée dans le sens opposé à l'anode, par le jet cathodique de la cathode en charbon pur qui l'atteint directement. Ce jet est si fort, qu'il produit à l'extrémité de l'anode, un cratère taillé obliquement en sifflet quand la cathode est légèrement désaxée, et pousse la flamme à contre-sens, même si l'on place les deux charbons verticalement l'un au-dessus de l'autre avec l'anode en bas.

Avec les crayons placés verticalement, le charbon positif se trouvant au-dessus, on voit peu à peu se former au centre de ce dernier un *cratère* porté à l'incandescence, tandis que le charbon négatif inférieur, moins incandescent, se taille en pointe (fig. 379). Entre les deux, règne une atmosphère de vapeur de

(1) BLONDEL. *Les récents progrès des lampes à arc : les arcs à flamme.* Eclairage électrique des 15/6/07, p. 388. Voir aussi *Les Procédés modernes de l'Eclairage électrique.* Congrès de Marseille. T. I, p. 319. 1909.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

carbone de couleur violacée. La température du cratère est de 3500°, tandis que la pointe du charbon négatif n'atteint que 2 700°.

La lumière de l'arc, insoutenable à l'œil nu, se rapproche comme composition de la lumière solaire. Elle contient également les rayons ultra-violets favorisant les réactions chimiques ; son application prolongée provoque des insolations de la peau.



Fig. 379.

Les 85 % de la totalité de la lumière rayonnée sont émis par le cratère ; 10 % seulement émanent du crayon négatif et les 5 % restants de l'arc lui-même.

La forme du cratère est très favorable au point de vue de l'utilisation du flux lumineux qui se trouve ainsi renvoyé vers le bas. Il y a avantage de le dégager le plus possible ; aussi le crayon négatif est-il toujours de plus faible diamètre que le positif. L'augmentation de la masse du charbon positif, procure le second avantage de compenser son usure plus rapide.

Crayons a mèche. — On assure un bon centrage du cratère, en donnant au crayon positif une âme ou *mèche* de structure plus tendre, composée de 80 à 85 % de carbone, 10 % de silicates ou borates et 5 % d'eau. Les substances plus volatiles contenues dans la mèche, diminuent en outre la résistance et augmentent la fixité de l'arc.

Chute de potentiel dans l'arc. — D'après Mme Ayrton, la force électromotrice à appliquer aux crayons pour entretenir un arc de i ampères et de longueur l, est donnée par la relation suivante, dans laquelle a, b, c et d sont des constantes

$$e = a + bl + \frac{c + dl}{i}.$$

La même formule est applicable aux arcs entre métaux.

Le terme a paraît correspondre à une force contre-électromo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trice pendant longtemps admise, puis niée. Dans une longue suite d'expériences du plus haut intérêt, M. Duddel est arrivé à cette conclusion, qu'il existerait bien des forces électromotrices thermo-électriques dans l'arc, se composant de deux parties, chacune d'elles prenant naissance contre ou tout près des électrodes : celle de l'électrode positive, d'environ 17 volts, s'oppose au passage du courant; celle de l'électrode négative, d'environ 6 volts, favorise au contraire ce passage. Il resterait donc environ 11 volts, comme force contre-électromotrice résultante.

Le terme bl, qui contient la longueur de l'arc seul, appartient à la vapeur formant la colonne entre les charbons ; enfin celui qui contient le courant seul, provient des deux charbons [1].

Stabilité et rendement. — Pour être stable, l'arc doit avoir une certaine longueur, dépendant de l'intensité du courant, du diamètre des charbons et de la différence de potentiel appliquée. L'arc trop long devient sifflant et fugace. Chose qui paraît paradoxale au premier abord, et démontrée par Mme Ayrton au Congrès de Paris de 1900 [2], *les meilleurs résultats économiques sont obtenus avec des arcs le plus courts possible*. A courant constant on trouve, en écartant progressivement les charbons, un premier maximum d'intensité lumineuse pour la longueur de 1 millimètre environ, suivi d'un minimum, puis, pour un écart plus grand, entre 4 et 5 millimètres, un second maximum. Ces variations proviennent principalement de la forme que prend l'extrémité du charbon négatif obstruant plus ou moins le cratère et de l'absorption de la lumière qu'émet ce dernier, par les particules de carbone contenues dans l'arc. On s'explique d'ailleurs le meilleur rendement économique de l'arc court par ce fait que la puissance à dépenser dans l'arc même, pour l'allonger, est très grande, alors que la quantité de lumière qu'il fournit est minime.

---

(1) Blondel, *Eclairage électrique*, T. XXXVII, n° 49, p. 364.

(2) Mme Ayrton, *L'Intensité lumineuse de l'Arc à Courant continu*. (Rapport et procès-verbaux du Congrès d'électricité, p. 250.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le rendement de l'arc s'améliore avec la puissance, suivant une fonction linéaire de la forme $L = aP - b$, L étant l'intensité lumineuse sphérique, P la puissance dépensée, a et b des constantes.

La force électromotrice minimum qu'exige un arc continu est de 33 volts. On peut, sans rompre l'arc, interrompre son application pendant un temps appréciable, 1/10 de seconde environ. La durée de l'interruption peut être d'autant plus longue, que les charbons employés ont une âme plus riche en matières salines conductrices.

Arc alternatif. — Ici, les deux charbons se taillent semblablement. L'usure serait la même, n'était l'influence du courant ascensionnel d'air chaud. Les crayons sont égaux et tous deux à âme minéralisée, ce qui permet d'abaisser le voltage nécessaire à 30 volts et même moins.

L'identité des deux pointes change totalement la répartition du flux lumineux, qui est symétrique par rapport au plan horizontal médian. On est donc obligé, pour l'utiliser rationnellement, de le rejeter vers le bas au moyen de réflecteurs, ce qui ne se fait pas sans pertes.

D'autre part, le rendement lumineux de l'arc alternatif, comme l'ont constaté de nombreux expérimentateurs, et notamment MM. Blondel et Jigouzo, n'est guère que la moitié de celui à courant continu. En d'autres termes, il faut dépenser une puissance double, à effet lumineux égal. Il varie avec la forme de la courbe du courant, et est d'autant plus satisfaisant que cette forme est plus aplatie.

On explique ce mauvais rendement comme suit : l'effet Joule développé dans l'arc varie avec la résistance de la colonne de vapeur. Or celle-ci est d'autant moins résistante que la chaleur développée est plus grande. Il en résulte qu'au début de la période, la résistance étant très grande, l'intensité est fort faible, puis va en augmentant rapidement pour diminuer de même, et revenir à zéro, en même temps que la force électromotrice. La courbe des intensités n'est donc pas sinusoïdale

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(fig. 380), elle est considérablement réduite et dès lors la puissance de courant n'est plus égale au produit des valeurs efficaces de l'intensité et de la tension (valable seulement dans le cas des fonctions sinusoïdales), mais il s'introduit un facteur de puissance k plus petit que 1, tel que

$$p = k\, e_{\text{eff}}\, i_{\text{eff}}.$$

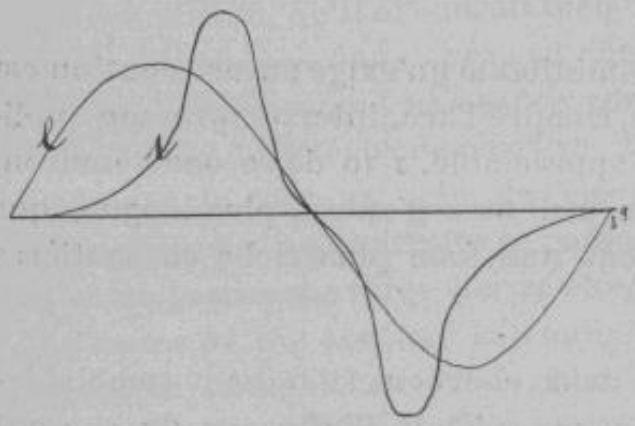


Fig. 380.

Les arcs alternatifs font entendre un bourdonnement désagréable, que l'on atténue en les enfermant dans des globes clos.

Arc enfermé. — L'arc qui se développe dans une atmosphère confinée, composée de gaz brûlés, présente des caractères très particuliers : le charbon positif supérieur est à peine creusé, parce que l'arc tourne constamment autour de son extrémité ; le charbon négatif inférieur est presque plan, leur distance normale atteint environ 8 millimètres, la force électromotrice appliquée s'élevant à 80 volts.

L'atmosphère confinée est obtenue au moyen d'un double globe dont l'intérieur, fermé par un obturateur de forme spéciale, laisse l'air se dilater sous l'action de la chaleur développée, tout en ne permettant qu'un échange très faible entre les atmosphères intérieure et extérieure. Le grand globe extérieur, souvent fermé par une soupape, constitue lui-même une seconde enceinte préservatrice qui se remplit des gaz brûlés dans le petit globe.

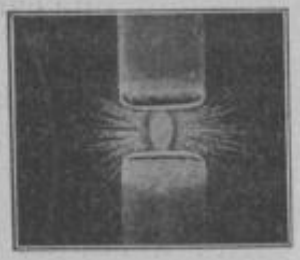


Fig. 381.

La combustion des charbons placés dans ces conditions se trouve extrêmement retardée, et le renouvellement des crayons ne doit se faire que toutes les 150 à 200 heures, suivant leur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

longueur, ce qui correspond à une usure horaire des charbons positifs comprise entre 1 et 1,3 mm et des charbons négatifs entre 0,2 à 0,5 mm, ensemble 1,2 à 1,8 mm. Mais la présence de deux globes augmente l'absorption, qu'accentue encore l'encrassement du globe intérieur, par suite d'un dépôt ocreux de silice chargée d'un peu d'oxyde de fer. La teinte de la lumière émise est bleue.

Fabrication et dimensions courantes des crayons. — On pulvérise du coke de cornue ou du coke de pétrole, que l'on mélange aussi intimement que possible avec un poids égal de goudron pur. On y ajoute certaines substances chimiques pour augmenter, soit la durée, soit la puissance lumineuse, ces deux facteurs s'excluant en général l'un l'autre. La pâte ainsi formée, réduite en poudre et purifiée est, après de nombreux malaxages, filée sous pression et découpée à longueur. Rassemblés en paquets, les crayons sont placés dans des creusets en terre et entourés de tous côtés de poudre de coke. On lute la partie supérieure des récipients réfractaires avec de l'argile et on les place dans des fours généralement chauffés au gaz et continus. L'application de la chaleur se fait progressivement jusqu'à atteindre 1 400 à 1 700°; la cuisson dure six à sept jours.

Après refroidissement, les crayons sont soumis à un travail mécanique de tournage et de polissage. On fore l'axe des positifs et l'on y introduit la mèche ; enfin, dans le but de réduire la résistance, on cuivre parfois certains charbons par la galvanoplastie.

Les diamètres courants des crayons positifs varient de 10 à 25 millimètres, ceux des négatifs conjugués étant respectivement de 6 à 18 millimètres. L'usure horaire s'élève à 18 ou 20 millimètres pour chacun d'eux et les intensités des courants sont de 4 à 50 A, correspondant à une section de 20 à 35 mm^2 par ampère pour les charbons positifs et 7 à 15 mm^2 pour les négatifs. Quand il faut obtenir des arcs très puissants, on emploie des faisceaux de crayons ou des charbons cannelés.

La résistivité moyenne des charbons à lumière est de 8 000 microhms-centimètres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Classification des lampes à arc. — Les lampes à arc se divisent en deux catégories, d'après la manière dont les charbons sont ramenés à la distance voulue malgré leur usure : les *lampes à régulateur*, dans lesquelles un mécanisme est chargé de déplacer un crayon ou tous les deux, suivant nécessité ; les *bougies*, dans lesquelles l'écartement des crayons reste invariable.

Conditions à remplir par les régulateurs. — 1° Il faut que les charbons, d'abord en contact ou amenés en contact, soient ensuite écartés à la distance convenable ; 2° ils doivent être rapprochés au fur et à mesure de leur usure, de manière à compenser celle-ci. Le régulateur sera d'autant meilleur que les rapprochements successifs seront plus petits.

La puissance lumineuse, émise par un foyer donné, a pour exacte contre-partie l'énergie électrique qu'il consomme. En rendant celle-ci constante, l'autre le sera aussi. Comme, ainsi que nous l'avons vu, la différence de potentiel à entretenir aux bornes d'un arc de longueur donnée, est une fonction linéaire de l'intensité, il suffira, pour assurer cette constance, de rendre invariable soit l'intensité, soit la tension, soit le rapport des deux, c'est-à-dire la résistance apparente de l'arc. Dans ce dernier cas, c'est la machine génératrice qui, travaillant sur un ou des circuits de résistance constante, fournira la puissance constante que se partageront les divers régulateurs.

Régulateurs à courant constant. — Un solénoïde S (fig. 382), est monté en série avec l'arc A. Une double poulie R reçoit les cordelettes suspendant, d'une part, le charbon supérieur et sa monture, dont le poids prédomine, et, d'autre part, le noyau du solénoïde. La forme de ce dernier est telle, qu'à intensité constante, l'attraction qu'il subit de la part du solénoïde reste sensiblement la même quelle que soit sa position. Le charbon inférieur reste fixe.

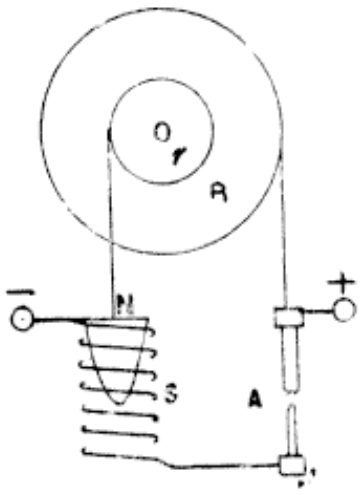


FIG. 382.

A l'état de repos, le charbon supérieur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vient en contact avec l'inférieur. Dès qu'on admet le courant dans l'appareil, le solénoïde aspire le noyau N ; le charbon supérieur s'écarte vers le haut ; l'arc jaillit. Le déplacement s'effectue jusqu'au point où le moment du poids P, du charbon supérieur et de sa monture, par rapport à l'axe O de rotation, est équilibré par le moment, relativement au même axe, du poids p du noyau auquel s'ajoute la force attractive f du solénoïde. L'équilibre est obtenu quand

$$PR = (p + f)\, r, \text{ ou } f = \frac{PR - pr}{r} \qquad (1)$$

r et R étant les rayons d'enroulement des deux poulies.

Cette équation montre qu'une valeur de f et *une seule* satisfait au problème. Si la valeur de f devient plus faible que celle donnant l'équilibre, le terme PR prend une valeur prépondérante, c'est-à-dire que le porte-charbon supérieur s'abaisse, raccourcissant l'arc et vice-versa.

D'autre part, l'expression générale de f est kni, n étant le nombre de spires du solénoïde traversé par le courant i, k un coefficient numérique.

D'après ce que nous venons de dire, il n'existera qu'une valeur particulière i_1 de i fournissant l'équilibre et telle que

$$k\, n\, i_1 = \frac{PR - p\, r}{r}. \qquad (2)$$

Le charbon s'usant l'arc s'allonge, l'intensité du courant diminue, l'équation (2) n'est plus satisfaite et les charbons se rapprochent jusqu'à ce qu'elle le soit de nouveau.

L'équation de ces régulateurs est donc $i = i_1 = c^{te}$.

Grâce à la multiplication de la course, due au rapport des rayons r et R, à un faible déplacement du noyau correspond une grande course du charbon.

Système a déclic. — Dans certains appareils, le mouvement du porte-charbon supérieur est enrayé par un mécanisme formant frein. En appelant f_1 l'effort ou l'attraction qui doit être exercée par le solénoïde pour bloquer le charbon supérieur, celui-ci ne sera libéré que lorsque l'effort deviendra moindre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que f_1 pour y être ramené immédiatement par le déplacement de l'armature mobile. On a donc $f_1 = k\,n\,i_1 = c^{te}$ ou $i_1 = c^{te}$ comme précédemment.

L'action du dispositif n'est pas continue; les déplacements se font par à-coups; le réglage est moins sûr.

Régulateurs à tension constante. — Dans le régulateur à tension constante, le rappel de l'usure est effectué par un solénoïde monté en dérivation sur les crayons (fig. 383). Le moment du noyau a ici une action prépondérante, de sorte que les charbons sont écartés au repos.

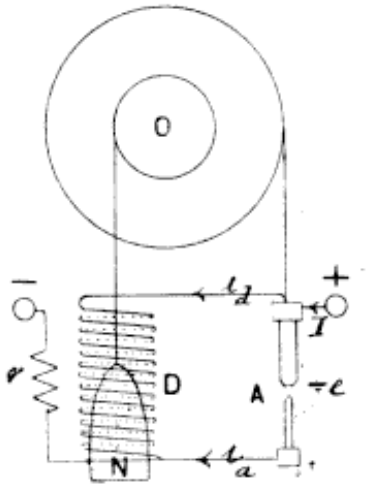


FIG. 383.

S'il n'y avait que les organes charbons et électro dans le circuit contenant la lampe, elle ne pourrait fonctionner. En effet, le solénoïde directement raccordé aux conducteurs d'alimentation maintenus sous une différence de potentiel constante, se trouverait traversé par un courant constant. Son attraction resterait constante et, après avoir été allumé, l'arc s'allongerait jusqu'à extinction.

Pour faire répercuter sur le solénoïde les variations de l'intensité du courant traversant l'arc, et par suite régler la longueur de ce dernier, il suffit de monter en série avec la lampe une résistance r, dite *additionnelle* ou de *stabilité*.

Appelons, en effet, d et a les résistances respectives du solénoïde et de l'arc avec ses charbons; I le courant total traversant r; i_d le courant dérivé dans le solénoïde; i_a celui traversant l'arc; E la différence de potentiel existant entre les conducteurs d'alimentation et e la force contre-électromotrice de l'arc.

Appliquée à l'un des points de bifurcation du courant, la première loi de Kirchhoff donne

$$I - i_d - i_a = 0.$$

La deuxième loi appliquée à la maille comprenant la résistance du solénoïde et l'arc permet d'écrire

$$a\,i_a - d\,i_d = -e.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin, la force électromotrice agissant sur le circuit constitué par les résistances dérivée et additionnelle a pour valeur

$$E = r\,I + d\,i_d.$$

Ces trois équations simultanées peuvent se mettre sous la forme symétrique

$$\begin{aligned} I - i_d - i_a &= o \\ o\,I - d\,i_d + a\,i_a &= -e \\ r\,I + d\,i_d + o\,i_a &= E \end{aligned}$$

d'où nous tirons pour la valeur du courant i_d traversant le solénoïde :

$$i_d = \frac{\begin{vmatrix} 1 & o & -1 \\ o & -e & +a \\ r & E & o \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ o & -d & +a \\ r & +d & o \end{vmatrix}} = \frac{-Ea - 1\,(+re)}{-ad - ar - rd} = \frac{Ea + re}{ad + ar + rd}$$

Il résulte de cette dernière équation que, lorsque la résistance a de l'arc augmente (par son allongement), l'intensité du courant traversant le solénoïde n'est plus invariable, comme en l'absence de résistance additionnelle.

Voyons quel est le sens de la variation. Pour cela différentions la valeur de l'intensité i_d par rapport à a.

Nous aurons : $d\,i_d = \dfrac{rd\,(E - e) - r^2\,e}{(rd + ad + ar)^2}\,da.$

Le numérateur et le dénominateur étant positifs, on voit que *quand la résistance de l'arc augmente, l'intensité du courant dérivé augmente aussi* ; le réglage est assuré.

Allumage et fonctionnement. — Dès qu'un courant traverse la lampe, le noyau est attiré, les charbons se rapprochent et arrivent en contact. Lorsque le contact se produit, le solénoïde mis en court-circuit n'est plus traversé que par un courant extrêmement faible ; son attraction décroît brusquement, les charbons s'écartent, l'arc s'établit et prend une longueur réglée par l'équilibre entre le moment du poids moteur pr et celui de l'attraction magnétique fr d'où $f = p$. La combustion allonge l'arc, sa résistance augmente, l'intensité du courant dérivé dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le solénoïde augmente comme nous venons de le voir, d'où plus grande attraction exercée sur le noyau et rapprochement des charbons, jusqu'à ce que le moment d'équilibre pour lequel la lampe est réglée soit atteint de nouveau.

En appelant n' le nombre de spires du solénoïde, u la différence de potentiel aux bornes de la lampe, k' une constante, on a :

$$f = k'n'i_d = p \quad \text{et, comme} \quad i_d = \frac{u}{d}, \quad \frac{k'n'u}{d} = p.$$

Les quantités p, k', n' et d étant constantes, il en résulte que l'équation précédente peut s'écrire $u = c^{te}$.

C'est la formule de ces régulateurs, d'où le nom de *régulateurs à tension constante* qui leur a été donné, parce qu'ils maintiennent constante la tension aux bornes de la lampe.

La résistance additionnelle a aussi pour but d'empêcher la production d'un court-circuit au moment où se produit le contact des charbons. Elle est généralement constituée par un fil de maillechort (fig. 384), enroulé sur un noyau cylindrique en porcelaine, et mesure de 3 à 4 ohms. Un curseur glissant sur les spires, permet d'en insérer plus ou moins dans le circuit, et ainsi de faire varier la valeur de la résistance, s'il y a lieu. L'électro dérivé mesure de 200 à 500 ohms.

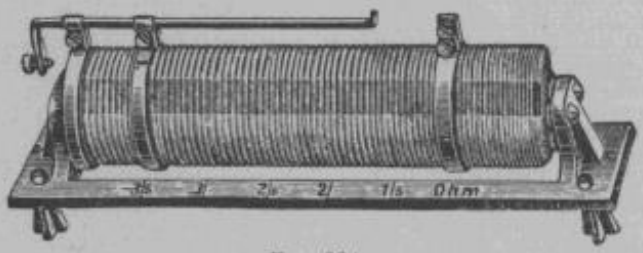


Fig. 384.

On s'explique physiquement comme suit le fonctionnement de la résistance additionnelle : étant faible, on peut l'assimiler à un tuyau gros et court; le solénoïde dérivé, au contraire, correspond à un tuyau long et mince ; enfin l'arc peut être représenté par un gros tuyau, que l'on peut obturer plus ou moins au moyen d'un robinet.

En l'absence du tuyau court et gros (résistance additionnelle) la fermeture plus ou moins complète du robinet (variation de l'arc) ne peut exercer aucune influence sur le débit du tuyau long et mince (courant débité par le solénoïde). Mais dès que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'ensemble est continué par le tuyau gros et court, la fermeture plus ou moins complète du robinet modifie la pression aux extrémités du tuyau mince, de sorte que le débit de celui-ci varie inversement au débit de l'autre.

Régulateur différentiel. — Les régulateurs différentiels combinent les deux dispositifs précédents. Un noyau allongé N (fig. 385), pénétrant dans deux solénoïdes D et S, équilibre exactement le poids du charbon supérieur. Le solénoïde D se trouve en dérivation sur l'arc, l'autre étant en série. Appelons i_a l'intensité du courant alimentant l'arc.

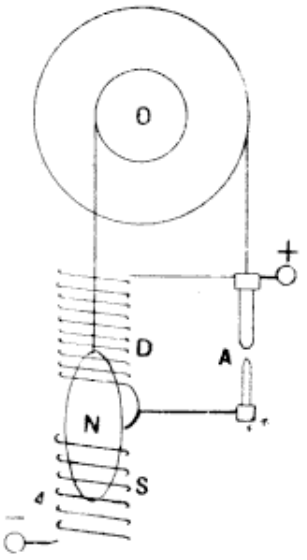


FIG. 385.

Au moment de la fermeture du circuit, de deux choses l'une : ou les charbons sont en contact, le courant principal est alors très intense, l'action du solénoïde inférieur prédomine, les crayons s'écartent, l'arc jaillit ; s'ils ne sont pas en contact, c'est le solénoïde en dérivation qui acquiert brusquement une forte influence, ce qui amène les charbons en contact, puis les choses se passent comme ci-dessus. Quand les crayons s'usent, l'action du solénoïde dérivé augmente, de manière à les rapprocher.

L'écart normal est réglé par la condition

$$kn\,(i_a + i_d) = k'n'i_d, \quad \text{ou} \quad kn\,i_a = (k'n' - kn)\,i_d$$

n et n' étant respectivement les nombres des spires des solénoïdes en série et dérivé. Mais $i_d = u/d$ en appelant u la différence de potentiel régnant aux bornes de l'arc. En remplaçant i_d par sa valeur dans l'équation précédente, il vient :

$$kni_a = (k'n' - kn)\,\frac{u}{d} \quad \text{ou} \quad \frac{u}{i_a} = \frac{knd}{k'n' - kn} = \text{c}^{\text{te}}.$$

Le rapport de la différence de potentiel aux bornes de l'arc, à son intensité, en d'autres termes la *résistance apparente* de l'arc, reste constante, d'où le nom de *régulateurs différentiels* ou *à résistance constante* donné à cette dernière catégorie d'appareils.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Voltages nécessaires. — Tandis qu'une lampe en dérivation à l'air libre exige une perte supplémentaire de 30 °/₀ de sa tension, dans une résistance de stabilité placée en dehors des charbons, la lampe différentielle n'en demande que 15 °/₀. La lampe à courants alternatifs se contente d'une moindre résistance de stabilité, à cause d'une plus grande sensibilité du mécanisme due aux vibrations.

Comparaison des trois systèmes. — Courant constant. — Le régulateur à courant constant n'a plus qu'un intérêt rétrospectif, vu l'adoption générale des distributions sous tension constante. Il présente d'ailleurs ce défaut capital, qu'on ne peut en associer en série un certain nombre puisque, du moment que la résistance du circuit reste la même, ce qui peut se produire avec des arcs de toutes longueurs, mais dont la somme reste constante, le courant garde une valeur invariable et aucun réglage n'est possible.

Dérivation. — La lampe en dérivation est simple, robuste, peu coûteuse. Elle fonctionne régulièrement, mais exige un voltage relativement élevé, qui fait que l'on ne peut en mettre plus de deux en tension sur 110 volts. Une seule résistance additionnelle suffit pour les deux lampes.

Avec l'arc en vase clos, une seule reste en dérivation sur 110 volts. Ce dispositif assure l'indépendance des foyers, permet l'emploi de charbons de qualité médiocre, une consommation très réduite de ceux-ci et une notable réduction de la main-d'œuvre, puisqu'une paire de charbons dure de 150 à 200 heures. Mais le rendement lumineux est moindre, et les variations de la lumière sont plus grandes. Dans les lampes à arc en vase clos, les charbons doivent être homogènes, ceux à mèche ne donnant pas de bons résultats.

On arrive même, avec ce système, à construire des lampes à arc de faible intensité lumineuse, ce qui présente un certain intérêt pour l'éclairage des petits espaces : vitrines, bureaux, etc. Ces petites lampes (Lilliput, Miniature, etc...) fonctionnent sous des intensités très réduites, tout en fournissant une durée d'éclai-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rage relativement longue : 16 à 20 h pour la lampe de 3 ampères développant 380 bougies hémisphériques moyennes.

La tension aux bornes de la lampe doit être de 80 volts en courant continu et 70 V avec le courant alternatif. Le reste de la tension est absorbé dans une résistance additionnelle.

Les régulateurs différentiels sont beaucoup plus sensibles que ceux en dérivation ; la fixité de la lumière est plus grande. Grâce à la faible résistance de stabilité qui leur suffit, il est possible de les grouper par 3 en série sur 110 volts (lampes triplex), ce qui assure une meilleure répartition de l'éclairage et une utilisation plus économique du courant. Remarquons toutefois, que la disposition par trois lampes montées en série, n'est recommandable que pour éclairer des *espaces de dimensions moyennes* et si *la fixité de la tension est suffisante*. Pour les grands espaces, en effet, le poids de cuivre des canalisations augmente rapidement, car le circuit extérieur doit présenter la plus faible résistance possible, la chute de voltage ne pouvant jamais y dépasser 3 ou 4 volts. De plus, l'arc produit dans ce cas, est court, et ne se prête pas à l'obtention de foyers lumineux puissants, seuls avantageux pour l'éclairage des grands espaces. Enfin, les charbons devant être très homogènes ou de meilleure qualité, coûtent plus cher.

Mécanismes. — Les dispositifs rudimentaires indiqués pour la simplicité dans les figures 382, 383 et 384 sont, en pratique, remplacés d'une manière générale par des mouvements d'horlogerie. Le poids du charbon supérieur tend à faire défiler une série de rouages, dont le dernier est immobilisé par un doigt. L'ensemble du mouvement d'horlogerie, tiré par un ressort, est maintenu en équilibre sous l'action attractive d'un ou de deux électroaimants, dont les variations d'attraction sur une armature en fer, reliée rigidement au mouvement, permettent le déplacement du charbon et la libération du dernier rouage. Alors le charbon supérieur défile, raccourcit l'arc, l'action des électros fléchit ; sous la sollicitation du ressort, le dernier rouage vient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

enclencher de nouveau le doigt, et ainsi de suite. Les mouvements trop brusques sont évités par des cataractes à air.

Si les deux porte-charbons sont réunis par une cordelette, le point lumineux reste fixe dans l'espace, puisque le charbon inférieur monte d'autant que l'autre descend.

Le mécanisme des lampes à arc en vase clos est des plus rudimentaires. Il ne comporte qu'un solénoïde agissant par coincement ou freinage sur l'armature du porte-charbon supérieur. Le solénoïde est mis en série avec l'arc et la résistance qui absorbe le reste de la tension disponible.

Enfin, dans le but de doubler la durée de l'éclairage, certaines lampes à arc libre portent deux paires de charbons, que le mécanisme met automatiquement en service l'une après l'autre.

Bougies électriques. — Les deux crayons de charbon, recouverts d'un dépôt de cuivre pour augmenter leur conductibilité, sont séparés par un isolant composé de plâtre et de baryte appelé *colombin*, et insérés dans les mâchoires d'un *chandelier* amenant le courant. Un enduit charbonneux réunit les deux pointes des crayons, de façon à assurer l'amorçage initial de l'arc. Le colombin se consume et disparaît au fur et à mesure de l'usure des charbons. Celle-ci reste égale, à condition d'alimenter l'arc avec du courant alternatif.

Le diamètre des charbons ne dépasse pas 4 millimètres et leur écartement 3. Sous la longueur de 30 centimètres, ils brûlent pendant deux heures.

Le rendement lumineux est faible, la lumière irrégulière d'intensité et de teinte. Ces appareils, qui eurent un moment de grande vogue au début de l'éclairage électrique, ne sont plus employés qu'exceptionnellement aujourd'hui.

Puissances et consommations. — La consommation pratique d'une lampe à arc, d'une intensité moyenne hémisphérique de 600 bougies, est de 450 watts, soit 0,75 watt par bougie. Dans les distributions à 110 volts avec deux lampes à arc de 10 A, soit une dépense de 550 watts par lampe et où l'on fait usage de globes opales ou dépolis, la consommation monte à environ 1 watt par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bougie. L'emploi des lampes triplex fait descendre la consommation à 0,6 w par bougie environ.

Quand l'arc est en vase clos, la consommation peut descendre également à 1 watt par bougie avec le courant continu, tandis qu'elle s'élève à 2 watts avec les bougies électriques.

Arcs à flammes et à la magnétite. — En imprégnant les charbons de certains sels métalliques, la lumière émise est teintée. Celle-ci provenant en grande partie de l'arc, il y a intérêt d'allonger ce dernier le plus possible et par conséquent de marcher à haut potentiel. Sa longueur atteint 10 à 11 mm. (fig. 386).

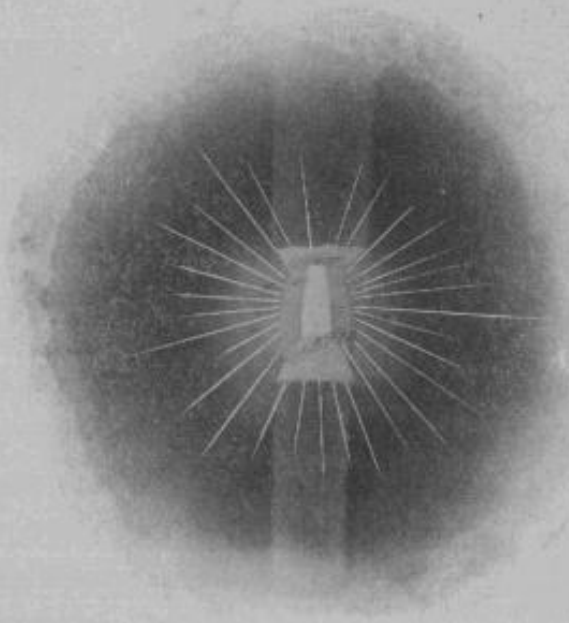


Fig. 386.

Lampe Bremer. — Avec des charbons renfermant 20 à 25 % de sels de calcium, de silicium et de magnésium, on obtient une lumière rosée, moins stable qu'avec les arcs au carbone pur, mais dont le rendement lumineux est augmenté de 50 à 80 %.

Lampe Blondel. — Avec 50 % de fluorure et borate de calcium, M. Blondel obtient des arcs à *flamme*, développant un flux lumineux d'une belle teinte jaune, d'une puissance lumineuse telle, que la bougie est produite en dépensant seulement 0,25 w. Comme de tels arcs dégagent une fumée abondante, le crayon positif, qui comporte une mèche, la partie minéralisée, puis une gaine en charbon graphitique, est placé en bas. Le charbon négatif est en carbone pur et à mèche. Souvent, actuellement, les charbons sont obliques (fig. 387).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

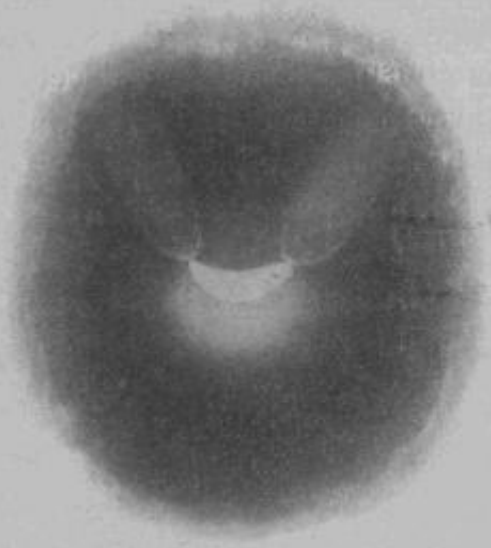


Fig. 387.

Le grand inconvénient des charbons minéralisés réside dans la scorification du charbon et la variation de lumière qui en résulte; leur avantage est de fournir un éclairage économique, avec une très bonne courbe de répartition de la lumière ; de plus, avec les charbons minéralisés, la lumière est plus chaude et plus agréable à l'œil et le fonctionnement avec les courants alternatifs reste satisfaisant.

Particularités des lampes à flamme. — Ce qui caractérise les arcs à flamme au point de vue industriel, c'est que l'arc proprement dit, formé entre les électrodes, est plus long et plus brillant qu'avec les arcs à charbon pur, dans lesquels il ne joue sensiblement aucun rôle comme source de lumière. En même temps on constate, que les bases de l'arc sur les électrodes sont beaucoup plus petites; il n'y a plus, à proprement parler, de cratère analogue à celui de l'anode d'un arc au charbon pur; la source de lumière se présente comme une longue flamme, jaillissant d'une petite plage très brillante sur une des électrodes.

Au point de vue théorique, les arcs à flamme ont un caractère commun : la grande conductibilité des vapeurs qui les composent, due, évidemment, à la présence d'ions libres en grande quantité; en outre, la chute de tension au voisinage de l'anode est beaucoup plus faible que dans les arcs au charbon; enfin, cet arc se trouve soumis, ainsi que ses électrodes, à l'influence oxydante de l'air ambiant.

Pour égaliser l'usure des deux charbons, on est obligé de maintenir les pointes dans un *économiseur* assez profond (masse réfractaire, agencée sous forme de réflecteur, que traversent les charbons) qui sert d'égaliseur d'usure, parce que la pointe du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

crayon qui en sort le plus s'oxyde davantage; mais les fumées qui le remplissent sont opaques et réduisent le rendement. Pour éviter que l'arc remonte, dans le cas de charbons obliques, il est nécessaire de le souffler vers le bas par un champ magnétique produit par un électro-aimant fixé au-dessus de l'économiseur et alimenté en série par le même courant. On évite cet organe supplémentaire, en réduisant considérablement l'angle des deux charbons et en poussant l'intensité du courant vers 9 et 10 A et au-delà, pour que le courant produise lui-même un soufflage suffisant.

Pour régler l'arc, on a dû combiner par des mécanismes spéciaux, deux mouvements différents des charbons : un mouvement de descente compensant l'usure, mais sans recul possible (sauf dans les lampes à courant alternatif à moteur) et un mouvement d'oscillation des charbons autour de leur point d'attache, qui permet de rapprocher les pointes pour l'allumage ou le rallumage, quand la mèche s'est vidée trop profondément et que l'arc jaillit uniquement sur le carbone pur. Ce mouvement d'oscillation est généralement produit par un levier double, qui agit sur les deux électrodes; mais dans d'autres lampes, on emploie un système agissant sur un seul des charbons. Dans tous les cas, on est obligé de laisser dans l'économiseur d'assez grandes ouvertures, toujours mal fermées et qui laissent monter les fumées, assez abondantes, dans la lampe.

Arc à la magnétite. — La lampe à arc à la magnétite a été particulièrement étudiée et employée en Amérique.

L'électrode positive est constituée par une pièce en cuivre. L'électrode négative est en magnétite, oxyde magnétique de fer, noir. Cette substance a été choisie parce que sa conductance est élevée et sa stabilité grande, à toutes les températures. On la trouve abondamment, à bon marché, et elle donne un arc blanc de haut rendement, d'une largeur double de l'arc au charbon et qui brûle lentement, au taux de 3 mm par heure seulement. On peut d'ailleurs réduire cette consommation, en y mélangeant diverses substances et notamment des composés de titane, ce qui fournit des électrodes de 20 cm de longueur, capables de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

brûler 5 à 600 heures. Pendant le fonctionnement, il se dégage une légère fumée qui est dirigée à l'extérieur de la lampe par une petite cheminée ménagée à la partie supérieure.

Dans les modèles récents utilisés en Amérique pour l'éclairage des rues, les électrodes comportent un mélange de magnétite et de sels de chrome et de titane. Ce mélange est comprimé dans des tubes en fer de 26 cm de longueur sur 1,6 cm de diamètre. L'électrode supérieure ne s'use pas. La durée atteint 150 à 200 heures sous le voltage de 110 à 220 volts, avec une consommation spécifique ne dépassant pas 0,5 w par bougie. Ces lampes ne fonctionnent qu'avec le courant continu ou redressé, parce que la magnétite, aussi bien que le titane ou le chrome, ne permettent pas le rallumage spontané de l'arc après chaque extinction.

La lampe ouverte, dont on peut disposer 10 en série sur 480 volts, est plus avantageuse et comme entretien et comme qualité de lumière. Sous le même voltage, on ne peut monter en série que 6 lampes fermées, dont le fonctionnement laisse d'ailleurs à désirer. D'autre part, une lampe fermée de 10 ampères ne donne pas autant de lumière qu'une lampe ouverte de 6 A.

Arc au mercure. — Lorsqu'on applique une certaine tension, même fort élevée, entre des électrodes de mercure placées dans un tube à vide, on constate qu'aucun courant ne passe, parce que la formation des ions ou particules transportant le courant, n'est pas amorcée. Cette formation a son siège à la cathode et, dès qu'elle est obtenue, elle se poursuit d'elle-même si l'on fournit une quantité d'énergie suffisante. L'ionisation initiale nécessaire s'obtient en désagrégeant la cathode au moyen d'un petit arc auxiliaire, ayant même cathode que l'arc principal et, dès lors, on peut faire traverser le tube par un courant continu de grande intensité sous un faible voltage. Le courant paraît sortir de la cathode par un point brillant, se déplaçant rapidement à la surface du mercure (tache cathodique), où le mercure bouillonne.

Lorsque le tube est froid, l'arc s'allume facilement. S'il est chaud, la vapeur de mercure inerte empêche l'allumage au même titre, mais à un degré moindre, que des gaz étrangers.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La chute de tension se divise en deux parties : 1° celle aux électrodes, elle-même subdivisée en chute à la cathode, égale à environ 5 volts et chute à l'anode, de 8,8 v dans le cas de mercure et 4,5 v dans le cas de graphite ou de fer; 2° la chute de tension dans l'arc lui-même, proportionnelle à sa longueur. Elle est d'autant plus faible que le tube est plus large.

Pour que l'arc soit stable, il faut placer en série avec lui une résistance qui absorbe 20 % du voltage total. L'intensité peut être d'autant plus faible que la surface cathodique est plus petite. L'anode choisie doit avoir un point de fusion très élevé; les meilleures substances sont le graphite artificiel ou certains carbures.

D'après des expériences de Cowper-Hewitt, d'autres substances employées comme cathodes manifestent le phénomène d'opposition au passage du courant, obstacle que l'on peut toujours surmonter en désagrégeant la surface de la cathode. En pratique, le mercure à l'état de pureté est le seul apte à former une surface, qui puisse être maintenue constamment à l'état de désagrégation, et qui se reconstitue d'elle-même au fur et à mesure de sa pulvérisation.

Lampe Cowper-Hewit. — La lampe Cowper-Hewit est constituée par un long tube étroit, terminé par des renflements dans lesquels se trouvent l'anode A (fig. 388) et la cathode B, plongeant dans

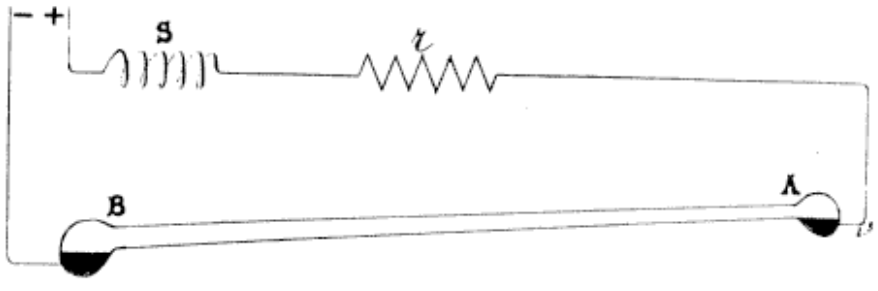


Fig. 388.

du mercure. Ce tube est supporté par une tige métallique placée parallèlement au-dessus de lui, pouvant basculer autour de son milieu et pourvue d'une chainette à chaque extrémité.

En tirant sur la chainette du côté A, on incline la lampe, le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mercure s'écoule de B en A formant un mince filet continu réunissant l'anode A à la cathode B, et permettant au courant de passer. En faisant alors basculer le tube en sens contraire, de manière à amener la cathode B à un niveau inférieur à celui de l'anode A, le mercure retourne en B en interrompant le circuit. L'arc qui se produit par suite de l'extra-courant de la bobine de self amorce la lampe. Le mouvement nécessaire à l'amorçage s'obtient aussi automatiquement au moyen d'un électroaimant. *r* est une résistance de réglage, S une self de stabilité. Grâce au niveau inférieur de la cathode, le mercure condensé y revient automatiquement. Les logements des électrodes sont garnis de laine de verre, qui les protège contre les coups de marteau du mercure pendant le transport ; ou bien on munit la cathode d'un cône en verre qui amortit les chocs.

La partie éclairante ou l'espace gazeux proprement dit, rendu lumineux par le passage du courant, est cylindrique. Sa longueur, pour un diamètre donné, est à peu près proportionnelle à la tension. Les lampes de 55 V ont donc une longueur égale à environ la moitié de celle des lampes de 110 V, laquelle est d'1,36 m.

Il existe pour ce genre de lampes une certaine pression de la vapeur de mercure pour laquelle le rendement lumineux est maximum. Cette pression optimum paraît être voisine de 2 mm de mercure, correspondant à une température d'environ 140°.

On construit d'ordinaire les lampes Cowper-Hewit pour une intensité de 3,5 A.

Les lampes commerciales Cowper-Hewit, sont de deux types : 1° la lampe H (fig. 389) de 300 bougies, que l'on monte en général par groupe de deux en série sur 98 à 122 volts ou par groupe de quatre en série sur 196 à 244 volts. Elles sont munies chacune d'une résistance en shunt, qui permet de faire fonctionner une seule lampe d'un groupe de deux. Elles absorbent un courant de 3,5 A. Deux lampes en série sur 110 V consomment 385 W ; 2° la lampe K de 800 bougies, que l'on monte seule sur 110 V ou par groupe de deux en série sur 220 V. Cette lampe absorbe un courant de 3,5 A et consomme 385 W sous 110 V. (Consommation spécifique 0,45 w par bougie.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'intensité lumineuse baisse de 20 % pendant les 100 premières heures de fonctionnement par suite d'une altération de la surface du verre, puis elle reste constante.

La C^ie^ Westinghouse indique pour les lampes Cowper-Hewit une durée minimum de 1000 heures.

Malheureusement, la lumière émise, dépourvue de rayons rouges, est blafarde. Elle dénature complètement les couleurs,

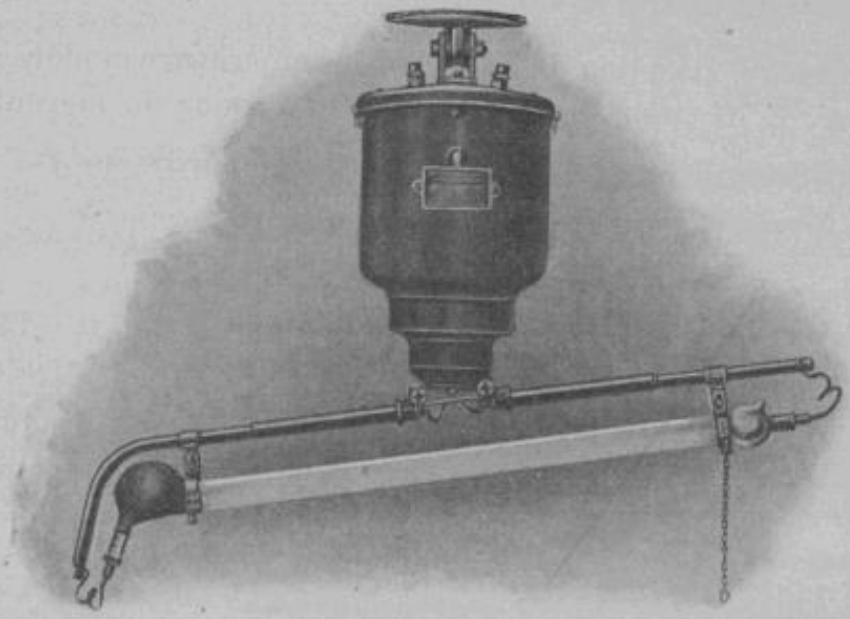


FIG. 389.

donne un teint livide, fait paraître les lèvres noires. Par contre, elle est très reposante pour la vue et convient admirablement pour la photographie.

En consentant à une perte de 25 %, on peut la mélanger de rayons rouges, en enveloppant les lampes dans une étoffe de soie, imprégnée d'une substance fluorescente telle que la rhodamine. On peut aussi employer une électrode en zinc amalgamé, ce qui ajoute aux raies du mercure, celles du zinc.

On améliore également la nature de la lumière produite, en remplaçant la résistance qui accompagne les lampes au mercure par des lampes à incandescence ordinaires.

Il est à remarquer que les vapeurs de mercure émettent d'abondantes radiations ultra-violettes, qui sont entièrement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

absorbées par le verre ordinaire. Mais en remplaçant celui-ci par du quartz, ces radiations passent et on peut les utiliser pour certaines applications spéciales : combinaison de corps en chimie, destruction des petits insectes (dans les colonies), qui sont foudroyés aux abords de la lampe, usages thérapeutiques, etc... Il faut naturellement avoir soin de s'abriter alors les yeux derrière des lunettes protectrices, vu l'action nocive de ces rayons sur l'organe de la vue.

Lampe Quartz. — Au lieu de marcher à température modérée, la Société A. E. G. pousse au contraire la vapeur de mercure à l'incandescence, dans des tubes en quartz pourvus d'ailettes métalliques de refroidissement (fig. 390).

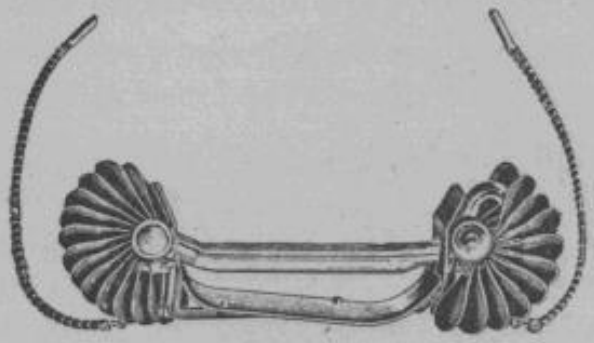


Fig. 390.

A l'allumage, le tube est soulevé par un électroaimant, monté en dérivation sur lui ; il bascule autour de son axe, de manière que le mercure d'une des ampoules coule dans l'autre, établissant un court-circuit qui provoque l'ouverture du circuit de l'électro et le brûleur reprend sa position horizontale. L'interrupteur de l'électro entre en jeu par l'attraction de la bobine de self mise en série avec l'arc.

La lampe Quartz utilisant un tube de 15 cm de longueur seulement, il a été possible de la munir d'un globe en verre rond (fig. 391), analogue à celui des lampes ordinaires. Ce globe intercepte les rayons ultraviolets, nocifs pour les yeux et la peau, qu'elle émet abondamment.

Grâce à la haute température atteinte, la lumière est pourvue de rayons jaunes et rouges, lui donnant une teinte acceptable.



Fig. 391.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La Société A. E. G. fabrique les trois types :

4	A	sous	110 V	développant	1200 bougies
2,5	A	»	220 V	»	1500 »
3,5	A	»	220 V	»	3000 »

ce qui fait ressortir la bougie à 0,25 W environ. Elle garantit le bon fonctionnement de ses brûleurs pendant au moins 1 000 heures.

§ 3. — Répartition de la lumière. Modes d'alimentation des foyers. Données pratiques sur l'éclairage.

Répartition de la lumière. — Incandescence. — Le caractère de l'incandescence est de se prêter à une grande subdivision de la lumière, permettant d'obtenir les effets lumineux les plus variés.

L'intensité de l'éclairage est souvent tempérée par l'emploi de globes en verre dépoli. Quand, au contraire, on veut concentrer la lumière suivant certaines directions seulement, on argente la base de l'ampoule. Enfin, en enveloppant les lampes de globes à doubles cannelures prismatiques spéciales, *globes holophanes*, on substitue à l'éclatant trait lumineux du filament, des sphères lumineuses uniformément éclairées, donnant un éclairage très égal. Dans les applications industrielles, on se contente souvent de pourvoir la lampe d'un réflecteur en porcelaine ou en tôle émaillée.

Arc. — L'éclairage par arc, au contraire, s'applique surtout aux grands espaces, vu la puissance lumineuse élevée qu'il développe. En raison de cette grande intensité, on doit nécessairement le placer très haut et il y a intérêt à rejeter vers le bas toute la portion du flux lumineux, qui n'est pas naturellement dirigée dans cette direction. On le protège généralement par un globe en verre opale. Deux cas sont à distinguer, suivant que l'on se trouve à l'air libre ou non.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Espaces découverts. — Dans les espaces découverts, les lampes sont pourvues d'un réflecteur en tôle émaillée. Si le point lumineux est fixe, le réflecteur est avantageusement percé à son centre d'une ouverture permettant le passage du crayon supérieur et pourvu d'une masse en matière réfractaire pour réduire son usure par combustion.

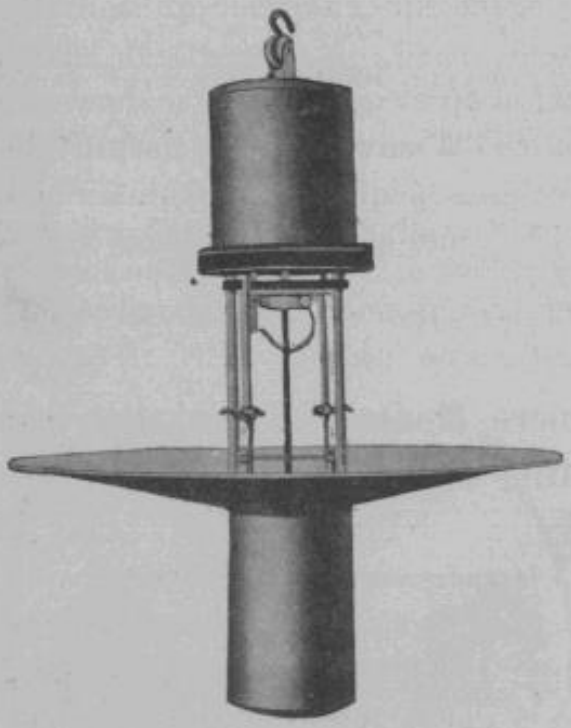


Fig. 392.

Espaces couverts. — Dans les espaces fermés, on atteint de bons résultats en cachant à l'œil la vue de l'arc et en diffusant la lumière sur de grandes surfaces. Dans ce but, M. Jaspar a imaginé de faire renvoyer par le plafond blanchi la lumière d'arcs renversés (fig. 392).

M. Hrabowski entoure l'arc d'une grande crinoline de toile blanche BAFE (fig. 393 et 394), attachée à un réflecteur CD.



Fig. 393.

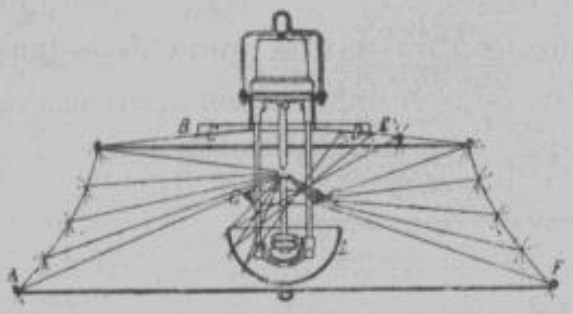


Fig. 394.

Toute la lumière émanant de l'arc vient se diffuser directement sur la toile et le réflecteur, ou s'y trouve réfléchie par le demi-globe L et le prisme annulaire en cristal G. On obtient ainsi un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

éclairage remarquablement homogène et puissant, rappelant la lumière solaire.

Les lampes à charbon non minéralisé, dont l'arc brûle à l'air libre, ont l'avantage de fournir une lumière dont la fixité n'a été atteinte jusqu'ici par aucun autre type de lampe à arc; aussi sont-elles tout indiquées, partout où une lumière absolument fixe est indispensable, par exemple dans des locaux où l'on exécute des travaux délicats et où les vapeurs dégagées par les lampes intensives ne sont pas tolérées. L'arc au mercure se recommande aussi tout spécialement dans ces cas, avec ce grand avantage de n'exiger aucun entretien.

Modes d'alimentation des foyers. — Incandescence. — Dérivation directe. — Le mode général d'alimentation des lampes à incandescence est la simple dérivation. Les lampes viennent se raccorder directement aux conducteurs d'alimentation, maintenus sous tension constante. On a adopté, dès le début, la tension de 110 volts. La nécessité d'économiser le cuivre dans les canalisations et d'étendre celles-ci le plus loin possible, ont conduit à majorer la tension. Actuellement, les distributions d'éclairage se font généralement sous 220-250 volts, le plus souvent suivant le dispositif à 3 fils.

Système Weissmann. — Mais nous avons vu que plus le voltage appliqué à la lampe augmente, plus son rendement diminue; il diminue de même avec l'intensité lumineuse de la lampe.

Ces considérations ont amené M. Weissmann [1] à conclure, qu'il faut *approprier la tension à appliquer aux lampes, à leur intensité lumineuse*. Or, l'emploi du courant alternatif permet aisément d'arriver à ce résultat. Il suffit, en effet, d'interposer chez le consommateur, entre chaque groupe de lampes et l'interrupteur qui le commande, un tout petit transformateur, qui abaisse la tension du courant distribué, au degré voulu pour ce

[1] Weissmann, *Rendement lumineux des lampes électriques à incandescence*. Rapports et procès-verbaux du Congrès international de Paris de 1900, p. 269.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

groupe de lampes. L'interrupteur est d'ailleurs placé sur le primaire du transformateur, de telle sorte que celui-ci ne fonctionne jamais à vide. Avec des lampes au carbone de 10 bougies à 22 volts, M. Weissmann arrive aux consommations très avantageuses de 1,67 à 1,93 watt par bougie.

Mais c'est surtout pour les lampes à filament métallique que le système paraît séduisant. Les filaments métalliques pour 110 volts ne mesurent en effet que 0,03 à 0,04 mm de diamètre. Ils sont donc très fragiles. En marchant à basse tension, on peut les renforcer et dès lors leur principal défaut disparaît. En outre, leur durée augmente et leur rendement devient meilleur : on ne dépense plus qu'environ 0,6 w par bougie.

Les lampes à incandescence donnent un bon éclairage pour les fréquences 50, 40 et même 33. Mais à la fréquence 25, on peut observer un papillotement appréciable, surtout sur les lampes de faible puissance (5 bougies).

Arc. — L'arc s'alimente, soit sous intensité, soit sous tension constante.

Intensité constante. — Dans une distribution à intensité constante ou en série, on ne peut utiliser les lampes dont le mécanisme est construit en vue du réglage par l'intensité, puisque celle-ci reste invariable. On emploie, en conséquence, les lampes en dérivation ou différentielles, que l'on groupe jusqu'à 100 et 150 en série, alimentées par des machines à intensité constante. Dans le cas de lampes multiples, les résistances additionnelles disparaissent, la résistance des autres lampes jouant parfaitement ce rôle.

Ce mode d'alimentation se prête particulièrement aux éclairages publics. Il n'est pour ainsi dire pas appliqué sur le continent, où l'on préfère recourir à l'alimentation sous tension constante.

Tension constante. On pourra monter sur 110 volts, ainsi que nous l'avons vu : 1 lampe à arc enfermé; 2 en dérivation, 3 différentielles et 2 ou 3 lampes au mercure. Avec le courant alternatif, on peut toujours grouper 3 lampes en série avec leur résistance de stabilité, qui est ici une bobine inductive.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

VOLTAGES LIMITES. — Les constructeurs conseillent de ne pas dépasser 5 à 600 volts pour l'alimentation des lampes à courant continu, en raison des difficultés que présente leur isolation. Avec le courant alternatif, la limite s'abaisse à 220 volts (6 lampes), en intercalant des bobines de selfinduction (1)

FRÉQUENCE. — Quant à la fréquence, les lampes à arc ne fonctionnent pas d'une manière satisfaisante quand elle est basse. A la fréquence 25, l'éclairage n'est pas supportable; il ne commence à le devenir qu'à partir de la fréquence 33. A la fréquence 50, les résultats sont satisfaisants, mais la lumière n'est pas encore complètement fixe.

Données pratiques. — INCANDESCENCE. — On admet pour un éclairage normal moyen 1,5 bougie décimale par mètre carré. Pour un éclairage brillant, il faut atteindre 4 à 5 bougies, portées à 20 bougies par mètre carré sur la scène d'une salle de spectacle. Un éclairage moyen, dans une salle de spectacle, s'obtiendra en attribuant 10 bougies par mètre carré de plancher.

ARC. — Le tableau suivant fournit des indications générales *approximatives*, se rapportant à des arcs à courant continu à l'air libre, recouverts de globes légèrement opalins.

ÉLÉMENTS DE FONCTIONNEMENT	INTENSITÉ DU COURANT EN AMPÈRES			
	6	10	13	24
Intensité lumineuse nominale, en bougies décimales	400	1 000	1 500	4 000
Hauteurs des foyers au-dessus du sol, en mètres	4 à 7	7 à 10	10 à 15	15 à 20
Surfaces éclairées, en mètres carrés :				
Filatures, tissages, ateliers de précision.	25	50	75	100
Ateliers de mécanique et d'ajustage	50	100	150	300
— montage, fonderies, chaudronneries, etc.	75	150	200	500
Cours, gares, quais, grands halls	250	500	750	2 000
Bureaux de dessin. (Arc renversé)	30	75	100	

(1) BOCHET, *Observation relative aux différents régimes de lampes à arc.* Eclairage électrique du 5/10/01, p. 30 et 31.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XV.

Traction.

§ 1. — Généralités.

Classification des systèmes de traction. — La traction électrique constitue un cas particulier de distribution de l'énergie, dans lequel les récepteurs sont mobiles. On y rencontre donc une usine centrale génératrice et des véhicules électriques. C'est par le mode de distribution adopté pour transmettre l'énergie aux véhicules, que se différencient les systèmes; ils se groupent en deux grandes classes, suivant que l'alimentation est directe ou indirecte. Dans le premier cas, nous trouvons des artères et un réseau de distribution; dans le second, les voitures transportent leur source d'électricité, qui est une batterie d'accumulateurs. Les systèmes mixtes combinent ces deux modes d'alimentation.

Nous examinerons en premier lieu les points communs à tous les systèmes, en nous attachant plus spécialement au cas des tramways.

Renforcement de la voie. — Les véhicules électriques, étant beaucoup plus pesants que ceux à traction chevaline, exigent un renforcement de la voie. La figure 395 montre la coupe de rails très employés, les rails Phœnix, ainsi que leur mode d'éclissage. Ces rails, comme d'ailleurs ceux ordinairement utilisés en Europe, sont à gorge et ont été renforcés jusqu'au poids de 40 à 50 kg par mètre courant pour les lignes à grand

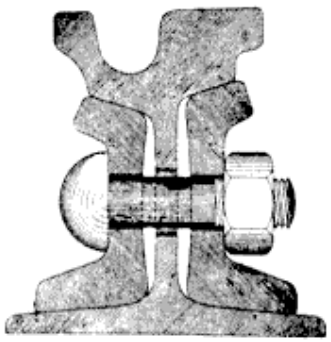


Fig. 395.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trafic. Leur hauteur doit être de 150 à 180 mm, la largeur de la table de roulement de 45 mm, celle-ci étant telle, que les roues roulent sur toute sa surface; largeur de la gorge 30 mm.

On pose les rails sur des traverses ou des longuerines en bois ou en métal. La voie est consolidée par une couche de béton de 15 à 20 centimètres d'épaisseur, dans les rues de grande circulation.

Effort de traction.— L'effort tracteur doit vaincre les résistances s'opposant au mouvement : la résistance au roulement, celles dues aux rampes, aux courbes et à l'air, enfin la résistance que provoque l'inertie des masses à déplacer. Cette dernière prend une importance prépondérante lors des démarrages rapides. L'énergie emmagasinée sous forme de force vive est partiellement récupérable lors des arrêts.

Roulement. — PALIER. — La résistance au roulement, en palier, dépend du système de voie, de son mode d'établissement et de l'état des rails. Elle est proportionnelle au poids du véhicule, c'est-à-dire à la force appliquant celui-ci perpendiculairement à la surface de roulement. Voici quelques coefficients :

NATURE DE LA VOIE.	EFFORT DE TRACTION en kilogrammes par tonne.
Pavage en granit	7,9
Id. en bois	18,8
Macadam ancien	20,4
Id nouveau	45,8
Voie de chemin de fer (rails saillants)	4
Voie de tramway propre et mouillée	6,8
Id. ordinaire	11,5
Id. très poussiéreuse	27,4

En appelant k le coefficient de résistance au roulement par kg, et p le poids du véhicule en kg, kp représentera l'effort sur palier, c'est-à-dire l'effort horizontal à appliquer au poids p pour le déplacer sur une surface horizontale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il est à remarquer que la valeur du coefficient k au démarrage est sensiblement supérieure à celle relevée en marche normale.

Rampes et pentes. — Dans les rampes ou les pentes, la force qui applique le véhicule perpendiculairement à la surface de roulement est $p \cos \alpha$ (fig. 396), α étant l'angle de pente; la force à développer pour provoquer le roulement est donc $f_1 = kp \cos \alpha$, tandis que la composante $f_2 = p \sin \alpha$ du poids, parallèle au sol, s'oppose directement à la propulsion ou aide cette dernière. La force totale nécessaire pour déplacer le poids p devient dès lors

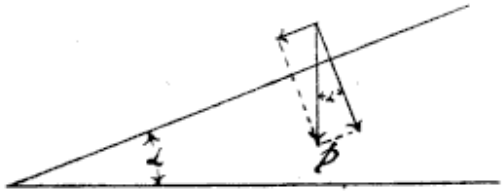


Fig. 396.

$$f_1 + f_2 = kp \cos \alpha \pm p \sin \alpha = p \cos \alpha (k \pm \operatorname{tg} \alpha) = p \cos \alpha (k \pm b),$$

b représentant la pente par mètre. En pratique, α est toujours très faible, de sorte que l'on peut remplacer $\cos \alpha$ par l'unité et la formule devient

$$f_1 + f_2 = p (k \pm b). \qquad (1)$$

Elle montre que *l'effet de la déclivité est de majorer ou de diminuer l'effort de traction, d'une fraction du poids donnée par l'expression de la pente elle-même.*

A moins de dispositifs spéciaux (crémaillère, etc...), on ne peut dépasser une rampe de 60 mm par mètre pour un alignement un peu étendu et 100 mm pour des sections extrêmement restreintes.

Exemple numérique. — Supposons une voiture de tramway pesant 10 T, sur une voie ordinaire, en rampe de 10 millimètres.

$$p = 10\,000, \quad k = 0{,}011 \quad \text{et} \quad b = 0{,}010.$$
$$f_1 + f_2 = 10\,000 \cdot 0{,}021 = 210 \text{ kg}.$$

Courbes. — Dans les courbes, la résistance au roulement se trouve majorée par le frottement du bourrelet de la roue contre le rail et le patinage d'une des roues, celles-ci faisant en général corps avec l'essieu. M. Reckenzaun a conclu de ses expériences que l'effort de traction est approximativement doublé dans les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courbes de 15 mètres et triplé dans celles de 10. Pour la voie normale, on peut représenter sa valeur par la formule 0,360 kg/R par kg, R étant le rayon exprimé en mètres. On réduit la résistance dans les courbes, en employant des essieux convergents ou des boggies.

Résistance de l'air.—La résistance de l'air est en kg : $f_3 = 0{,}085\ S v^2$, S étant, en mètres carrés, la surface offerte normalement au vent, soit à peu près 7 mètres carrés pour les voitures motrices et 2,5 pour les remorquées et v la vitesse exprimée en mètres par seconde.

Pour des vitesses de 15 kilomètres à l'heure ou 4,17 m par seconde, $f_3 = 0{,}085 \cdot 7 \cdot 17{,}39 = 10{,}3$ kg, valeur négligeable vis-à-vis des précédentes. Si la vitesse atteint 100 km à l'heure ou 27,80 m par seconde, $f_3 = 0{,}085 \cdot 7 \cdot 773 = 460$ kg : aux grandes vitesses la résistance de l'air prend donc une valeur prépondérante.

Démarrage. — Le véhicule partant d'une vitesse nulle, doit atteindre la vitesse v mètres par seconde en t secondes. Pendant ce temps, il parcourt l mètres. Appelons f_4 l'effort moyen nécessaire pour obtenir ce résultat. Le travail effectué $f_4 l = f_4 vt/2$, en supposant le mouvement uniformément accéléré. Si nous faisons abstraction des autres résistances, ce travail doit se retrouver entièrement sous forme de force vive $mv^2/2$, d'où $f_4 vt/2 = mv^2/2$ et $f_4 = mv/t$.

Or

$$p = mg, \quad \text{donc} \quad f_4 = pv/gt = 0{,}102\ pv^2/2l.$$

Il est à remarquer que la force vive de la voiture comprend, en outre, des masses en rotation, essieux et roues, dont il y a lieu de tenir compte. La force vive d'une masse, de moment d'inertie I, tournant à la vitesse angulaire w, est $I w^2/2$. La vitesse angulaire w des essieux et roues étant invariablement liée à celle v de translation du véhicule, on peut établir, une fois pour toutes, le rapport existant entre l'effet de l'inertie des pièces tournantes et celui dû au poids seul de la voiture. On

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trouve ainsi que, dans une voiture de tramway, les masses tournantes correspondent à une augmentation de 0,25 de la masse de la voiture. La formule écrite plus haut devient dès lors

$$f_4 = 1{,}25 \cdot 0{,}102\, pv^2/2l = 0{,}0638\, pv^2/l.$$

Exemple. — Reprenons les chiffres précédents $p = 10\,000$, $v = 4{,}17$ et supposons que la mise en vitesse se fasse sur une longueur de 50 mètres. L'effort moyen nécessaire sera $f_4 = 222$ kg.

Si la mise en vitesse se fait sur 30 mètres, l'effort moyen monte à 370 kg.

Remarque. — La relation précédemment trouvée $f_4 = mv/t$ peut encore s'écrire $f_4 = m \cdot \Delta v/\Delta t = m\varphi = p\varphi/g$, φ étant l'accélération que l'on se donne d'après les conditions de l'exploitation.

Puissance totale nécessaire. — Démarrage. — Pendant qu'il a parcouru les l mètres du démarrage, le véhicule a dû vaincre également toutes les autres résistances. Supposons un démarrage en rampe et alignement droit.

L'effort total $F = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$.

La puissance *moyenne* nécessaire exprimée en chevaux sera

$$P = \frac{Fv}{2 \cdot 75} = \frac{p(k+b)v}{2 \cdot 75} + \frac{0{,}085\, S\, v^3}{8 \cdot 75} + \frac{0{,}0638\, pv^3}{2l \cdot 75} =$$
$$0{,}0067\, p(k+b)\, v + 0{,}000\,14\, S\, v^3 + 0{,}000\,423\, pv^3/l$$

et en watts

$$P = 4{,}93\, p(k+b)\, v + 0{,}103\, S\, v^3 + 0{,}312\, pv^3/l.$$

En régime. — A vitesse constante v, l'effort de traction sera

$$F' = p(k+b) + 0{,}085\, S\, v^2$$

et la puissance correspondante :

$$P' \text{ chx} = \frac{p(k+b)\, v}{75} + \frac{0{,}085\, S\, v^3}{75},$$

soit, en watts, $9{,}81\, p(k+b)\, v + 0{,}833\, S\, v^3$.

Exemple. — Reprenons encore les données précédentes $p = 10\,000$; $k = 0{,}011$; $b = 0{,}010$; $v = 4{,}17$; $S = 7$ et $l = 50$ puis 30; nous trouverons $P = 12{,}07$ et $16{,}16$; $P' = 12{,}25$ chevaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Adhérence. — L'entraînement du véhicule se fait grâce à l'adhérence existant entre les roues motrices et les rails. L'adhérence est proportionnelle au poids p' que supporte *l'essieu moteur* : $a = k' p'$.

Le coefficient k' est très influencé par l'état de la voie. Alors que par temps sec $k' = 0{,}25$ à $0{,}35$, sa valeur s'abaisse à $0{,}15$ quand les rails sont mouillés, à $0{,}10$ par temps de brouillard et à moins encore, quand les rails sont couverts de la boue gluante et visqueuse fréquente dans les villes où la voirie laisse à désirer. On la fait remonter à une valeur normale par des projections de sable sur les rails, au moyen des boîtes spéciales dont on munit les voitures.

Pour que l'entraînement puisse avoir lieu, il faut que l'adhérence soit au moins égale à l'effort de traction. On l'augmente en rendant tous les essieux moteurs; de cette façon, le poids du véhicule et de ses voyageurs est utilisé.

Puissances pratiques admises. — Les chiffres donnés précédemment sont des chiffres moyens, se rapportant notamment à toute la durée du démarrage. Au début de celui-ci, les efforts sont souvent triplés et même quadruplés. De là vient que la puissance des moteurs de tramway est très supérieure à celle ressortant des calculs précédents; il faut surtout assurer la remorque de voitures non-automotrices.

Les premières voitures (1892) de la ligne de St-Louis (États-Unis) étaient munies de deux moteurs de 15 chx; puis on a fait usage, sur un grand nombre de voitures, de moteurs de 25 chx et de 35 chx, ces derniers très robustes, mais un peu trop lents, et les dernières voitures sont munies de moteurs d'une puissance de 55 chx; enfin, les voitures à boggies reçoivent des moteurs de 65 chx.

Emploi de locomotives. — On peut se demander si l'emploi de locomotives ne se justifierait pas comme dans la traction à vapeur. Il est aisé de démontrer que cette solution serait mauvaise.

Prenons le cas d'une ligne ayant une rampe de 6 centimètres par mètre, donc $b = 0{,}06$. Admettons un coefficient de traction

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$k = 0{,}0015$ et un coefficient d'adhérence $k' = 0{,}12$. L'effort total à exercer pour entraîner la locomotive et la voiture remorquée, des poids respectifs p et p', sera :

$$F = (k + b)(p + p') = 0{,}075\,(p + p').$$

Pour que cet effort puisse être atteint, il faut que l'adhérence lui soit au moins égale. Or celle-ci, en supposant tous les essieux moteurs, est égale à $0{,}12\,p$. On aura donc à la limite

$$0{,}12\,p = 0{,}075\,(p + p'), \quad \text{d'où} \quad p = 1{,}66\,p'.$$

Dans le cas envisagé, le poids du remorqueur serait donc très supérieur à celui du véhicule, ce qui ferait doubler, et au-delà, les frais de traction. La vraie solution est de recourir à une automotrice, dont tous les essieux sont moteurs, de manière à disposer d'un supplément de force permettant d'entraîner une ou deux voitures remorquées.

Rampe maximum. — C'est aussi par la formule précédente que l'on calcule la rampe maximum $0{,}0x$, qu'une voiture de poids p et d'adhérence a peut gravir. On a, en effet,

$$a = k'p = (k + 0{,}0x)\,p \quad \text{ou} \quad 0{,}0x = k' - k \quad \text{et} \quad x = \frac{k' - k}{0{,}01}.$$

Si $k' = 0{,}12$ et $k = 0{,}011$, on trouve $x = 10{,}9$ %.

Types de voitures. — Les voitures de tramway appartiennent, en général, à deux types : 1° les grandes voitures, contenant cinquante voyageurs environ et pesant une douzaine de tonnes, lorsque leur chargement est complet ; 2° les petites voitures, contenant de 30 à 32 places et pesant 6 tonnes.

Les voitures sont constituées d'une caisse reposant, par l'intermédiaire de ressorts, sur un truck.

Trucks. — Truck rigide. — Le truck rigide (fig. 397), composé d'une charpente métallique reposant par l'intermédiaire de boîtes à graisse et de ressorts sur les essieux de deux paires de roues, est le plus employé. Pour mieux amortir les chocs, il est utile d'attacher la caisse aux ressorts des boîtes à graisse par l'intermédiaire d'autres ressorts A (fig. 398).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

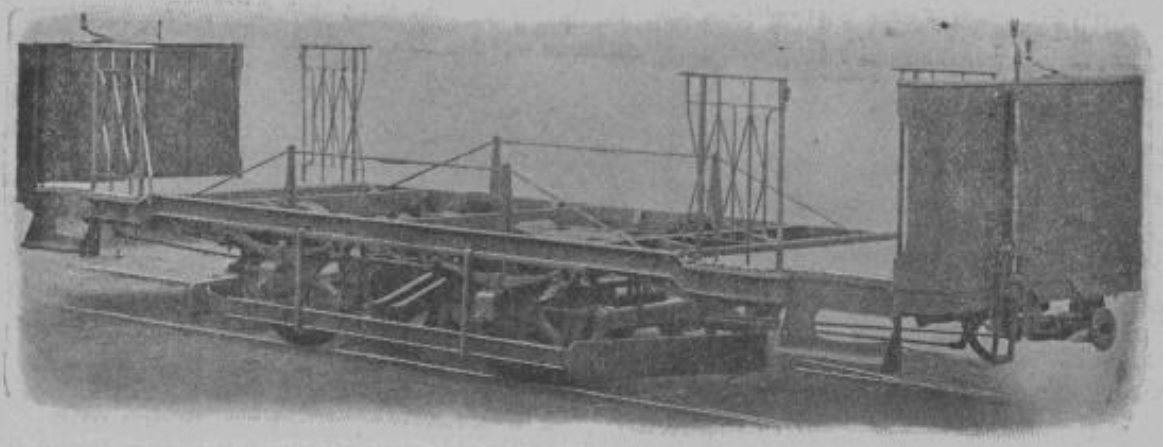


FIG. 397.

Afin de réduire la résistance dans les courbes, les essieux sont aussi rapprochés que possible. Leur empattement (distance qui les sépare) se fixe généralement aux environs de 1,80 m. La voiture est très longue, 6 à 8 mètres, et l'une des plates-formes se trouvant souvent surchargée de voyageurs, il en résulte une mauvaise répartition des efforts, et une fatigue du matériel et de la voie, que l'on évite par l'emploi de boggies.



FIG. 398.

BOGGIE. — On a alors, à chaque extrémité de la voiture, deux paires de roues très rapprochées, réunies rigidement et pivotant autour d'un axe central vertical. L'inconvénient est qu'avec deux moteurs, on ne dispose plus que de la moitié du poids pour l'adhérence, puisqu'il y a quatre essieux. M. Brill a remédié en grande partie à ce défaut, en modifiant le point de suspension sur le boggie, de manière à reporter la presque totalité de la charge sur les essieux moteurs seuls.

ESSIEUX RADIAUX. — Dans le système Robinson, à essieux radiaux, il n'existe que trois essieux. Les deux extrêmes sont seuls moteurs, et portent les 0,95 de la charge. L'essieu médian se relie aux extrêmes par des bielles. Chaque essieu pivote autour d'un axe vertical, situé dans l'axe de la voiture, de sorte

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qu'il se dirige suivant le rayon des courbes, en réduisant la résistance à un minimum. Les voitures à essieux multiples ne se rencontrent guère dans les tramways ; elles s'appliquent plutôt aux métropolitains et aux lignes de chemins de fer.

Chasse-corps. — Pour éviter les accidents, un chasse-corps, constitué par un chassis triangulaire en bois, souvent prolongé par des filets protecteurs, doit être disposé sous le truc, aux extrémités de la voiture.

Aux Tramways bruxellois, un plan incliné à claire-voie vient se poser sur le sol devant les roues antérieures, dès qu'une tringle horizontale placée à l'avant de la voiture, à 10 cm du sol environ, est heurtée par un corps étranger. Le système, bien que non infaillible, a déjà sauvé la vie à un grand nombre de personnes... et de chiens.

Nature du courant. — C'est au courant continu que l'on a généralement recours. Cependant, dans certaines lignes et plus particulièrement dans les lignes accidentées ou fort longues, l'utilisation aisée de plus hautes tensions a fait préférer les courants triphasés et même souvent, actuellement, mais alors nous entrons dans le domaine des lignes de chemins de fer, le monophasé.

Types de moteurs.— Le moteur le plus utilisé est le moteur série, que recommandent tout spécialement son couple de démarrage extrêmement puissant, et la constance de sa réaction d'induit réduisant les étincelles. Le moteur en dérivation ne peut être employé avec les lignes aériennes, à cause des réactions inductives nuisibles que les ruptures entre trôlet et conducteur provoqueraient. On ne rencontre le moteur en dérivation que dans les voitures à accumulateurs, lorsque l'on veut récupérer l'énergie dans les pentes. Cette récupération est impossible avec le moteur série. En effet, quand l'induit entraîné mécaniquement par la voiture augmente de vitesse, sa force contre-électromotrice s'amplifie. Le courant qui le traverse diminue donc, ainsi que l'excitation, d'où affaiblissement du flux et possibilité pour le moteur de s'emballer tout en continuant d'absorber du courant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Toutefois, si après suppression de l'alimentation, on renverse dans les pentes les connexions de l'induit et qu'on connecte le moteur avec des résistances, il se transforme en dynamo, constituant un frein puissant et excellent, parce qu'il évite l'usure des organes agissant par simple frottement. L'interversion de l'induit a pour but d'éviter la démagnétisation des inducteurs par le passage d'un courant de direction inverse à celle du courant normal.

Les balais en charbon permettent la rotation dans les deux sens. On s'affranchit de déplacements incessants, en les calant à demeure sur la ligne neutre.

C'est l'enroulement en tambour qui prédomine, à cause de son meilleur rendement et de sa compacité. On porte sa résistance mécanique à un maximum par l'emploi d'induits dentés. La visite générale du moteur est facilitée par son montage en deux pièces, pivotant sur charnières (fig. 399).

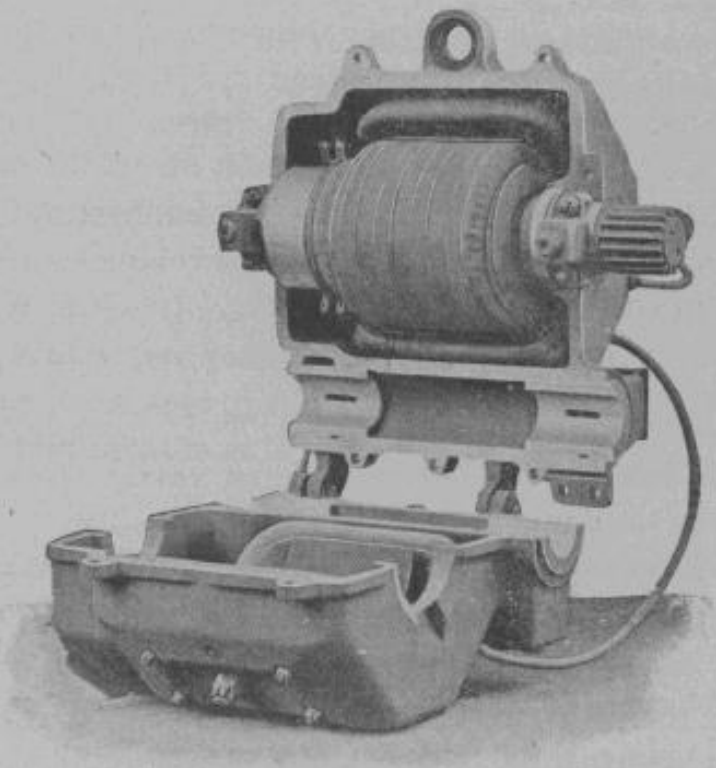


Fig. 399.

L'adoption d'inducteurs tétrapolaires permet de réduire la vitesse à un taux n'imposant qu'une seule réduction. Les bobines des inducteurs sont enveloppées de toile. Enfin, la forme de leur circuit magnétique en fait une cuirasse hermétiquement fermée, protégeant tous les organes (fig. 400), d'où le nom de moteurs *cuirassés* ou *waterproof* qui leur est donné. Le déplacement d'un petit cou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vercle A permet d'ailleurs très aisément la visite du collecteur ; les pièces polaires sont feuilletées perpendiculairement à l'axe de l'induit.

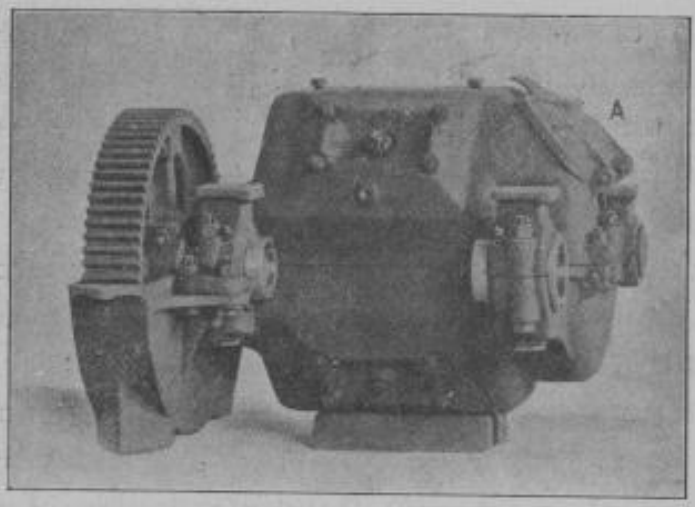


Fig. 400.

La transmission se fait soit, mais rarement, par vis tangente, soit par engrenages cylindriques. Ces organes doivent baigner dans l'huile.

Le moteur repose d'un côté sur l'essieu moteur, au moyen de coussinets et de boîtes à graisse ; il s'attache de l'autre côté par un intermédiaire élastique, (fort ressort d'acier à boudins), à une traverse de truck.

Modification de la puissance et de la vitesse. — Nous avons trouvé précédemment pour le couple développé par un moteur à courant continu (p. 120) la valeur

$$C = \frac{i\, n\, \mathfrak{M}}{2\pi} \qquad (3)$$

qui montre que l'on peut faire varier C en modifiant i, $\mathfrak{M}$, ou tous les deux.

Remarquons cependant que le couple moteur par ampère traversant l'induit

$$\frac{C}{i} = \frac{n\, \mathfrak{M}}{2\pi} = K\, \mathfrak{M}$$

ne peut varier que moyennant la seule modification du flux, obtenue indépendamment du courant.

Mais le courant résultant de l'application d'une force électromotrice constante au circuit contenant les moteurs, écrivons la valeur du couple en fonction de la force électromotrice appliquée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous avons trouvé

$$C = \frac{n\,\mathfrak{N}\,E - n^2\,\mathfrak{N}^2\,N}{2\,\pi\,r} \qquad (4)$$

d'où

$$N = \frac{E}{n\,\mathfrak{N}} - \frac{2\,\pi\,r\,C}{n^2\,\mathfrak{N}^2}. \qquad (5)$$

On voit que la vitesse varie, non seulement avec $\mathfrak{N}$, mais avec E, force électromotrice appliquée aux bornes du moteur, avec r, résistance totale de l'induit et de sa résistance additionnelle, et avec C, couple résistant égal et opposé au couple moteur.

En somme, sous différence de potentiel constante, on dispose de trois moyens de réglage : 1° modification de la différence de potentiel appliquée aux bornes du moteur; 2° modification de la valeur du flux $\mathfrak{N}$; 3° modification de la résistance totale du circuit.

Les moteurs-série généralement employés pour la traction sont tels que, pendant la marche normale, les inducteurs atteignent la saturation. Ils seront donc saturés, à fortiori, pendant tout le régime allant du démarrage à la marche normale. La conséquence est que, dans un moteur-série, pour toutes les valeurs usuelles de la vitesse, on peut considérer $\mathfrak{N}$ comme constant et le couple est proportionnel à l'intensité (3).

D'autre part, il est à remarquer que d'après l'équation (5), dès que r est faible, comme $\mathfrak{N}$ est très grand, le second terme du second nombre devient négligeable et il reste

$$N = \frac{E}{n\,\mathfrak{N}}.$$

$\mathfrak{N}$ pouvant être considéré comme constant d'après ce que nous venons de voir, il en résulte que le nombre de tours par seconde du moteur (c'est-à-dire sa vitesse), est proportionnel à la différence de potentiel aux bornes. En montant les deux moteurs en série, la vitesse est donc diminuée de moitié, puisque la force électromotrice qui leur est appliquée est réduite de 50 %.

Si le moteur est en dérivation, on a (1)

$$i = \frac{E - e}{r} = \frac{E - n\,N\,\mathfrak{N}}{r}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'où $$N = \frac{E - i r}{n \mathfrak{N}}.$$

Mais $i r$ étant négligeable, on arrive également à

$$N = \frac{E}{n \mathfrak{N}}.$$

D'où la même conclusion que précédemment. En outre, avec E constant, N est constant, autrement dit les rampes seront parcourues à la même allure que les paliers.

Coupleur. — L'interposition des résistances de démarrage et de réglage; les modifications de l'excitation pour faire varier la vitesse; le groupement des moteurs pour modifier l'énergie absorbée et le renversement du courant dans les induits pour intervertir le sens de propulsion, se font par l'intermédiaire d'un commutateur spécial appelé *coupleur* ou *combinateur* (fig. 401, 402, 403). Le coupleur comporte deux cylindres isolants,

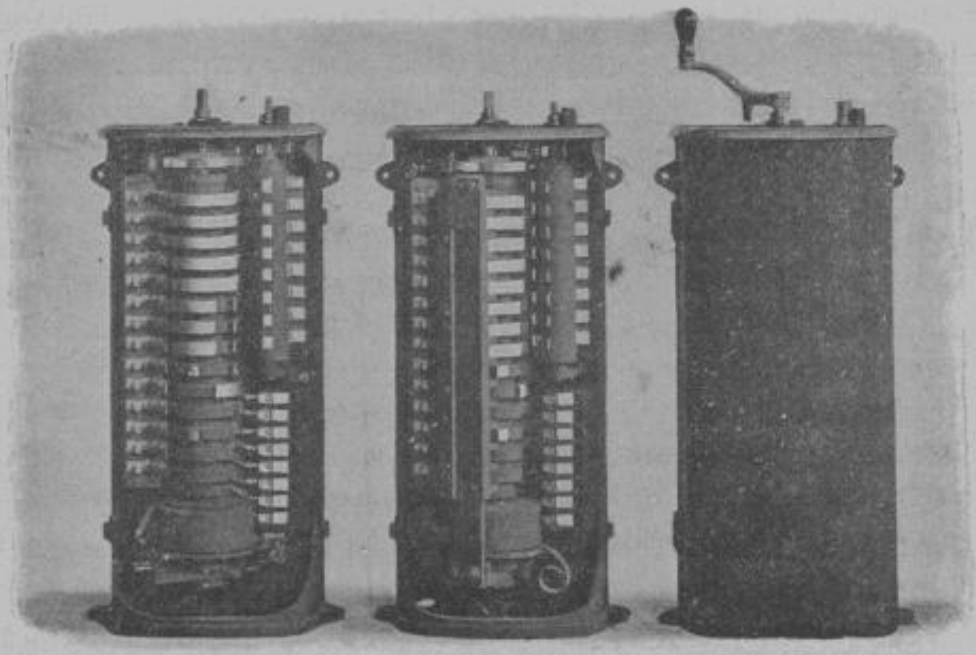


Fig. 401. Fig. 402. Fig. 403.

garnis d'arcs métalliques, que touchent les balais métalliques raccordés aux divers organes à réunir : résistances, inducteurs, induits. Un *souffleur magnétique*, constitué par l'armature

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

allongée d'un électro-aimant, envoie son flux magnétique sur les étincelles d'extra-courant, de manière à provoquer plus rapidement leur rupture; des cloisons isolantes sont interposées entre les balais pour empêcher la production d'étincelles latérales. Les cylindres se déplacent au moyen de manivelles amovibles et l'ensemble des organes est protégé par une enveloppe métallique. Le petit cylindre permet d'effectuer les renversements de marche, la suppression de l'un ou l'autre des moteurs et le freinage. Les manivelles sont munies d'un index se déplaçant devant des points de repère, de manière à assurer l'invariabilité des diverses positions des cylindres. Un dispositif mécanique de blocage empêche, d'ailleurs, le déplacement du cylindre de renversement de marche, avant que l'autre ne soit arrivé au cran de repos. Cette précaution est nécessitée par le fait que la commutation opérée brusquement pendant la marche, aurait pour effet d'orienter la force contre-électromotrice des moteurs dans le même sens que la force électromotrice du circuit d'alimentation, ce qui donnerait lieu à un court-circuit extrêmement dangereux.

En outre, l'asservissement mécanique des deux cylindres est tel, que le déplacement du grand cylindre vers les positions de freinage entraîne automatiquement la rotation du petit cylindre dans la position convenable de permutation des connexions de l'induit.

Un coupleur est installé sur chacune des plates-formes d'avant et d'arrière, pour permettre la marche dans les deux sens sans retournement de la voiture.

Enfin, l'équipement se complète par des lampes à incandescence, commandées par un commutateur spécial et, si les circuits sont aériens, par un parafoudre.

Précautions à prendre au démarrage. — La manœuvre du coupleur doit être faite avec précaution, en s'arrêtant un instant sur chaque cran, de manière à permettre à la force contre-électromotrice d'acquérir une certaine valeur avant de supprimer les résistances de démarrage. Les manœuvres précipitées ne font

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gagner que peu de temps, tout en consommant beaucoup plus d'énergie qu'il n'est nécessaire.

§ 2. — Alimentation directe.

Divers systèmes. — Dans les systèmes d'alimentation directe, le courant est amené, soit par un conducteur aérien sur lequel appuie une roulette, un rouleau, un archet ou un frotteur, soit par des contacts superficiels que touche un contact glissant, soit enfin par des conducteurs nus souterrains, posés à l'intérieur d'un caniveau. Dans les deux premiers cas, ce sont les rails qui canalisent le retour du courant, la liaison entre les moteurs et les rails se faisant par les essieux et les roues. Si les courants utilisés sont triphasés, une phase est parfois confinée dans les rails. Cependant, la prise de courant aérienne *triple* ne présente pas une difficulté insurmontable, comme des essais à grande vitesse, effectués en Allemagne, l'ont démontré. Dans le cas du caniveau, on n'utilise généralement pas les rails au retour du courant, c'est-à-dire qu'on ne les connecte pas à l'un des pôles de la source d'électricité, à cause des dangers de court-circuit résultant de leur rapprochement excessif de l'appareil captant le courant sur l'autre pôle.

Conducteurs aériens. — C'est le système à conducteur aérien ou *à trôlet* qui l'emporte de beaucoup, en raison de l'économie d'installation et d'exploitation qu'il réalise. Nous nous en occuperons plus spécialement. Le voltage continu généralement admis est de 550 volts.

Poteaux et consoles. — Le conducteur aérien est suspendu à une hauteur de 7 m environ, tout au moins dans les agglomérations, par l'intermédiaire de poteaux le plus souvent métalliques, dont le pied est encastré dans du béton, et distants de 35 mètres en ligne droite.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsque les circonstances locales s'opposent à l'érection de poteaux, la suspension se fait par l'intermédiaire de fils en fer galvanisé ou en bronze tenace, venant s'attacher à des rosaces solidement fixées dans les murailles, après interposition de tendeurs isolants (fig. 405). Les deux pièces du tendeur (fig. 404) sont, à cet effet, noyées dans une substance isolante solide, ambroïne, etc. (isolateur en boule). Leur forme assure une grande résistance mécanique.

Dans les courbes, le conducteur suit les côtés d'un polygone, dont les points supportés constituent les sommets. Leur distance doit être telle que le plus grand écartement d'un côté du polygone formé par le fil, avec l'arc de la courbe circonscrite, ne dépasse pas 0,25 à 0,30 m.



Fig. 404.



Fig. 405.

Suspension de l'isolateur. — L'isolateur de ligne s'attache à la console, par l'intermédiaire de fils en fer galvanisé ou en bronze, ce qui procure une suspension élastique.

Isolateur. — L'isolateur comporte essentiellement un chapeau en bronze C (fig. 406, 407), pourvu de branches d'attache B,

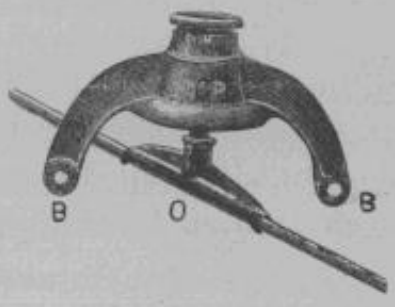


Fig. 406.



Fig. 407.



Fig. 408.

percé verticalement d'un trou cylindrique, pourvu d'un épaulement supportant un boulon isolé (fig. 408), taraudé à sa partie inférieure. Dans les courbes, l'isolateur est soutenu d'un côté seulement (fig. 407). La fixation de l'isolateur peut être sim-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plifiée par le dispositif représenté figure 409, dans lequel le fil est simplement passé dans les crochets terminant les bras. Les fils de soutien se fixent eux-mêmes à des colliers assujettis sur la console avec interposition d'un isolant, ou rattachés à des ancrages. Une double isolation existe donc partout.

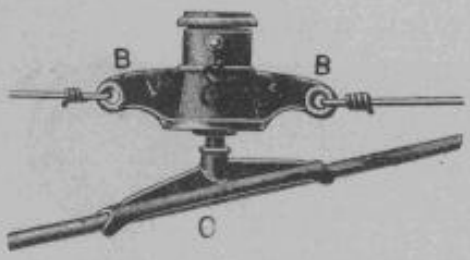


Fig. 409.

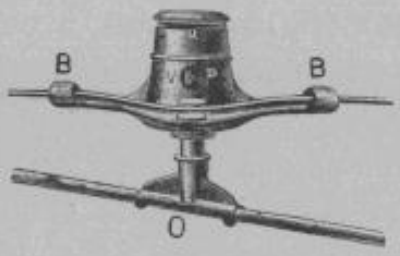


Fig. 410.

Oreille. — L'extrémité filetée du boulon vient se visser dans une pièce allongée en bronze O (fig. 406, 407, 409, 410), appelée oreille, pourvue à sa partie inférieure d'une rainure étamée, dans laquelle le conducteur d'amenée est soudé. Actuellement on supprime le soudage. Le fil est pincé entre deux pièces R et R′ (fig. 411), que l'on rive. La pince R se place contre la partie concave de la courbe affectée pas le fil de trôlet.

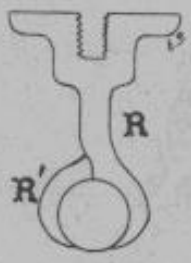


Fig. 411.

Conducteur de prise de courant. — Le conducteur amenant le courant à la voiture, est ordinairement de section circulaire, en cuivre ou bronze phosphoreux ou silicieux de haute conductibilité. Son diamètre ne dépasse pas 11 millimètres. Afin de réduire le nombre des jonctions, on le fournit sous des longueurs très grandes, atteignant 2,7 km. Il est tendu de manière que la flèche ne dépasse pas 40 centimètres, soit à environ 10 kg par mm^2 à 18°.

Artères. — Le conducteur de prise de courant doit être alimenté par des artères présentant une chute de tension uniforme. Afin d'éviter qu'un court-circuit dans la ligne ne compromette le fonctionnement total de celle-ci, on subdivise parfois le fil de trôlet en sections de 4 à 500 mètres de long, réunies par des fusibles et alimentées individuellement par les artères.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Trôlet. — Axial. — Sur le dessous du fil s'applique une roulette en laiton (fig. 412), consolidée latéralement par des nervures radiales, qui ont l'avantage de maintenir les joues de la gorge en place, au moment où le fond de celle-ci est usé à jour. Une buselure conductrice en graphite garnit le moyeu de la roulette, pour adoucir les frottements. La roulette tourne sur un axe supporté par une fourche, et la communication électrique est améliorée par deux lames de ressort rivées aux bras de la fourche (fig. 413).



Fig. 412.

Ainsi disposé, le trôlet, supporté par une perche métallique fixée sur le toit de la voiture, ne peut, sous peine de déraillement, se déplacer que très faiblement par rapport à l'axe du fil. Celui-ci doit donc se trouver dans l'axe de la voie (d'où le nom de trôlet axial). Cette nécessité entraîne l'emploi de très longues consoles, dont l'aspect paraît peu satisfaisant au début de l'installation, quand on n'y est pas habitué.



Fig. 413.

Dickinson. — Pour remédier à cet inconvénient, réduire le coût des potences et aussi afin de permettre de donner au contour polygonal qu'affecte le fil dans les courbes, des angles plus aigus, M. Dickinson a imaginé de rendre le plan vertical de la roulette mobile avec sa fourche autour d'un axe vertical (fig. 414). La ligne aérienne peut alors être entièrement reportée le long de la voie.

Mais l'expérience a démontré que ce système n'est pas sans présenter de sérieux inconvénients. Il nécessite, en effet, des perches de trôlet plus longues et un effort plus grand sur la poulie de contact (7 à 8 kg au lieu de 5 à 6 kg pour le trôlet axial). Il en résulte une fatigue beaucoup plus importante pour le fil et les suspensions ; d'autre part, les détériorations produites en cas de dérapage du trôlet (et ceux-ci sont beaucoup plus fréquents qu'avec l'axial), sont plus importantes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

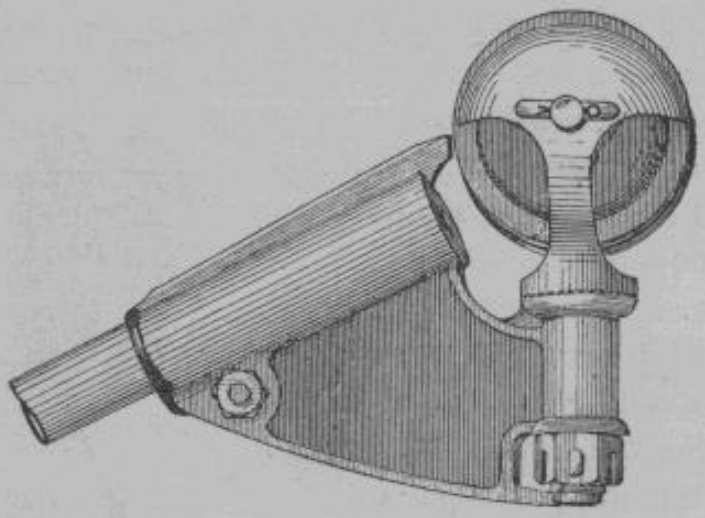


Fig. 414.

Le métal constituant le galet doit être plus doux que celui du fil de service. La meilleure matière pour le galet est le cuivre jaune. On le fixe avantageusement dans des coussinets en bronze phosphoreux.

Archet. — L'irrégularité de la ligne aérienne peut encore être accentuée, si l'on capte le courant au moyen d'un *archet*. La roulette fait place à une traverse horizontale (fig. 415), recouverte à la partie supérieure d'un alliage mou, destiné à réduire l'usure du fil, et supportée par deux tiges élastiques attachées à l'extrémité du mât. Ce système est très employé dans certains pays : Allemagne, Autriche, Hongrie....

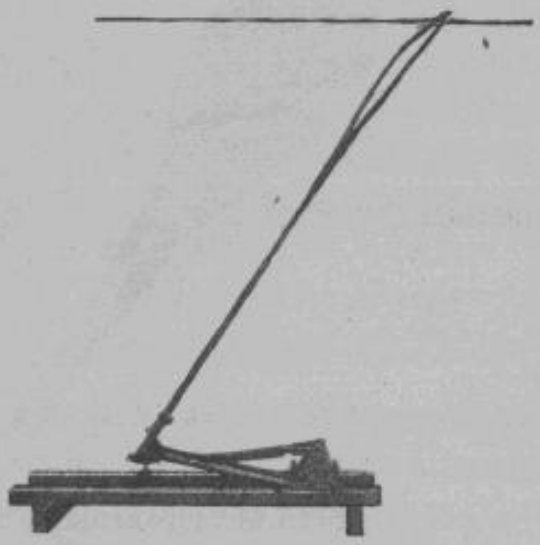


Fig. 415.

Mât. — Le mât supportant la fourchette, d'une longueur d'environ $3^{m},50$ est un tube conique en acier, articulé à la partie inférieure autour d'un axe horizontal monté sur un châssis, qui peut lui-même pivoter autour d'un axe vertical (fig. 415). Un système de ressorts à boudin sollicite le mât à se relever et à appliquer le galet de roulement sur le fil avec les forces indiquées ci-dessus.

Eclissage électrique des rails. — Afin d'éviter la production de dangereux phénomènes électrolytiques sur les conduites métalliques

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

voisines enfouies dans le sol, il est nécessaire de donner aux rails la conductance la plus élevée possible. L'éclissage ordinaire doit être complété par un éclissage électrique, dont la résistance ne doit pas dépasser celle de 0,5 à 1 m de longueur de rail.

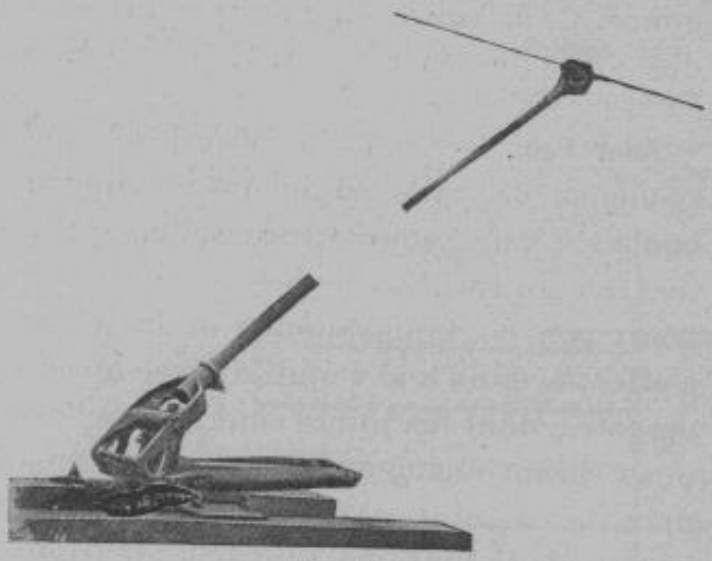


Fig. 416.

On peut la prendre égale à 0,0001 à 0,0002 d'ohm.

Cet éclissage peut se réaliser en serrant énergiquement des fils de cuivre dans les rails. Quand les parties cylindriques C

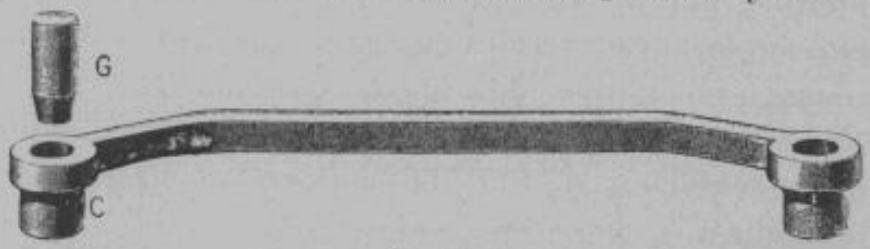


Fig. 417.

(fig. 417) ont été introduites dans les trous forés dans l'âme du rail, on y chasse de force des goupilles G.

Dans ces dernières années on a préféré braser, au moyen du chalumeau oxydrique, le fil de connexion (12 mm ou 2 de 8 mm aux Tramways bruxellois).

Ce gros fil, d'une certaine valeur, tente les voleurs; aussi doit-on, dans les lignes écartées ou les milieux industriels, les protéger par l'éclissage mécanique, en le recouvrant entièrement par celui-ci. La fig. 418 donne la vue d'une éclisse de ce

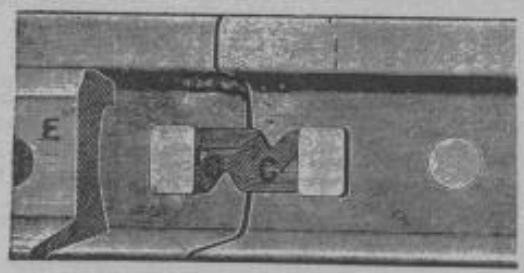


Fig. 418.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

genre. C, *c*, lames en cuivre réunissant deux masses pourvues des cônes de pénétration. E éclisse mécanique.

Joint Falk. — Dans le joint Falk, on soude directement les tronçons de rails adjacents au moyen d'une masse de fonte, coulée à une température telle, qu'elle fasse corps avec la matière du rail. La coulée de ce bloc de fonte, dont le poids est d'environ 60 kilogrammes et la longueur de 35 centimètres, s'effectue dans une coquille fixée autour du rail par des étriers clavetés, dont les joints sont lutés à l'argile. L'outillage se compose essentiellement d'un cubilot mobile avec soufflerie. Le prix de ce joint est très élevé. En outre, les propriétés mécaniques de la fonte ne sont pas identiques à celles de l'acier, de manière que le joint s'use inégalement et la voie devient irrégulière à la longue, au point de jonction, d'où résultent un mauvais roulement et, finalement, le bris du rail.

La chute totale de voltage dans les rails ne doit pas être beaucoup supérieure à 7 volts environ. Aussi, indépendamment de l'éclissage électrique, doit-on souvent améliorer la conductance du retour aux environs de l'usine génératrice, en doublant les rails de roulement de files de vieux rails éclissés électriquement, eux aussi.

De plus, pour rendre le moins nuisible possible l'influence des connexions mauvaises et pour augmenter la conductibilité, on recommande d'installer, tous les 50 ou 60 m, des connexions transversales entre les deux files de rails de la voie.

Combinaisons de circuits réalisés par le coupleur. — Les coupleurs actuels sont caractérisés par le grand nombre de transitions par résistances en série qu'ils admettent, avant d'appliquer aux deux moteurs eux-mêmes montés en série, la différence totale de potentiel. En outre, on ne shunte généralement plus les inducteurs comme naguère, pour augmenter la vitesse, et l'on se sert largement des moteurs comme générateurs pour freiner.

Nous décrirons un type qui se rencontre fréquemment et qui présente 9 crans de marche et 7 de freinage.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au cran 1 (fig. 419 rangée inférieure), les 6 résistances partielles qui mesurent respectivement 3; 3; 3; 1,75; 1,05 et 0,35 en tout 12,55 O et le souffleur magnétique sont mis en série avec les deux moteurs, dont la résistance totale est de 0,4 O; cran 2, les 3 premières résistances sont mises en court-circuit; 3, idem pour les 4 premières; 4, idem pour les 5 premières; 5, tout le rhéostat est en court-circuit. Nous trouvons alors deux combinaisons de passage comportant la position 2, puis celle dans laquelle le second moteur est coupé; cran 6, les trois dernières résistances sont seules en circuit avec les deux moteurs placés en dérivation; 7, on établit en court-circuit la 4e résistance; 8, la 5e résistance est mise en court-circuit; 9, tout le rhéostat, y compris le souffleur, est en court-circuit. (Sur la fig. 419, le court-circuit du cran 9 d donc être prolongé d'une division.)

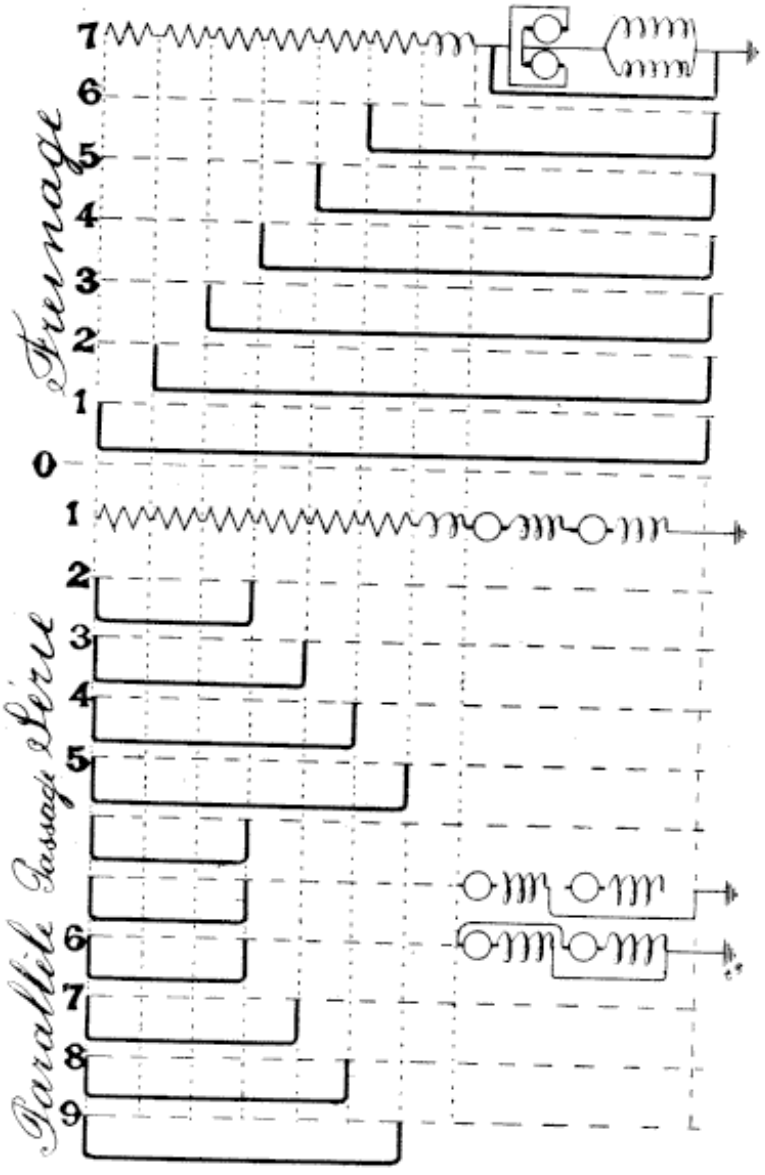


FIG. 419.

Si l'on a déplacé la manivelle en sens inverse, l'alimentation est coupée et l'on freine. Les deux moteurs, en parallèle, tra-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vaillent : cran 1, sur toute la résistance de démarrage, les induits étant intervertis; cran 2, sur toutes les résistances, sauf la première; cran 3, idem sauf les deux premières; 4, idem sauf les trois premières; 5, idem sauf les quatre premières ; 6, idem sauf les cinq premières; enfin 7, les moteurs sont en court-circuit.

Dans la marche à un moteur, obtenue par déplacement du petit cylindre, nous retrouvons les 7 positions du freinage, un des moteurs étant hors circuit et seulement les 4 positions de marche en parallèle,

Les résistances sont constituées par des plateaux formés de bobines de rubans en tôles d'acier enroulés avec interposition d'amiante. Chaque plateau portant ses bornes de connexion, est

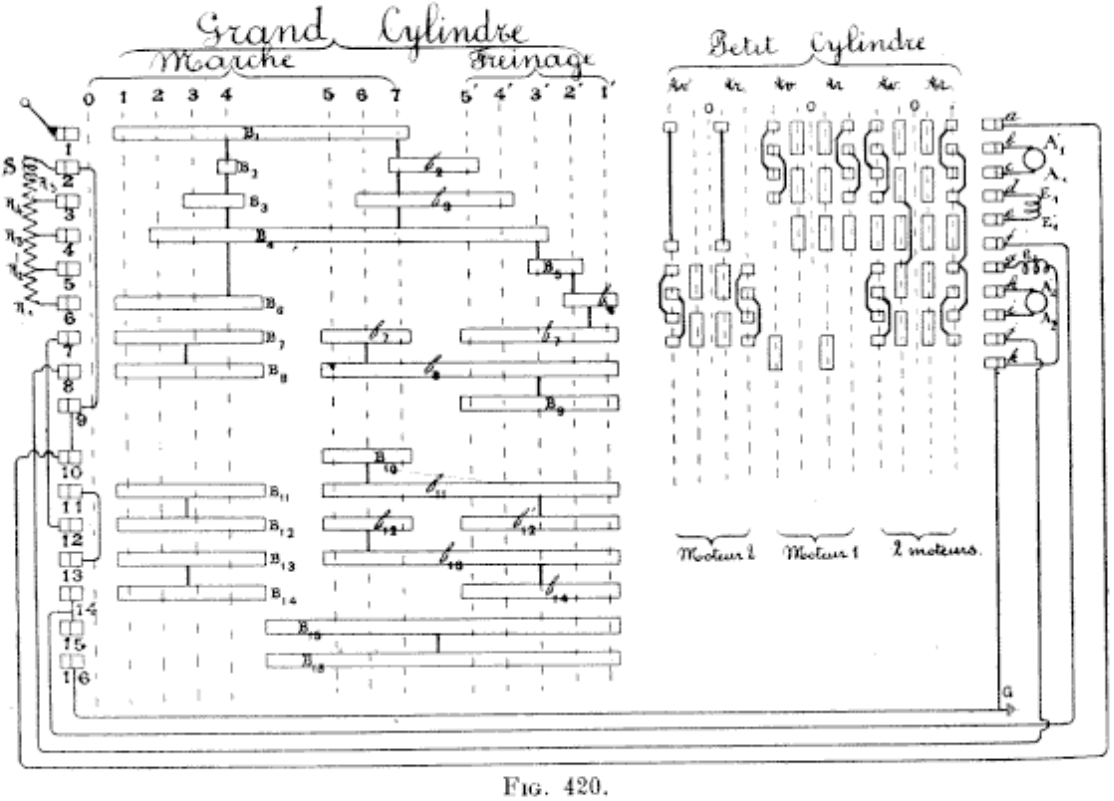


Fig. 420.

fixé par l'intermédiaire d'une bague en micanite sur un tube rattaché à l'enveloppe en tôle qui protège le tout. Le ruban d'acier est légèrement cintré, ce qui empêche tout glissement des spires l'une sur l'autre. Les bobines adjacentes, enroulées en sens inverse pour diminuer la selfinduction de l'ensemble,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont séparées l'une de l'autre par de larges intervalles d'air, assurant une bonne ventilation, que complètent les ouvertures placées dans les couvercles de l'enveloppe. Les résistances se fixent sous la voiture.

La figure 420 montre la manière dont les divers organes sont réunis entre eux et aux coupleurs. Dans des appareils récents, la suppression d'un des moteurs se fait en déplaçant à la main un balai du petit cylindre.

Une seule paire de manivelles sert alternativement pour les coupleurs des deux plates-formes, afin d'éviter que des voyageurs ne puissent manœuvrer l'appareil d'arrière. Les manivelles ne peuvent d'ailleurs être retirées que si elles ont été au préalable amenées dans la position de repos.

Appareils accessoires. — La liaison du trôlet aux souffleurs magnétiques se fait par l'intermédiaire de deux interrupteurs généraux C, C′ (fig. 421), un fusible F, un parafoudre P et sa bobine de réaction B. Le circuit se subdivise alors en deux dérivations allant aux souffleurs.

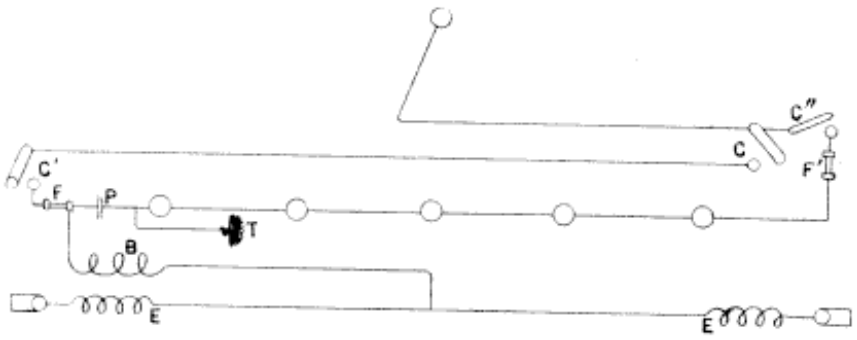


Fig. 421.

Les interrupteurs C et C′, montés en série, sont disposés au plafond des plates-formes, à portée du conducteur de la voiture, qui a pour consigne de les ouvrir chaque fois qu'il quitte son poste de service.

Enfin, l'éclairage de la voiture est assuré par un circuit d'éclairage comportant cinq ou dix lampes à incandescence à 110 volts, montées en deux séries, protégées par un fusible F′ et raccordées à la terre du parafoudre. Quand il existe dix lampes, celles-ci sont alternées de manière à assurer l'éclairage de toute la voiture quand l'un des circuits dérivés est interrompu.

Si le courant vient à manquer, le conducteur doit mettre la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

manivelle principale au cran de repos, fermer l'interrupteur C'' et attendre que la lumière des lampes l'avertisse que le fil est redevenu actif. Afin d'éviter que tous les véhicules ne démarrent en même temps, surchargeant ainsi l'usine et les circuits, les conducteurs des voitures ne doivent se remettre en marche que dans un certain ordre prévu une fois pour toutes.

La consommation d'énergie peut descendre à 26 w-h par tonne-kilomètre et se tient souvent entre 40 et 50.

Le 3e rail. — Lorsque les courants deviennent très intenses, comme dans le cas des métropolitains, la section des conducteurs et par suite leur poids, acquièrent une importance telle, qu'il ne faut plus songer à les maintenir suspendus. On recourt alors à un rail d'acier R (fig. 422) servant de conducteur de retour et placé le long de la voie. Un frotteur (sabot) F capte le courant. Le rail s'attache sur un support en fonte S, coiffant un isolateur I fixé, d'autre part, sur un pied P boulonné dans une traverse. Des madriers B_1, B_2, protègent les agents de la voie contre un contact intempestif.

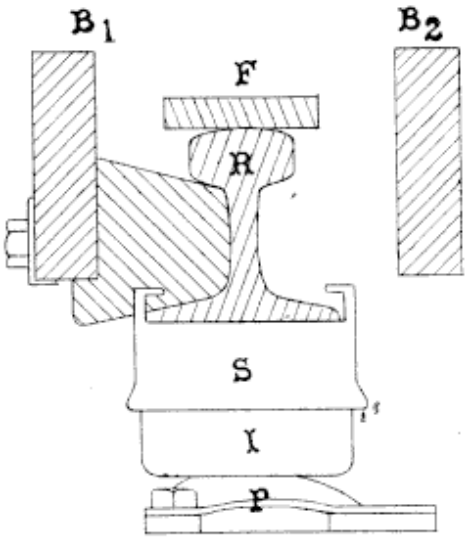


Fig. 422.

Dans les nouveaux systèmes actuellement employés aux Etats-Unis (1), le conducteur est un rail d'acier à double bourrelet, suspendu à des chaises ou supports en fonte, par l'intermédiaire d'isolateurs de forme spéciale (fig. 423, 424 et 425).

La surface inférieure du rail, située à 70 mm au-dessus du niveau supérieur des rails porteurs, s'offre, sur toute sa lon-

(1) Em. Uytborck. *Notes prises au cours d'un voyage d'études aux Etats-Unis d'Amérique.* Bulletin technique de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole polytechnique de Bruxelles, n° 4 de 1908, p. 138.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gueur, au contact des appareils capteurs de courant fixés aux véhicules électromoteurs. Entre les supports en fonte, espacés de 3 à 3,30 m, la partie supérieure et les parties latérales du rail

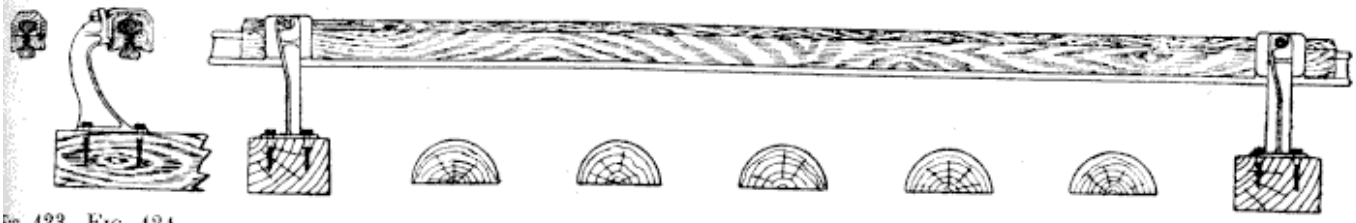


Fig. 423. Fig. 424.

Fig 425.

sont recouvertes d'une protection isolante : en l'espèce, une gaine de sapin en trois pièces.

Les isolateurs sont en grès vitrifié. Ils sont constitués de deux parties identiques, emprisonnant le troisième rail. Chacune de ces parties présente latéralement une cavité en forme de T renversé, dans laquelle vient se placer une saillie appropriée du support en fonte ou l'extrémité de la ferrure de serrage des deux parties de l'isolateur. La partie médiane de cette ferrure se loge dans une rainure pratiquée au sommet de l'isolateur. La queue filetée de la ferrure passe au travers d'un trou foré à la partie supérieure de la chaise en fonte, où elle est maintenue par un écrou de serrage. Ce système a l'avantage d'être simple.

Le caniveau.— L'emploi des conducteurs aériens a rencontré dans quelques grandes villes une opposition motivée par le souci de l'esthétique des rues. On a donc dû recourir à des systèmes dans lesquels le conducteur est souterrain. Avec le caniveau, les conducteurs d'amenée du courant, poutrelles en fer, sont portés par des isolateurs spéciaux à l'intérieur d'un caniveau en béton renforcé par une ossature en fer. Une charrue fixée aux voitures s'introduit dans la fente longitudinale du caniveau, et deux frotteurs en fonte, tirés par des ressorts, viennent s'appliquer sur les conducteurs par lesquels se font exclusivement l'arrivée et le départ du courant.

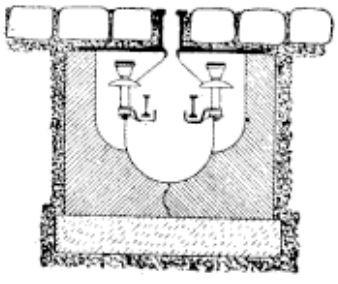


Fig. 426.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le système à caniveau est extrêmement coûteux de premier établissement et donne lieu à des frais d'entretien et de réfection très élevés.

Contacts superficiels. — Pour s'affranchir du coûteux caniveau, on a imaginé des systèmes dans lesquels le courant est capté sur des pavés métalliques à fleur de sol, placés dans l'axe de la voie. Par le jeu automatique d'un commutateur, ou par l'attraction d'un noyau magnétique, les pavés ne doivent être mis en rapport avec les générateurs d'électricité, qu'au moment où la voiture les couvre, ceci par raison de sécurité pour la circulation et pour limiter les dérivations. Ces dispositifs sont, en général, compliqués ; la sécurité qu'ils présentent n'est pas absolue; leur coût est intermédiaire entre celui du caniveau et du trôlet ; on les emploie peu.

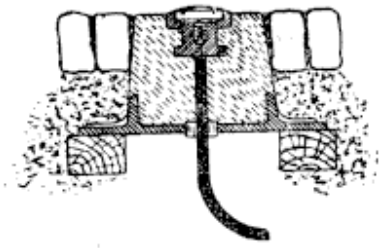


FIG. 427.

§ 3 — Alimentation indirecte.

TRACTION PAR ACCUMULATEURS.

Les divers procédés que nous venons d'étudier jusqu'ici, ne sont pas toujours applicables, soit par suite de circonstances locales, soit à cause des exigences des municipalités.

On recourt alors à la traction par accumulateurs. Chaque voiture porte, soit sous les banquettes, soit sous le châssis, une batterie pour l'alimenter. On peut aisément se rendre compte, de ce que cette solution est onéreuse par rapport aux autres modes d'alimentation. Le poids d'accumulateurs auquel on doit consentir, atteint en effet à peu près les 0,30 du poids total de la voiture en ordre de marche, d'où majoration de la puissance dans le rapport $1/0{,}7 = 1{,}43$. Mais, en outre, le rendement des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

accumulateurs en énergie, aux régimes variables auxquels ils sont soumis dans cette application, ne dépasse guère 0,7 de sorte que la puissance à dépenser devient 1,43/0,7=2 fois celle nécessaire dans l'alimentation directe.

Deux cas sont à distinguer, suivant que les éléments se chargent lentement ou rapidement.

Charge lente. — Les accumulateurs ne peuvent, aux régimes lents, être chargés dans la voiture à cause de la longue durée de cette opération. Il faut les en retirer, d'où manutention pénible et coûteuse. En outre, des batteries de rechange sont nécessaires; on les charge, pendant que les autres sont en service; l'immobilisation des capitaux est considérable.

Charge rapide. — Pour éviter ces inconvénients, on a été amené à utiliser des batteries placées à demeure dans les voitures, mais qui doivent être, dès lors, susceptibles d'être rechargées en un temps fort court, 15, 10 et même 5 minutes pendant l'arrêt aux terminus.

On arrive à ce résultat en donnant aux plaques une très grande surface et en les préparant électrolytiquement sans oxydes rapportés. Ces derniers, par le grand foisonnement qui résulte des débits excessifs, se désagrégeraient en effet rapidement. Les accumulateurs sont chargés, en les soumettant à une tension constante de 3 volts environ par élément. Le courant, très intense au début, va en s'affaiblissant au fur et à mesure de l'accroissement de la force contre-électromotrice.

Par exemple, la ligne La Madeleine (Paris) à Courbevoie et Neuilly, d'une longueur de 18 km, avec quelques rampes de 0,015 et même 0,020 est parcourue par des voitures pour 52 voyageurs, pesant en ordre de marche 14 T et pouvant remorquer une voiture de 7 T. Les automotrices sont pourvues d'une batterie de 200 éléments Tudor à charge rapide, pesant chacun 24 kg, dont 18 kg de plaques et 4,5 kg d'acide, chargés au terminus au moyen d'une prise de courant à cordon souple, sous l'intensité moyenne de 120 ampères, pendant 7, 8 ou 10 à 12 minutes selon

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'état de la batterie. Les éléments sont soudés et logés à poste fixe sous les banquettes en 4 rangées de 50 éléments.

Calcul de la capacité nécessaire. — Prenons le cas d'une automobile de route (1), consommant par tonne-kilomètre environ 85 watts-heures (2), et que l'on équipe, d'ordinaire, au moyen de 44 éléments, fournissant la différence de potentiel moyenne disponible aux bornes, d'à peu près 85 volts. Il en résulte que la dépense est d'environ 1 A-H par T-km ou 0,001 A-H par kg-km.

Soit K le rapport du poids de la voiture en ordre de marche, au poids P kg de la batterie. La voiture pèsera au total KP kg et, puisque 1 kg-km exige 0,001 A-H, elle nécessitera 0,001 KP A-H pour parcourir un kilomètre.

Si, d'autre part, la capacité d'un élément est Q par kg total, chaque élément, qui pèse P/44, aura une capacité QP/44 A-H. Elle permettra un trajet m km donné par l'équation $QP/44 = 0{,}001\ KP\ m$ ou $Q = 0{,}044\ Km$ ou encore $m = 22{,}7\ Q/K$.

Dans les voitures ordinaires, K est généralement compris entre 3 et 3,5. Si nous prenons de bons accumulateurs qui fournissent environ 10 A-H par kg total, la voiture pourra parcourir pour $K = 3{,}25$

$$\frac{22{,}7 \cdot 10}{3{,}25} = 70 \text{ km}.$$

Coupleur. — Le coupleur utilisé dans les voitures est analogue à celui des tramways à trôlet, sauf qu'il ne comporte en général qu'un seul cylindre. FF (fig. 428) sont les fusibles protégeant la batterie, A l'ampèremètre, V le voltmètre, A_1 et A_2 les induits et I, I, les inducteurs des moteurs, S le shunt des inducteurs, enfin R la résistance de démarrage.

Dans la position 1, les moteurs sont placés en tension avec R : c'est le démarrage. Au cran 2, le rhéostat est supprimé par mise

(1) F. Loppé, *Capacité à donner aux batteries d'accumulateurs des voitures électriques*. (Electricien, t. XX, 1900, p. 10).

(2) Terrain plat, excellent macadam.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

en court-circuit et reste dès lors supprimé. Cran 3 : les deux induits sont en série, les deux inducteurs en dérivation. Cran 4 : les deux moteurs (induits et inducteurs) sont en dérivation l'un sur l'autre. Cran 5 : les deux induits sont placés en dérivation, de même que les deux inducteurs en outre shuntés.

Si, au lieu de tourner le coupleur dans le sens 1, 2, 3, ... on tourne en sens inverse, on produit le freinage électrique, puis le renversement de la marche. Cran 1', premier freinage : les deux induits, en dérivation l'un sur l'autre, ainsi que les deux inducteurs shuntés, sont mis en circuit avec R, les inducteurs restant traversés par un courant de même sens que précédemment; la batterie est coupée.

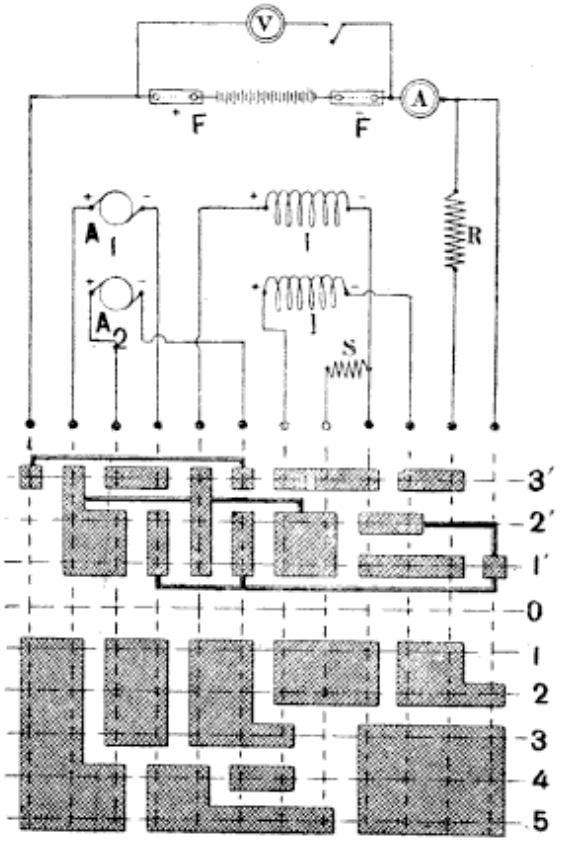


Fig. 428.

Cran 2', second freinage : idem, sauf que R est supprimée. Cran 3', marche arrière : la batterie est en circuit avec le rhéostat R et les deux moteurs, dont les induits sont inversés.

---

§ 4. — Avant-projet d'un tramway électrique.

On devra, en tout premier lieu, dresser un plan d'ensemble du réseau et les profils cotés en long des lignes à construire. Le type des voitures à employer sera arrêté, puis on déterminera la vitesse commerciale, la fréquence des départs sur chaque ligne et la durée des stationnements des voitures aux extrémités de ces lignes,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nombre de voitures nécessaire. — Soient : L km la longueur de la ligne, V km à l'heure la vitesse moyenne des voitures, D minutes la durée de marche pendant un parcours aller ou retour. On met en marche une nouvelle voiture toutes les t minutes. La durée totale d'un trajet complet de la ligne, aller et retour, sera

$$\Delta = 2D + 2t.$$

t étant l'intervalle de temps en minutes séparant les départs, il faudra $\Delta/t = n$ voitures en service.

Chaque voiture parcourt continuellement la ligne. En un trajet complet aller et retour, elle fait 2L km. Or, elle effectue en une heure $60/\Delta$ trajets complets, soit un parcours $60 \times 2L/\Delta = m$ km.

Puisqu'en régime, les n voitures se trouvent exactement dans ce cas, le parcours total pendant chaque heure est de mn kilomètres-voitures.

Exemple numérique. — Soit une ligne de 11 kilomètres, parcourue par des voitures roulant à la vitesse commerciale de 14 kilomètres à l'heure. La durée du stationnement t, aux terminus, sera calculée de manière à arriver à un nombre entier de voitures. $L = 11$, $V = 14$. Le temps exigé en minutes par le parcours des L km sera :

$$D = \frac{L \cdot 60}{V} = 47',2. \text{ Donc } \Delta = 2.47,2 + 2t = 94,4 + 2t.$$

Le nombre de voitures en service

$$n = \frac{94,4 + 2 \cdot t}{t} = \text{nombre entier.}$$

Si l'on veut un départ toutes les 7'30", t sera le nombre inférieur le plus rapproché de 7,5 satisfaisant à l'équation précédente. On trouve 7',26 pour 15 voitures, donc ce nombre de voitures satisfera au service de 7',5 ; $\Delta = 108',9$ dans ces conditions.

Chaque voiture parcourt en une heure

$$\frac{2 \cdot 11 \cdot 60}{108,9} = m = 12,12 \text{ km.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Effort moyen de traction. — Nous avons vu que l'effort de traction capable de vaincre la résistance au roulement d'une voiture de p kg est $f_1 = kp$, k étant, par kg, la résistance au roulement en palier et alignement droit que l'on se fixe d'avance, d'après la nature de la voie. Ce terme est donc connu.

Dans les rampes, d'inclinaison $b, b', \ldots$, un supplément d'effort bp, $b'p$, ... est nécessaire sur toute la longueur l_2, l'_2, ... de ces pentes. Ce supplément d'effort représente, par rapport au trajet total de la ligne, un effort moyen déduit de l'équation

$$2\mathrm{L}f'_2 = \Sigma bpl_2, \quad \text{d'où} \quad f'_2 = \frac{p\Sigma bl_2}{2\mathrm{L}}.$$

Σbl_2 se tirera aisément du profil de la ligne. On prendra la valeur de toutes les pentes et rampes (puisque les pentes à l'aller deviennent des rampes au retour) et on les multipliera par leur longueur; on fera leur somme. Dès lors, l'équation précédente permet de déterminer f'_2.

On répartira de même sur le trajet total, l'effort exigé par les démarrages et, éventuellement, celui nécessaire pour vaincre la résistance de l'air.

L'effort moyen total F par tonne à développer est ainsi connu.

Puissance motrice moyenne des voitures. — Si η_{lt} est le rendement de la transmission mécanique entre le moteur et les roues, le travail moyen à développer sur l'axe du ou des moteurs pour effectuer un kilomètre sera

$$\frac{1\,000}{\eta_{lt}} \mathrm{F}p \text{ kgm}.$$

Mais en une heure, une voiture parcourt m km. Le travail moyen à dépenser par *véhicule-moteur* pendant ce laps de temps sera conséquemment

$$\frac{1\,000\,\mathrm{F}pm}{\eta_{lt}} \text{ kgm},$$

soit une puissance de

$$\frac{1\,000\,\mathrm{F}pm}{\eta_{lt} \cdot 75 \cdot 3\,600} = \mathrm{W} \text{ chevaux}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Exemple. — Admettons des voitures de 10 tonnes et un effort total de 15 kg par tonne; $\eta_t = 0{,}9$. Dans le cas examiné précédemment, nous avons trouvé $m = 12{,}12$. La puissance moyenne que devront développer les moteurs sur leur axe ressortira à 7,5 chevaux, en vertu de la formule précédente. Mais il faut que les voitures puissent se remettre en marche en n'importe quel point de leur parcours, après un arrêt même accidentel. Nous calculerons donc la puissance nécessaire pour démarrer à l'endroit le plus difficile de la ligne et dans les plus mauvaises conditions, et nous équiperons les voitures en conséquence. Supposons que nous trouvions 20 chx. Nous adopterons deux moteurs de 15 chx pour être à l'abri de tout aléa.

Puissance de l'usine. — En appelant η_m et η_c le rendement des moteurs et de la canalisation, la puissance moyenne que devra développer l'usine pour alimenter chaque voiture sera

$$\frac{W}{\eta_m \eta_c} \text{ et pour les } n \text{ voitures } \frac{Wn}{\eta_m \eta_c}.$$

L'expérience prouve que, dans une ligne de quelques voitures, le rapport entre la demande moyenne et la demande maximum de puissance électrique est d'1/3. Quand on atteint le nombre de 30 à 35 voitures, le rapport devient 0,50; enfin, si une centaine de voitures circulent, le rapport atteint l'unité.

Reprenons les données précédentes : $W = 7{,}5$ chevaux; $n = 15$ voitures; $\eta_m = 0{,}7$; $\eta_c = 0{,}8$. La puissance moyenne que devra développer l'usine sera, en admettant un rendement de 0,9 pour ses dynamos :

$$\frac{7{,}5 \cdot 15}{0{,}7 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}9} = 223 \text{ chevaux.}$$

On pourra réaliser cette puissance au moyen de trois génératrices de 120 chevaux chacune; la 3e unité servira de réserve.

Possédant le plan de la ligne et connaissant la position de l'usine, on déterminera le tracé des artères, en tenant compte des conditions locales. Leur section sera calculée d'après une des règles précédemment indiquées. Comme fil de trôlet on admettra le diamètre courant maximum pour tenir compte de l'usure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XVI.

Télégraphie [1].

La télégraphie a pour objet de transmettre au loin la pensée, au moyen de signaux. On la réalise électriquement par l'intermédiaire de transmetteurs, de lignes et de récepteurs.

Le transmetteur sert à la production de courants électriques déterminés; la ligne les transmet; le récepteur, sous l'influence des courants reçus, émet des signaux qui sont traduits ou que l'on traduit en langage ordinaire.

Système Morse. — Nous nous occuperons exclusivement du système télégraphique le plus simple et d'ailleurs le plus répandu, inventé par l'américain Morse.

Transmetteur. — Le transmetteur, idéalement simple, se compose d'un *manipulateur* constitué par une réglette en cuivre AB (fig. 429) reliée à la ligne L, pivotant autour d'un axe C et sollicitée par le ressort *r* à s'appuyer d'une manière permanente sur le contact de repos F, en relation avec le récepteur G mis d'autre part en connexion avec la terre. Quand on presse sur le bouton en substance isolante D, la réglette AB bascule et quitte F, pour venir prendre contact avec le bloc E relié à un des pôles de la pile, dont

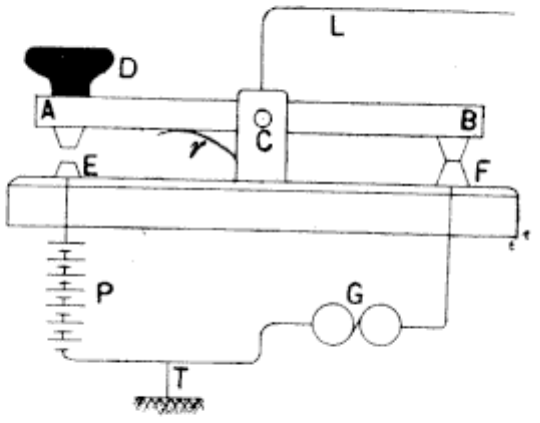


Fig. 429.

(1) Thomas, *Traité de télégraphie électrique*. Paris, Beranger.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'autre pôle est à la terre. Un courant est alors envoyé sur la ligne, traverse le récepteur en correspondance et revient par la terre.

Une bonne terre est constituée par deux plaques en zinc de 0,50 m de côté (une à chaque poste), enfouies dans le sol humide et réunies par celui-ci.

Récepteur. — Le récepteur comporte un électro-aimant H (fig. 430), mis d'un côté en rapport avec la ligne L, de l'autre avec la

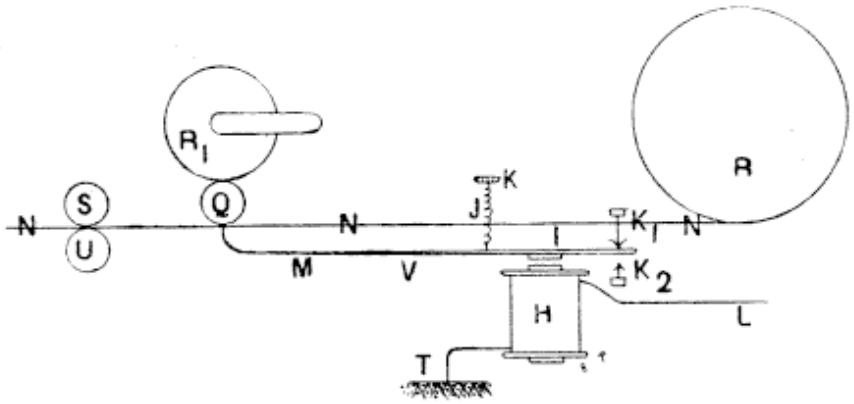


FIG. 430.

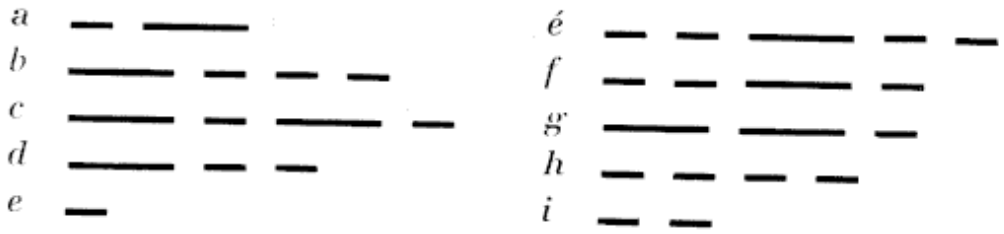
terre, comme nous venons de le dire. Son armature I peut osciller autour d'un axe V. Ses oscillations sont limitées par les vis-buttoirs K_1, K_2. Elle est sollicitée vers le haut par un ressort J, dont la tension se règle au moyen d'une vis K. Enfin, de l'autre côté de V, elle se termine par un ressort recourbé M. Une bandelette N de papier, enroulée sur un rouet R, est sollicitée à se dérouler par les rouleaux S et U, entre lesquels elle passe, lorsqu'on déclenche le mouvement d'horlogerie dont ils font partie. La bandelette N défile au-dessus de M et sous la molette Q imprégnée continuellement d'aniline par le rouleau encreur R_1.

Lorsqu'un courant d'intensité suffisante traverse H, l'armature I est attirée, ce qui fait relever M et appliquer la bandelette N contre Q, laquelle trace une ligne sur la bande, tant que l'attraction persiste.

Si le courant envoyé a été bref, c'est-à-dire si le manipulateur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

n'a fait que toucher un instant le plot de travail, la molette n'aura tracé qu'un point; si l'action du manipulateur a été prolongée, le courant aura passé pendant une durée plus grande et c'est un trait que la bandelette enregistre. Ceci suffit pour assurer la transmission du langage, à condition de représenter les diverses lettres de l'alphabet par une combinaison de points et de barres. Voici le commencement de l'alphabet Morse :



La longueur d'une barre est de trois points. L'intervalle doit être d'un point entre chaque signe, point ou trait, de deux points entre chaque lettre et de trois points entre chaque mot.

La transmission est lente; l'effet utile ne dépasse guère 25 mots par minute.

Réception à l'ouïe. — Il n'est pas indispensable que les signaux soient écrits sur la bandelette. Avec un peu d'habitude, l'employé arrive à les lire à l'ouïe et le travail y gagne, non seulement en rapidité, mais en exactitude, comme l'expérience l'a prouvé. Pour ce qui concerne la rapidité, on arrive à recevoir 27 à 30 mots.

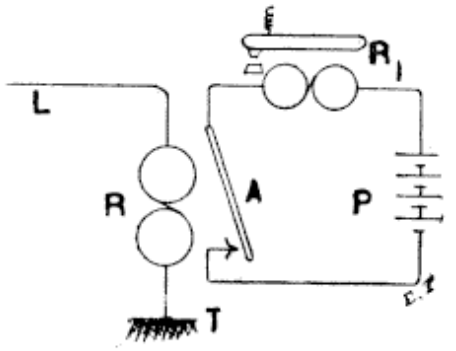


FIG. 431.

RELAIS ET PARLEURS. — Le récepteur Morse ordinaire fournit en général des sons trop faibles pour permettre d'assurer, dans de bonnes conditions, la réception à l'ouïe. On l'utilise alors comme relais. Son armature A (fig. 431) ferme, lorsqu'elle est attirée, un circuit local contenant une pile P et un *parleur* R_1.

Celui-ci est un électro-aimant E (fig. 432), dont l'armature DCB, *lourde*, émet des sons très forts. On est d'ailleurs maître

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'augmenter à volonté l'intensité du courant local qui l'actionne, et par suite l'intensité des sons. On règle le déplacement de l'armature au moyen d'un ressort R et des vis de butée I et J.

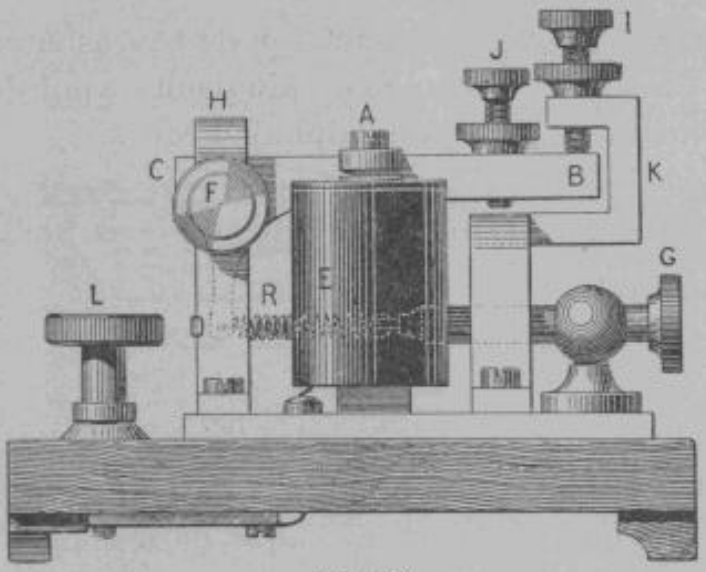


Fig. 432.

Dans les installations nouvelles des grands bureaux, le récepteur à bande disparaît pour faire place à un véritable relais, dont l'armature légère peut être aisément réglée et qui donne des contacts sûrs et stables.

Suivant le nombre de parleurs alimentés et l'intensité du trafic, la pile P comporte une ou plusieurs séries de quatre éléments, mises en dérivation l'une par rapport à l'autre. La résistance de l'appareil auditif est de 80 ohms; celle du récepteur à bande varie entre 200 et 500.

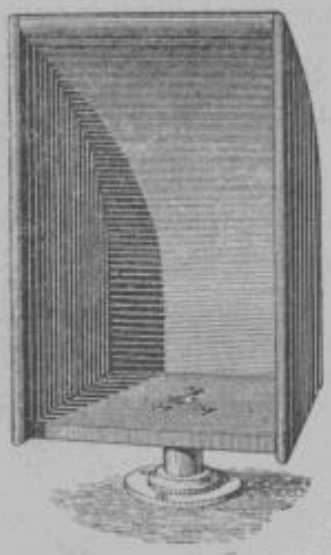


Fig. 433.

Le parleur est fréquemment placé dans une caisse de résonance (fig. 433), qui renforce les sons et les réfléchit vers l'opérateur.

Appareils d'appel. — Sonnerie vibrante. — L'appareil d'appel le plus communément employé est la sonnerie vibrante, constituée par un électro-aimant EE (fig. 434), dont l'armature A est mobile, montée sur un ressort R et terminée à son extrémité opposée par un battant B, placé près d'un timbre T.

Les fils de l'électro EE se raccordent d'un côté à la borne B_1, de l'autre à l'armature R, par l'intermédiaire de la carcasse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

métallique de l'appareil. La lame-ressort R, pourvue d'une rondelle platinée, vient appuyer au repos sur une pointe platinée, terminant l'extrémité de la vis V, en rapport, d'autre part avec la borne B_2.

Quand un courant d'intensité suffisante (en pratique 0,15 à 0,2 A) traverse les bobines de l'électro, l'armature est attirée et son battant frappe le timbre; en même temps le courant a été coupé, l'attraction a disparu et l'armature, sollicitée par le ressort, vient reprendre sa position de repos. Le courant se rétablit, l'armature est attirée derechef et ainsi de suite.

Il suffit d'une couple d'éléments Leclanché pour faire fonctionner une sonnerie ordinaire, dont la résistance est de 5 ohms.

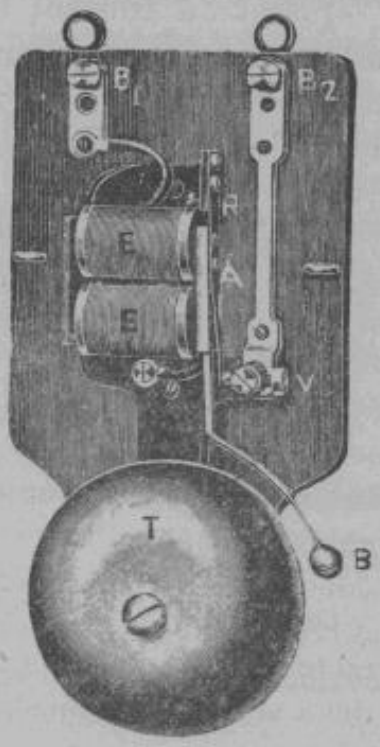


Fig. 434.

Annonciateurs. — La ligne est, en général, mise en rapport avec un annonciateur, qui a pour but de fournir une indication visuelle des appels, concurremment avec l'indication sonore. Il comporte un électro-aimant B (fig. 435), à un ou deux noyaux, pourvu d'une armature C oscillant autour d'un axe O, qui retient par un petit ergot E un *volet* F en métal non magnétique, pivotant à sa base autour d'un axe de rotation et légèrement incliné vers l'avant, de manière à basculer autour de son axe dès que l'ergot de retenue E cesse de le soutenir. Une masse pesante M facilite d'ailleurs la chute du volet. La sensibilité du système se règle au moyen d'un écrou et d'un contre-écrou D, portant

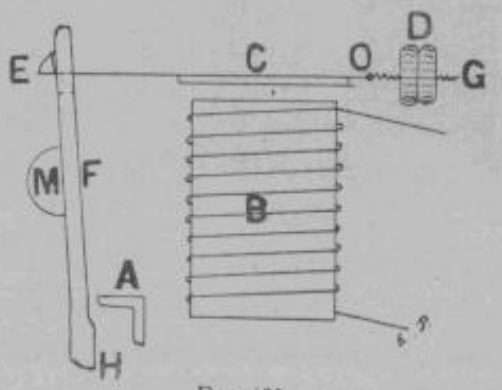


Fig. 435.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur une extrémité filetée de l'armature et équilibrant le moment de la partie CE par rapport à l'axe de rotation O.

Quand un courant traverse la bobine B, l'armature C est attirée, l'ergot E s'abaisse, laisse tomber le volet qui découvre le numéro de la ligne à laquelle l'annonciateur correspond et ferme le circuit d'une sonnerie vibrante, en appliquant la partie H contre la cornière A.

Dans les grands bureaux, on utilise comme annonciateurs de petites lampes électriques, dont l'allumage indique l'état d'occupation des circuits.

Appareils de vérification. — GALVANOSCOPE ET MILLIAMPÈREMÈTRE. — Pour s'assurer si le courant passe avec l'intensité voulue, on intercale dans le conducteur raccordant le manipulateur, un galvanoscope ou mieux un milliampèremètre.

Commutateur suisse. — Le commutateur principalement employé en télégraphie est le commutateur suisse (fig. 436), constitué par deux séries de lames parallèles en cuivre, placées à angle droit dans deux plans parallèles distants d'environ 1 centimètre. La série d'avant est horizontale, celle d'arrière verticale. Aux points de croisement des lames, les premières sont percées d'un trou cylindrique avec encoche E (fig. 437); les secondes, d'un trou conique de plus petit diamètre. On réunit une lame horizontale avec une lame verticale, au moyen d'une fiche constituée d'une partie cylindrique A (fig. 438), ayant à peu près le diamètre des trous des lames horizontales, et qui se termine, d'un côté par une pointe conique poussée par un ressort, de l'autre côté

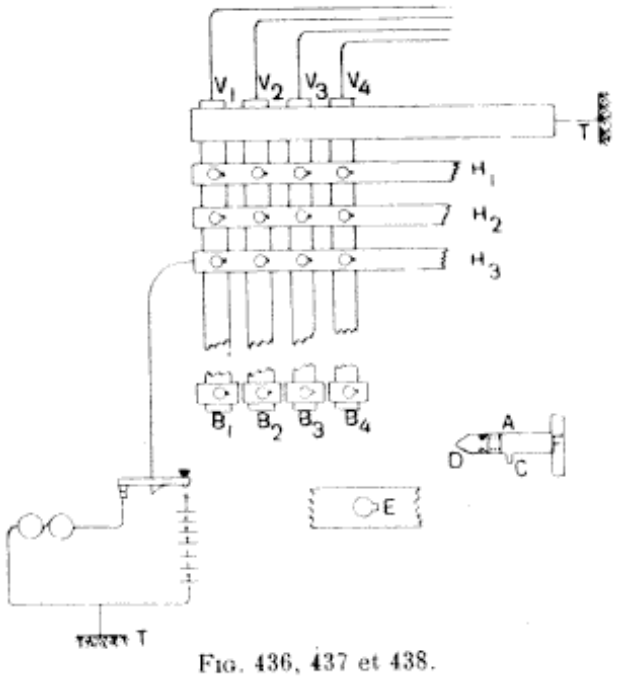


FIG. 436, 437 et 438.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par une poignée F. Une goupille C, qui peut passer dans l'encoche des trous, puis former arrêt, est fixée latéralement à une distance déterminée de F. On enfonce la fiche dans un trou, de manière que l'arrêt C dépasse la lame horizontale à l'arrière, puis on exerce un mouvement de rotation, ce qui assure l'invariabilité de la position de la fiche, dont la pointe D est, d'autre part, comprimée dans le logement conique que présente la lame verticale en regard. Une connexion intime des deux lames est ainsi obtenue. Aux lames verticales se raccordent les lignes, aux lames horizontales les appareils. La première ou la dernière lame horizontale est découpée en autant de blocs qu'il existe de lames verticales; ces blocs se relient aux annonciateurs. Dans la position d'attente, toutes les fiches sont fixées dans les blocs, établissant la communication entre les lignes et les organes d'appel.

Quand des appels sont reçus, il suffit, pour se mettre en communication avec l'appelant, de déplacer verticalement la cheville insérée dans le bloc et de l'introduire dans une lame horizontale en rapport avec un manipulateur.

Pour réunir deux lignes entre elles, par exemple les circuits aboutissant en V_1 et V_4, il suffira d'insérer deux fiches à leurs points de croisement avec une lame horizontale quelconque non raccordée à un appareil et, si l'on veut intercaler un relais dont les extrémités aboutissent à deux lames horizontales, ce seront les points de croisement de ces lames avec celles des lignes que l'on mettra à contribution.

Au-dessus du commutateur ou au-dessous si l'entrée des fils se fait par le bas, se trouve une grande plaque T mise sur terre, séparée de la série des lames verticales par une feuille de papier et formant parafoudre.

La fiche décrite ci-dessus est du système Richez. Quand on ne dispose que de simples chevilles pleines et, quand il s'agit de petits commutateurs, les lames d'arrière ne sont attachées que par leur extrémité supérieure, de manière à former ressort par elles-mêmes.

Générateurs utilisés. — Les courants télégraphiques Morse varient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entre 0,010 et 0,015 A. On les produit généralement au moyen d'éléments du type Leclanché.

Dans les grands bureaux, on recourt aux accumulateurs; enfin, dans les très grandes installations, l'énergie électrique nécessaire est engendrée par des dynamos. On donne à celles-ci des voltages appropriés aux divers groupes de lignes à desservir, et l'on a soin d'introduire, à la suite de chaque générateur, des résistances de sûreté destinées à empêcher le courant de devenir excessif en cas de court-circuit. A Chicago, par exemple, les résistances additionnelles sont comptées à raison de 2 ohms par volt fourni par la dynamo correspondante.

Translateur. — Pour éviter l'emploi de piles trop puissantes et les fortes dérivations que provoquerait l'emploi de hauts voltages, on subdivise les très longues lignes en sections desservies par des postes intermédiaires, pourvus de relais doubles appelés *translateurs*, constitués comme l'indique la figure 439.

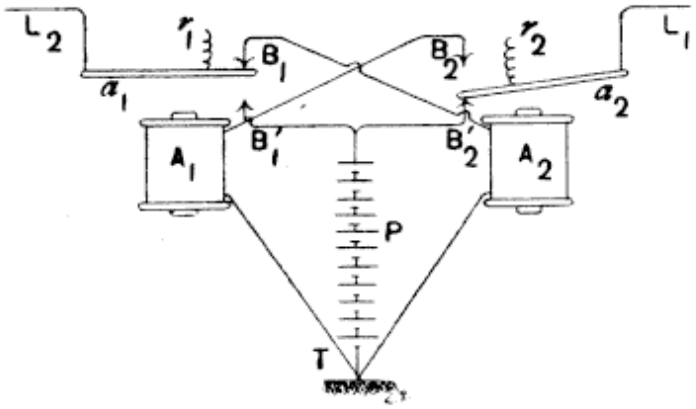


FIG. 439.

A_1 et A_2 sont des électro-aimants, raccordés d'un côté à la terre et d'autre part aux butoirs de repos B_2 et B_1, contre lesquels appuient leurs armatures a_1 et a_2, sous l'action des ressorts r_1, r_2. En face de ces butoirs, s'en trouvent d'autres B'_1, B'_2, limitant la course des armatures et reliés à une pile.

Quand un courant est transmis sur la ligne L_2, l'électro-aimant A_2 s'aimante, l'armature a_2 est attirée et vient prendre contact avec B'_2, ce qui connecte L_1 avec la pile P et envoie sur le tronçon suivant le courant d'intensité nécessaire.

Relais polarisé. — Pour se mettre à l'abri des irrégularités que peuvent causer le magnétisme rémanent et l'hystérèse des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

noyaux, la maison Siemens a adopté une disposition qui assure l'obtention d'un état magnétique bien défini de ceux-ci et, comme corollaire, maintient un fonctionnement très régulier à l'appareil. A cet effet, les deux noyaux des électros A_1, A_2 (fig. 440), sont réunis par une armature BC. Sur le milieu de celle-ci, s'applique l'extrémité polaire d'un aimant permanent D recourbé à angle droit. L'armature mobile est rattachée à la partie verticale de l'aimant permanent. Lorsqu'elle se trouve dans le plan de symétrie des électros, elle est dans un état d'équilibre instable.

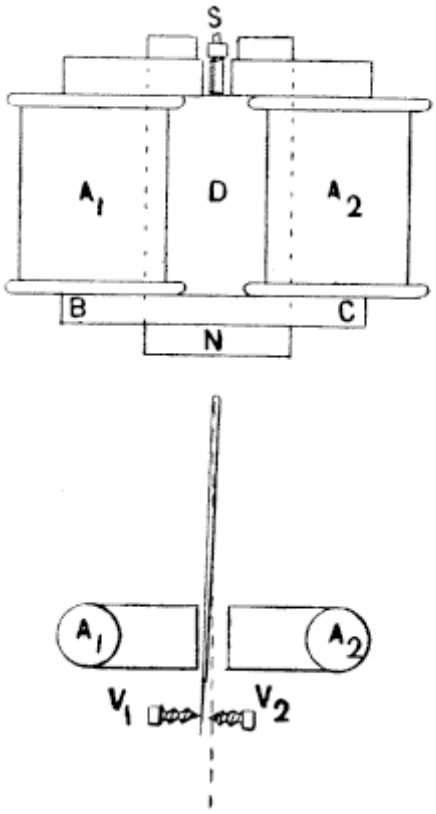


FIG. 440 et 441.

Dès lors, si au moyen d'une vis-butoir V_2 (fig. 441), on la maintient hors de cette position et si on limite sa course du même côté de la ligne de symétrie par une seconde vis-butoir V_1, l'armature restera normalement appliquée contre celle-ci, sous l'action prépondérante qu'exerce l'électro correspondant A_1 ; et il faudra qu'un courant de sens et d'intensité convenables traverse les électros, pour projeter l'armature contre la vis V_2.

Un translateur comporte deux paires de bobines semblables. Les connexions sont établies comme dans l'appareil précédent: les armatures se relient aux lignes, les butoirs de repos aux électros et ceux d'attaque à la batterie.

RALENTISSEMENT DE LA TRANSMISSION. — Que le relais soit à rappel par ressort ou par attraction magnétique, la durée de chaque signal se trouve raccourcie du temps que met l'armature pour atteindre sa position de travail. La manipulation doit donc être d'autant plus lente, que le nombre des relais empruntés est plus grand.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Amélioration du rendement.— Le système Morse est très employé. Il est fort simple, peu sujet à dérangement, mais la transmission qu'il fournit n'est pas rapide. On double aisément le rendement d'un fil, en adoptant le dispositif duplex obtenu soit au moyen de bobines différentielles, soit par le pont de Wheastone.

Duplex différentiel. — Les électro-aimants récepteurs possèdent deux enroulements bobinés en sens inverse a_1 b_1, a_1 c_1 ; a_2, c_2, a_2 b_2 (fig. 442) à nombres égaux de spires et représentés sur la figure par de simples quarts de circonférence, pour plus de clarté. Les entrées de ces enroulements sont raccordées entre elles en a_1 et a_2 ; les sorties avec la ligne d'une part, et des rhéostats réglables R_1, R_2, d'autre part, sur lesquels on peut, au surplus, dériver des condensateurs de capacité réglable S_1, S_2. Les manipulateurs M_1, M_2, sont doubles, et disposés de manière que la communication avec la terre soit coupée *au moment* où se produit la liaison avec la pile. Le circuit n'est donc jamais interrompu, comme cela a lieu avec les manipulateurs ordinaires.



FIG. 442.

On règle les récepteurs de chaque poste, au moyen des rhéostats R_1 et R_2 et de leurs condensateurs, de manière que, lorsque l'un des manipulateurs est abaissé, le récepteur qui lui est conjugué reste inerte. Ceci a lieu quand les rhéostats R_1 et R_2, ainsi que les capacités qui leur sont adjointes, équivalent exactement aux résistances et capacités respectives des circuits $c_1 c_2 a_2 T_2$ et $c_2 c_1 a_1 T_1$ puisqu'alors les courants sont égaux et de sens contraires dans les enroulements égaux de chacune des bobines différentielles.

Cela posé, le poste 2 étant au repos, si l'on abaisse M_1, l'armature de A_1 reste immobile ; au contraire, celle de A_2 s'abaisse, sous l'influence du courant qui traverse le circuit $a_1 c_1$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L $c_2 a_2$ T_2. Et l'on voit que la transmission de M_1 parvient régulièrement en A_2 ; inversement, celle de M_2 agit en A_1. Enfin, si les deux manipulateurs sont abaissés simultanément, les *deux* récepteurs fonctionnent sous l'effet des courants traversant les enroulements $a_1 b_1$ R_1 T_1 et $a_2 b_2$ R_2 T_2, la ligne n'étant alors le siège d'aucun courant.

Duplex par le pont de Wheastone. — Ici les récepteurs R_1, R_2 sont insérés dans une des diagonales de deux ponts de Wheastone dont A_1, B_1 ; A_2, B_2 (fig. 443) sont les branches de proportion et S_1, S_2, celles de comparaison. Les manipulateurs M_1, M_2 sont doubles comme précédemment. On règle les rhéostats variables, munis de condensateurs, de manière que, l'un des deux manipulateurs étant abaissé, le récepteur qui lui est conjugué reste inerte. L'autre est alors actionné et la transmission peut s'effectuer normalement, car si le second manipulateur est abaissé à son tour, le premier récepteur fonctionne aussi, aucun courant ne passant plus dans la ligne L.

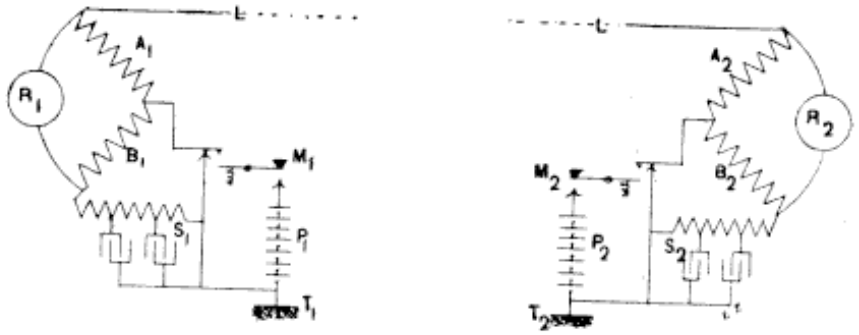


FIG. 443.

Communications directes et indirectes. — Chaque bureau télégraphique est désigné par une abréviation de deux ou trois lettres constituant son *indicatif*. Les grands centres sont reliés entre eux par des fils directs ; les petits ne se raccordent qu'à leurs voisins et la ligne qui les réunit prend le nom de *ligne omnibus*.

Quand un bureau doit envoyer une dépêche à un poste relié par fil direct, il n'y a aucune difficulté. Le bureau émet des signaux d'appel au second qui y répond, et le télégramme peut être échangé.

S'il s'agit, au contraire, de communiquer avec la N^e^ station d'une ligne omnibus, le bureau transmetteur A appellera le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

poste suivant B en émettant l'indicatif *du bureau N qu'il désire.* Recevant ces appels, la station B établira immédiatement la communication entre la ligne de A et celle vers C, en laissant dans le circuit un appareil de contrôle, galvanoscope ou parleur, pour lui permettre de se rendre compte de l'état d'occupation de la ligne. A la réception de la demande, le poste C connectera le fil de B à celui vers D et ainsi de suite. Dans les deux cas la transmission a été directe.

Si, au contraire, on télégraphie à un ou des bureaux intermédiaires qui retransmettent le télégramme au bureau d'arrivée, on a affaire à des transmissions indirectes.

Divers modes d'exploitation. — Dans les pays de faible étendue comme le nôtre, c'est le système des communications directes qui prévaut : le demandeur se fait donner la communication de proche en proche, en empruntant naturellement autant que possible, les grands bureaux disposant de fils directs et de relais, pour atteindre enfin la station d'arrivée.

Ce système exige que l'on munisse tous les postes d'une pile équivalente et relativement forte. A condition de disposer d'un grand nombre de conducteurs, il est rapide, ne demande qu'un minimum de main-d'œuvre et expose le moins aux erreurs.

On ne peut l'appliquer dans les grands pays, parce que les longues lignes à trafic fort dense, y sont desservies par des appareils rapides occupant constamment la ligne et effectuant la retransmission. On achemine alors le télégramme vers les centres importants, d'où on le *retransmet* au grand centre le plus voisin du poste d'arrivée, qui l'envoie enfin à ce dernier.

Ligne à courant permanent. — Tout ce que nous venons de voir a trait à des circuits parcourus par des courants intermittents ; en temps normal, la ligne n'est le siège d'aucun courant. On réduit ainsi au minimum la dépense de courant, mais on est obligé de munir chaque poste d'une source d'énergie suffisante, pour assurer les transmissions les plus lointaines auxquelles on doit satisfaire. Ceci peut constituer un grand inconvénient, par exemple pour de petits bureaux de chemins de fer ne disposant pas de personnel spécial, ou pour des installations d'un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

caractère nettement temporaire, comme des postes militaires de campagne.

Dans ces cas, il y a avantage à concentrer la ou les piles dans le ou les bureaux extrêmes, généralement les plus importants, et la ligne se trouve normalement parcourue par un courant continu. Il conviendra, naturellement, de recourir alors aux éléments qui permettent un débit constant, comme ceux du genre Daniell.

Dans le poste A (fig. 444), le plot d'attaque du manipulateur

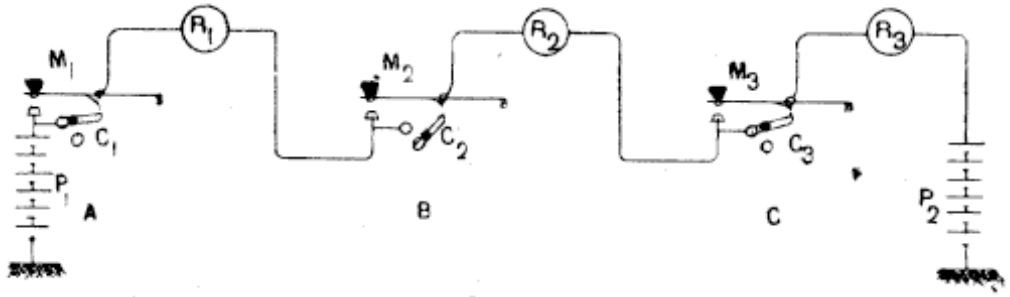


FIG. 444

est en relation avec la pile, et l'axe du manipulateur avec le récepteur, puis la ligne.

Dans les autres postes, la ligne arrive au plot d'attaque des divers manipulateurs, les axes étant reliés aux récepteurs et tronçons de ligne suivants. Un commutateur C_1, C_2, ... permet d'établir un court-circuit entre le plot d'attaque et l'axe de tous les manipulateurs. C'est la position d'attente et un courant traverse tout le circuit d'une manière permanente.

Quand un poste B, par exemple, veut transmettre, il rompt le court-circuit de son manipulateur par la manœuvre de l'interrupteur C_2 et se trouve, dès lors, dans le cas général précédemment étudié, si ce n'est que tous les récepteurs sont intercalés dans le circuit et fonctionnent simultanément à chaque émission de courant.

VARIANTE. — Une variante du système consiste à transmettre simplement par rupture du courant traversant continuellement la ligne. Dans ce cas, les commutateurs C_1, C_2, ... disparaissent et les lignes viennent aboutir aux plots de repos des manipulateurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XVII

Téléphonie [1].

La téléphonie, comme son nom l'indique, est l'art de transmettre les sons au loin.

La transmission de la parole en constitue la principale application; aussi entend-on généralement par téléphonie, l'art de communiquer oralement à distance.

Les porte-voix, les téléphones à ficelle, appartiennent évidemment au domaine de la téléphonie. Nous les passerons sous silence, parce qu'ils ne mettent pas l'électricité en jeu. Remarquons que la téléphonie électrique constitue un cas particulier du transport à distance de l'énergie : elle permet de transmettre des vibrations sonores, les correspondants jouant alternativement le rôle de transmetteur et de récepteur.

Microphone. — En tout premier lieu, il s'agit de produire des courants électriques qui soient la traduction exacte des ondes sonores. On y parvient au moyen du microphone, simplement constitué, en principe, par un contact *variable* que traverse un courant. Soit un circuit comprenant une pile P (fig. 445) et une capsule remplie de grenaille de charbon. Quand tout est calme dans l'air ambiant, l'intensité du courant traversant le circuit est donnée par la loi d'Ohm $i = E/R$, E étant la force électromotrice de la pile, R la résistance totale du circuit. Le diagramme de l'intensité du courant, en fonction des temps, est représenté par une droite, comme d'ailleurs celui de la pression ambiante.

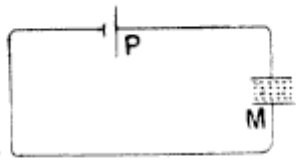


Fig. 445.

(1) Pierard, *La Téléphonie*, 3e édition, Bruxelles, Ramlot frères et sœurs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si un son simple est émis dans le voisinage, les ondes sonores, qui affectent la forme sinusoïdale ABCDEFG, (fig. 446), viennent impressionner les grenailles.

Pendant la période de compression d'une vibration complète, les grenailles comprimées se resserrent, leur résistance diminue et l'intensité du courant augmente.

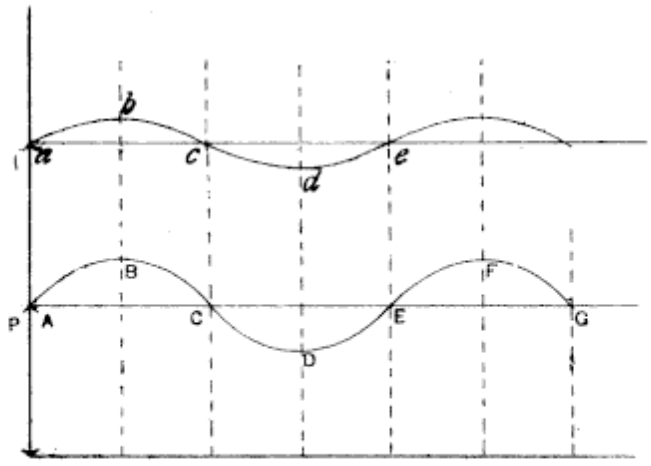


FIG. 446.

Pendant la période de dépression, au contraire, les grenailles s'écartent en vertu de leur élasticité, leur résistance de contact augmente et le courant diminue. Il y a autant d'accentuations et de diminutions du courant que d'ondes sonores; elles sont marquées ou non suivant que ces dernières sont énergiques ou pas; le phénomène est continu, de sorte que le diagramme de l'intensité du courant en fonction du temps devient une sinusoïde *abcde*... semblable à la sinusoïde sonore ABCDE... (fig. 446). Par un choix convenable du contact léger constituant le microphone, on arrive à accuser les plus légères vibrations aériennes, ce que l'on met en évidence en intercalant un récepteur approprié dans le circuit.

Pour renforcer l'effet du microphone, on l'insère généralement, avec la pile qui l'active, dans le circuit primaire d'une bobine d'induction (fig. 447). Le circuit primaire comporte la pile P, le contact microphonique M, l'enroulement à gros fil de la bobine. Il est peu résistant, et ainsi les variations de résistance du microphone sont très marquées par rapport à la résistance totale de ce circuit, ce qui provoque de grandes variations dans le débit de la pile et, par suite, la naissance de différences de

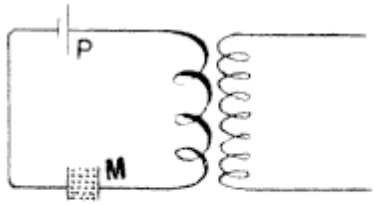


FIG. 447.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

potentiel relativement grandes aux bornes du circuit secondaire. Le courant ondulatoire du circuit primaire (fig. 446) se trouve ainsi remplacé par un courant alternatif semblable. La transmission est plus forte que dans le premier cas parce que, par cet artifice, on dépense plus d'énergie vu la faible résistance du primaire, et la majeure partie de cette énergie est transmise dans le secondaire, c'est-à-dire dans la ligne, vu le haut rendement de la bobine d'induction qui n'est rien autre qu'un transformateur.

Microphone Hughes. — Il est constitué par deux planchettes placées d'équerre (fig. 448), l'une servant de socle à l'autre. La planchette verticale porte deux petits blocs de charbon B B, évidés sur leurs faces horizontales en regard et supportant par leurs évidements un cylindre de charbon C effilé à ses extrémités. Le courant est amené à un bloc et sort par l'autre.

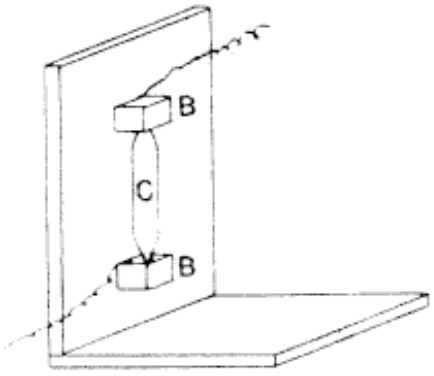


Fig. 448.

Le microphone Hughes et ses dérivés à baguettes de charbon : Ader, Dejongh, ... ont l'inconvénient de présenter une faible résistance (quelques ohms), ce qui affaiblit rapidement la pile et par suite la transmission. En outre, de fortes vibrations de la plaque portant les charbons provoquent des ruptures totales du circuit, qui produisent des *crachements* désagréables dans les récepteurs; les étincelles consécutives à ces ruptures encrassent les charbons et exigent des nettoyages fréquents. Ces inconvénients ont favorisé la vogue dont jouissent aujourd'hui les microphones à grenaille ou granules plus puissants, plus nets et moins sujets à se dérégler. Nous en décrirons deux couramment employés en Belgique.

Microphone Grünenwald. — Au fond d'un pavillon métallique A (fig. 449), se trouve encastré sur tout son pourtour un disque en métal ou en charbon. Ce dernier donne de meilleurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résultats que les métaux. Ce disque se trouve placé très près d'un bloc en charbon *b*, percé de cinq ouvertures cylindriques *c* remplies de grenaille de charbon. Les parties pleines du bloc de charbon sont d'ailleurs recouvertes d'une feuille de papier *ff* en regard de la membrane vibrante, pour assurer l'isolement entre ces deux organes. Les grenailles viennent reposer contre la plaque vibrante, mais ne peuvent tomber, à cause de la faible distance existant entre le disque et le bloc. Ce dernier est fixé sur une tige *a*, isolée de la cuvette CC par un cylindre en ébonite. Le courant est amené par une lame-ressort, portant une rondelle platinée, qui appuye sur la pointe F platinée de la tige porte-bloc d'une part, et sort par l'intermédiaire d'une fourche métallique engagée dans la rainure JJ, d'autre part. L'épaulement cylindrique EE' est engagé à frottement doux dans la planchette-support, de sorte que la fourche dont il vient d'être question, assure en même temps la fixation de l'appareil.

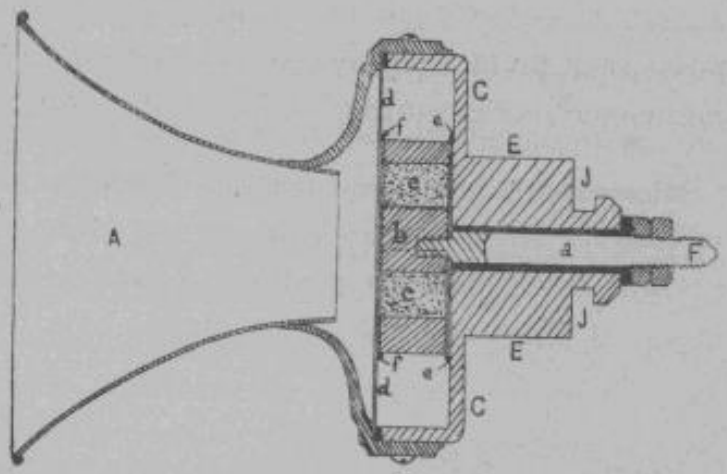


Fig. 449.

Microphone Delville. — Sa constitution générale est identique, mais le charbon B (fig. 450) est percé d'une seule cavité centrale C, et, au lieu de grenaille, il est fait usage de granules.

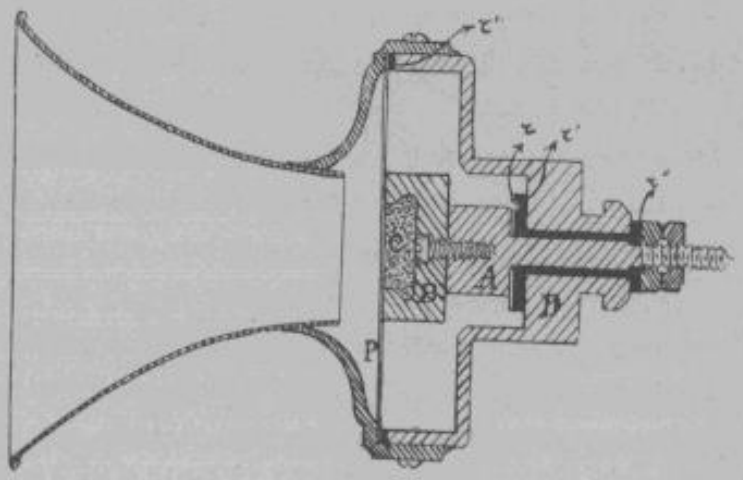


Fig. 450.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Renforcement de la transmission.— Il semblerait que pour renforcer la transmission, il suffise d'augmenter le nombre des éléments activant le microphone. En réalité il y a peu à gagner dans cette voie. Bien que les deux transmetteurs que nous venons de décrire aient une résistance de 10 à 15 ohms, ils deviennent trop sensibles et donnent aisément lieu à des résonances parasites nuisibles, quand on les alimente par plusieurs éléments. La puissance de la transmission qu'ils fournissent avec un bon élément, sec par exemple, ne laisse d'ailleurs rien à désirer.

Microphone à grande résistance. — Solid-Back.— Dans le système de réseaux à batterie centrale, on est amené à utiliser des microphones de résistance beaucoup plus élevée, tel le Solid-Back (fig. 451 et 452), dont la résistance atteint 60 ohms. Une boîte

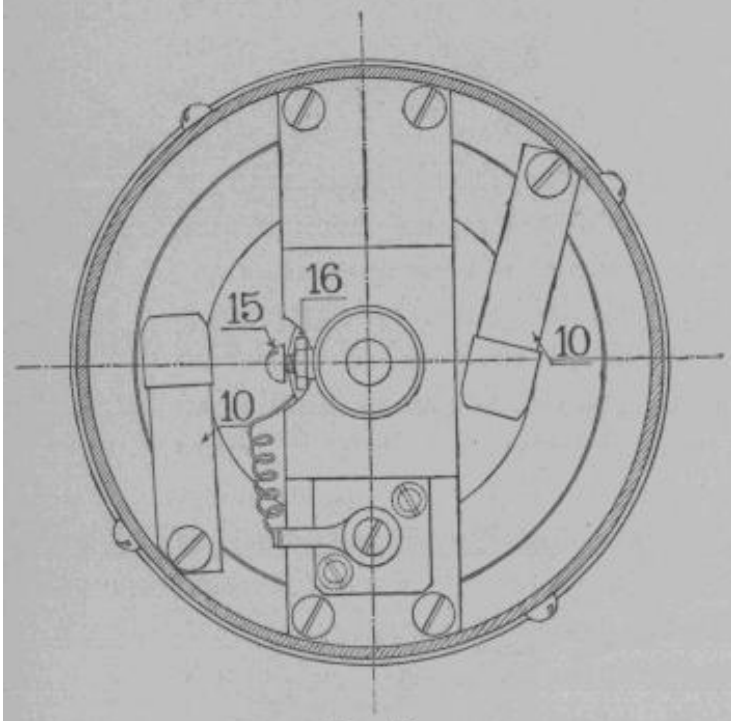


Fig. 451.

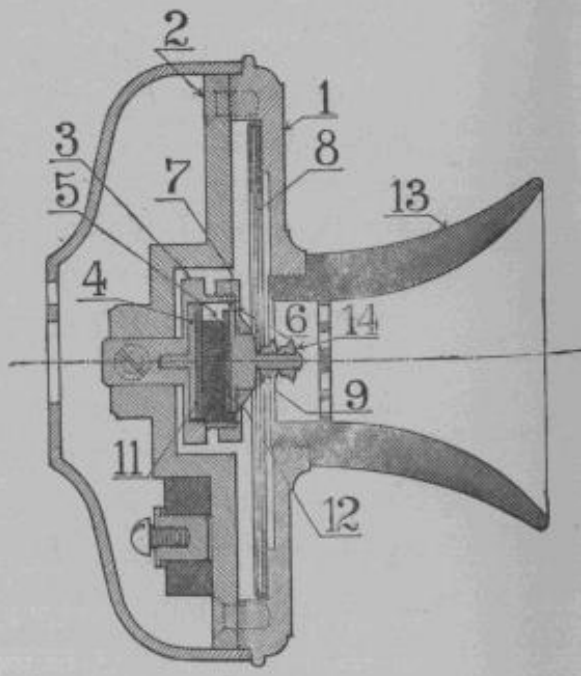


Fig. 452.

métallique 3, à fond garni d'une pastille en charbon 4, est obturée par un disque de mica 6, portant vers l'intérieur de la boîte une seconde pastille en charbon 7. Cet opercule se rattache par une tige filetée et deux écrous 9 et 14 au centre de la plaque vibrante 8. Entre les deux pastilles de charbon se trouve de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fine grenaille de charbon dense, homogène et soigneusement poli.

Les deux ressorts amortisseurs 10 (fig. 451), ont pour objet de supprimer les vibrations propres de la plaque. Les deux pastilles de charbon servent d'électrodes.

Lorsque la plaque vibre, elle transmet ses vibrations à la pastille d'avant 7, laquelle agit comme un piston pour comprimer ou déprimer la masse de grenaille.

Téléphone. — Le téléphone transforme en ondes sonores les courants variables qui l'activent.

Récepteur a main. — Il comprend un aimant en fer à cheval AA (fig. 453), sur les pôles duquel sont fixés des noyaux en fer doux, que chaussent des bobines BB de fil fin. L'enroulement de ces bobines est tel que, montées en série et parcourues par un courant, elles tendent à donner des polarités inverses aux extrémités de leurs noyaux, lesquels sont placés symétriquement par rapport à l'axe longitudinal de l'appareil. Une plaque circulaire en fer doux CC, encastrée sur son pourtour dans une gaine en ébonite ou partiellement métallique, qui enveloppe l'aimant et les bobines, se trouve fixée à une faible distance des noyaux en fer doux. Enfin une vis V permet de régler l'appareil, en éloignant ou rapprochant l'aimant de la plaque.

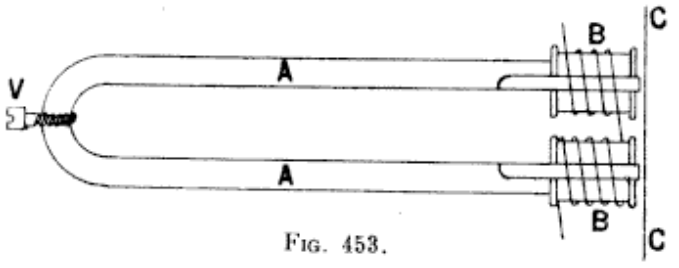


Fig. 453.

Lorsqu'un courant croissant traverse les bobines, le magnétisme de leurs noyaux est renforcé par exemple, les molécules de la plaque CC se trouvant attirées davantage, quittent leur position d'équilibre et se rapprochent des noyaux. Quand le courant décroît au contraire, l'attraction faiblit, elles s'écartent des noyaux, suivant ainsi toutes les fluctuations du courant et reproduisant par suite les vibrations sonores qui ont provoqué ces fluctuations.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'appareil est réversible. Quand des ondes sonores l'impressionnent, la plaque vibrant à l'unisson s'approche ou s'éloigne des noyaux, diminue ou augmente la réluctance du circuit et, par suite, provoque des augmentations ou diminutions correspondantes du flux traversant les bobines. Ces variations font naître dans ces dernières des courants d'induction reproduisant, à l'intensité près, le train d'ondes sonores motrices.



Fig. 454.



Fig. 455.

Récepteur-montre. — Un type beaucoup employé, particulièrement dans les applications domestiques, est le *téléphone-montre*, ainsi appelé à cause de sa forme (fig. 454, 455). Il condense l'appareil sous un faible volume, par la mise à contribution d'un aimant plat, pourvu de noyaux en retour d'équerre, sur lesquels sont fixées les bobines, le tout contenu dans une cuvette métallique.



Fig. 456.

Téléphone serre-tête. — Si le récepteur doit rester fixé sur la tête, on le monte sur un ressort (fig. 456) recourbé, en acier, terminé par un tampon pour adoucir la pression.

La résistance des téléphones est de 120 à 140 ohms. Le fil utilisé a généralement 0,08 mm de diamètre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Téléphone et microphone combinés. — Dans les postes mobiles on combine souvent ensemble le téléphone R (fig. 457) et le microphone *m*, de manière que lorsque le récepteur est appuyé contre l'oreille, le microphone se trouve devant la bouche. Un interrupteur I, placé dans la poignée, permet d'admettre le courant dans le microphone au moment de l'utilisation.



Fig. 457.

Appareils d'appel. — Sonnerie vibrante. — Le téléphone et le microphone ne suffisent pas pour constituer un poste téléphonique. Il faut encore des appareils d'appel, parmi lesquels la sonnerie vibrante, étudiée précédemment, joue un rôle important, particulièrement dans les postes domestiques.

Le circuit de la sonnerie vibrante doit comporter quelques éléments de pile (deux suffisent avec les bonnes sonneries), et un bouton d'appel simplement constitué par deux lames en laiton recourbées se faisant face, que l'on peut pousser en contact au moyen d'un bouton coulissant dans le couvercle.

Sonnerie électromagnétique. — Celle-ci fonctionne sous l'influence de courants alternatifs. Sur une planchette AB (fig. 458), sont montés deux timbres T_1, T_2, dont les supports retiennent une traverse GH, sur laquelle pivote une armature en fer DF, portant au bout

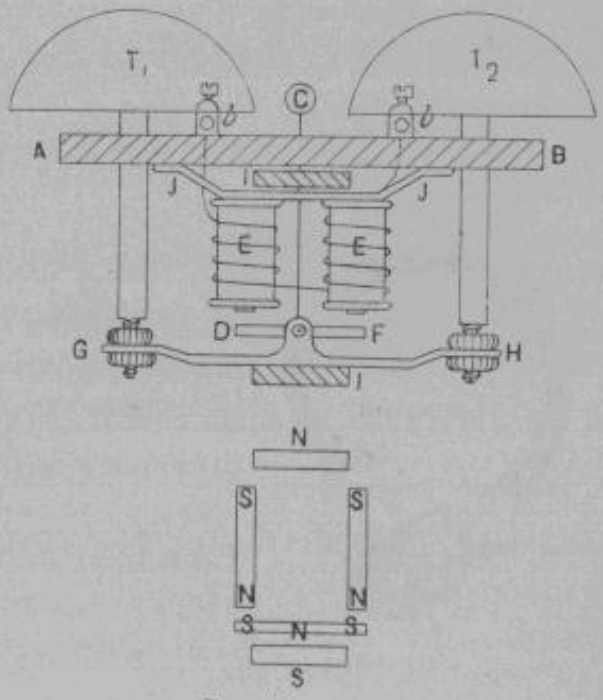


Fig. 458 et 459.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une tige le battant C. Un aimant permanent II polarise l'armature et les noyaux, par exemple de la manière indiquée sur le schéma (fig. 459), en formant un pôle conséquent au milieu de l'armature. En supposant celle-ci à égale distance des deux noyaux, elle se trouve dans un état d'équilibre instable. Si, dès lors, on fait passer un courant alternatif dans les bobines EE supportées sur le chevalet JJ, et raccordées aux bornes *bb*, pendant la demi-période positive, il renforce, par exemple, le pôle N du noyau de gauche, et diminue, sinon renverse le magnétisme du pôle nord du noyau de droite; l'équilibre est donc rompu et l'armature oscille de manière que le battant vienne frapper le timbre T_2. Au contraire, pendant la demi-période négative, le noyau de droite aura son aimantation renforcée et celui de gauche son aimantation diminuée ou intervertie, de sorte que l'armature oscillera en sens inverse, le battant venant frapper le timbre T_1 et ainsi de suite. La figure 460 donne la vue extérieure de l'appareil.



Fig. 460.

Machine magnéto-électrique. — Les courants alternatifs nécessaires pour la production des appels sont engendrés par la petite machine décrite page 208, figures 155, 156 et 157, et montrée en élévation (fig. 461). A la vitesse de 15 tours par seconde de leur induit, les magnétos des abonnés développent 65 volts efficaces environ, en circuit ouvert.

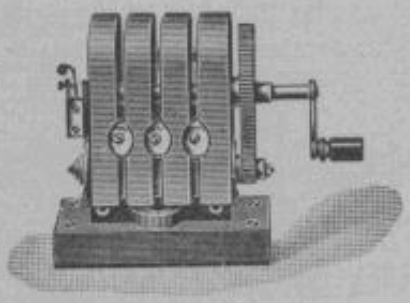


Fig. 461.

Poste normal. — Le poste normal utilisé dans les petits réseaux, comprend la magnéto M (fig. 462), la sonnerie électro-magnétique S, la fourche-commutatrice AB, sollicitée vers le haut par le ressort R, les bornes L_1 et L_2 où s'attachent les fils de ligne et 3 ressorts de contact E, F, G, raccordés le premier à la sonnerie, le second à un circuit comprenant l'enroulement secondaire de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la bobine d'induction et le ou les téléphones; le troisième au circuit primaire, à la pile P et au microphone *m*.

Dans la position d'attente, un des téléphones, engagé dans la fourche-commutatrice, la pousse à fond vers le bas, de manière qu'elle soit en contact avec le ressort E. Le circuit comporte la borne L_1, la magnéto M normalement mise en court-circuit pour éliminer sa résistance, la sonnerie S, la paillette métallique E, la fourche AB, la borne L_2. Si des courants alternatifs sont transmis sur la ligne, ils traversent la sonnerie réceptrice qu'ils font fonctionner. De même si la magnéto est actionnée, son court-circuit se trouve rompu mécaniquement et des courants sont lancés dans la ligne à travers la sonnerie S. Quand on décroche le téléphone, la fourche se relève sous la poussée du ressort R, ce qui déconnecte le ressort E et applique la fourche sur les deux paillettes F et G. D'une part, le circuit primaire du microphone A*m*PG est fermé; d'autre part, les bornes L_1 et L_2 sont réunies par le téléphone T, l'enroulement secondaire de la bobine, la fourche AB. Le poste est donc en état de recevoir et de transmettre la parole.

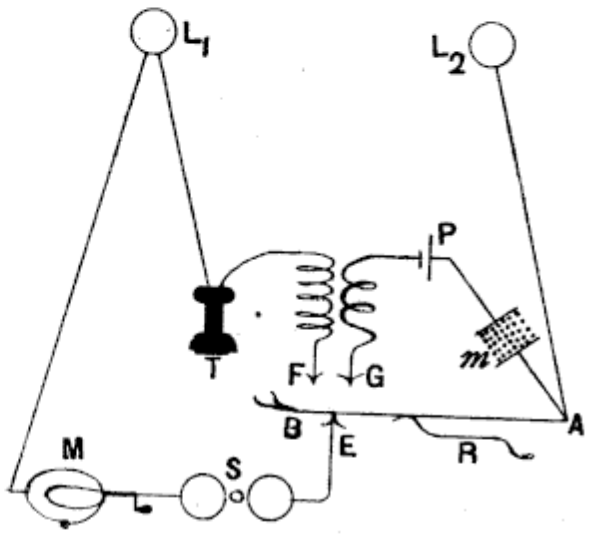


FIG. 462.

La figure 463 donne la vue d'un poste à microphone et magnéto séparés. Actuellement, ces deux appareils sont toujours réunis en un seul, le microphone se fixant dans le couvercle de la magnéto, sous les timbres.

Commutateurs. — Les principaux appareils de l'espèce sont ceux desservant les bureaux centraux téléphoniques où convergent les lignes d'abonnés, qu'il faut pouvoir réunir temporairement avec promptitude, pour permettre l'échange des communications.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ils comportent tous des organes communs qui sont : les annonciateurs, les jacks, fiches, cordons, clés et boutons d'appel.



Fig. 463.

Annonciateurs. — *A*. De lignes. — Les annonciateurs mis en relation avec les lignes d'abonnés sont constitués par un électro-aimant généralement double B (fig. 464), muni d'une armature C oscillant autour d'un axe O, se repliant à angle droit pour venir retenir par un petit ergot E, un volet d'annonciateur en métal non magnétique, pivotant à sa base autour d'un axe de rotation et légèrement incliné vers l'avant, de manière à basculer autour de son axe dès que l'ergot de retenue E cesse de le soutenir.

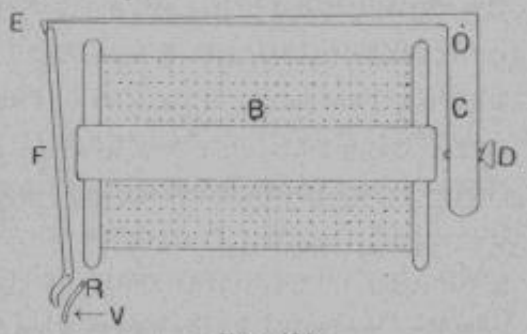


Fig. 464.

Quand le noyau est aimanté par le passage d'un courant, l'armature C est attirée, le levier O E se soulève et laisse tomber le volet qui découvre le numéro de la ligne raccordée.

En outre, dans son mouvement, une expansion terminant le volet à sa partie inférieure, applique la paillette métallique R

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur un contact réglable V fermant, s'il y a lieu, le circuit d'une sonnerie vibrante.

Une vis D permet d'écarter plus ou moins l'armature C, de manière à modifier la sensibilité. La résistance des bobines est d'environ 120 ohms.

Dans les grands bureaux, les annonciateurs sont remplacés par de petites lampes.

B. De fin de communication. — Ceux de fin de communication ne comportent généralement qu'un seul noyau. Leur résistance s'élève à 800 ohms, et ils sont entourés d'une chemise tubulaire en fer (fig. 465), pour leur donner un grand coefficient de selfinduction, lequel réduit de beaucoup les courants dérivés qui les traversent.

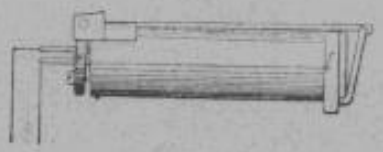


Fig 465.

Jacks. — Jack fermé. — Les jacks sont des contacts mobiles que l'on peut disjoindre par l'insertion d'une fiche. A une partie massive G (fig. 466, 467), perforée d'un trou cylindrique, se rattachent deux lames comprenant entre elles une lame EF qui en est isolée. Deux autres lames élastiques AB, CD, isolées des précédentes, viennent toucher EF à travers des évidements pratiqués dans les supports de G. C'est le *jack fermé* ou *à contact permanent*.

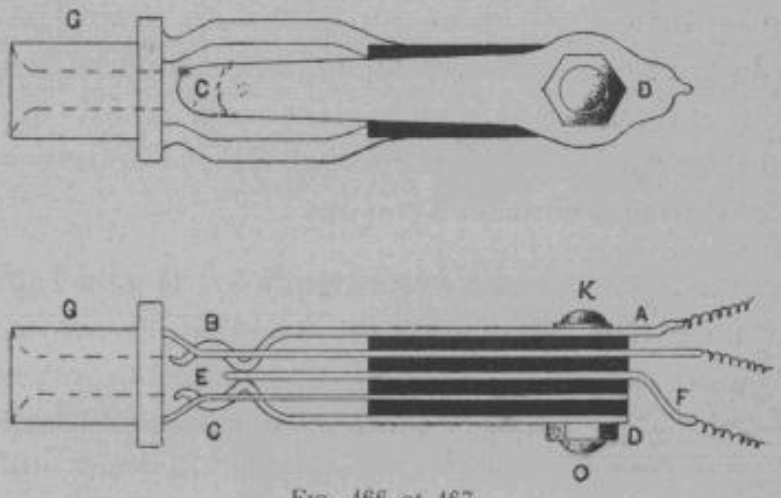


Fig. 466 et 467.

Dans le jack *ouvert*, (fig. 468), nous trouvons encore une partie

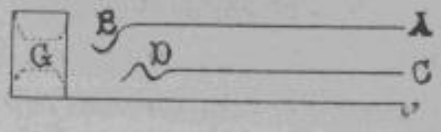


Fig. 468.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

massive ou bague G, puis deux lames aux extrémités doublement recourbées, l'une longue AB, l'autre courte CD. Toutes ces pièces sont isolées l'une de l'autre.

Fiches et cordons. — Les fiches s'introduisent dans les jacks pour effectuer certaines liaisons.

A DEUX CONDUCTEURS. — Elles comportent (fig. 469) une tige centrale, terminée par une sphère métallique appelée la *pointe* ou la *tête*. Autour de cette tige, se trouve un cylindre d'ébonite, recouvert d'un autre cylindre métallique DD_1, pourvu d'un épaulement. La tige centrale et le cylindre extérieur sont raccordés aux conducteurs d'un cordon souple fixé à la fiche.

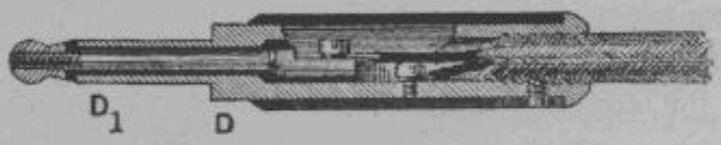


FIG. 469.

Quand celle-ci est introduite dans un jack, du genre des figures 466 et 467, la partie extérieure D_1 engagée dans le trou cylindrique est en contact avec la partie massive G, tandis que la pointe sphérique écarte du ressort central EF les deux ressorts AB, CD, en restant en contact avec eux.

A TROIS CONDUCTEURS. — La partie cylindrique D_1 D se scinde en deux : une bague *b* (fig. 470), souvent appelée la *nuque*, reste raccordée au second conducteur, tandis que le reste du cylindre, appelé *col*, et son épaulement *d*, sont réunis au troisième conducteur.

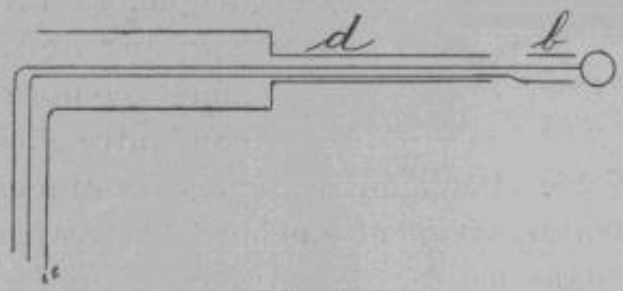


FIG. 470.

Trois contacts s'établissent, quand une telle fiche est introduite dans le jack de la figure 468 : la pointe, retenue par le crochet D, est en communication avec la lame courte CD ; sur la bague *b* vient appuyer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par sa partie courbée B la lame AB; enfin, le cylindre *d* emboîté dans G, met en contact le troisième conducteur du cordon de la fiche avec la masse G du jack.

Clés d'écoute et boutons d'appel. — Deux lames métalliques R et R′ (fig. 471), pourvues de rondelles platinées sont, dans la position de repos, en contact avec les pointes platinées C et C′. Quand on les écarte en actionnant une tige P pourvue d'un bloc isolant taillé en biseau, elles quittent les contacts C, C′ pour s'appliquer sur les lames R_1, R'_1. Lorsque les lames doivent rester dans cette position, le mouvement est commandé par un excentrique et l'on a affaire à une clé. Si le contact avec les lames extérieures ne doit être que passager, la tige P est coiffée d'une calotte isolante, sur laquelle on exerce une pression et l'on a affaire à un bouton. Celui-ci revient à sa position de repos dès qu'on cesse de l'actionner.

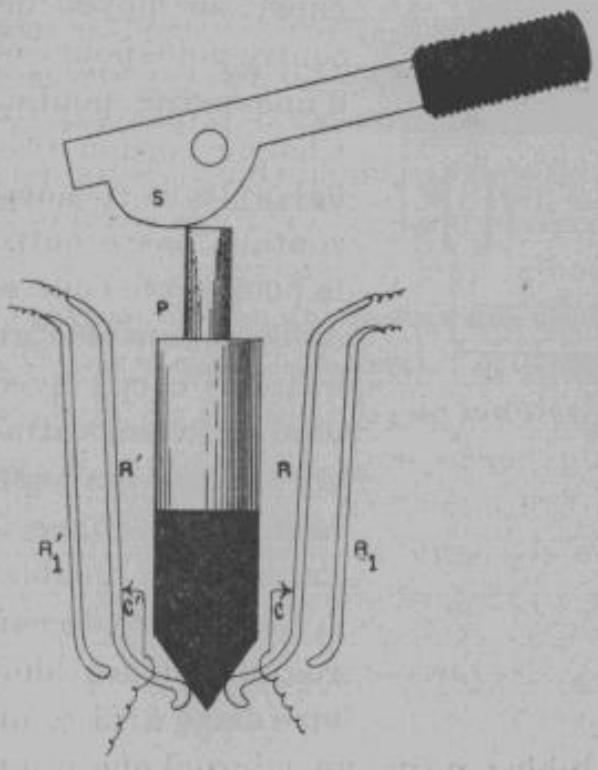


Fig. 471.

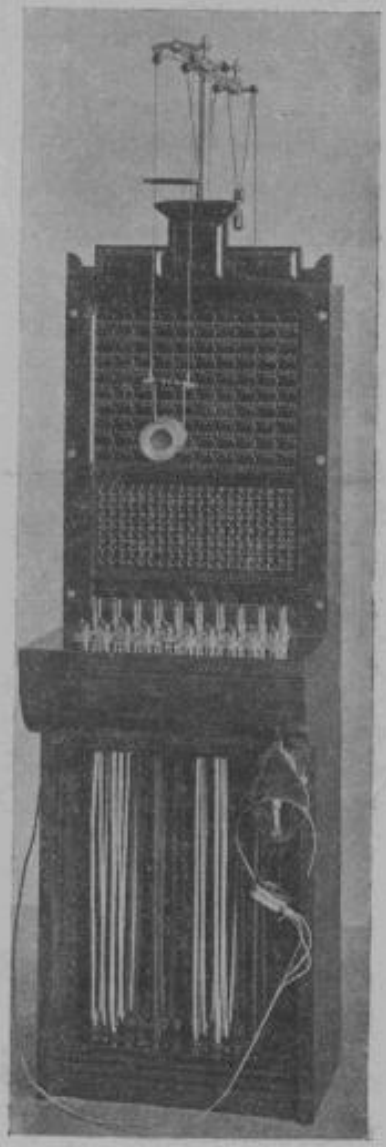


Fig. 472.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Commutateur Standard. — Il est construit pour 50, 110, 120 et même 150 lignes et présente extérieurement la forme d'un piano-buffet (fig. 472).

Chaque circuit d'abonné se raccorde à un jack G et à un annonciateur V (fig. 473). Ces annonciateurs et jacks s'alignent sur un panneau vertical du meuble.

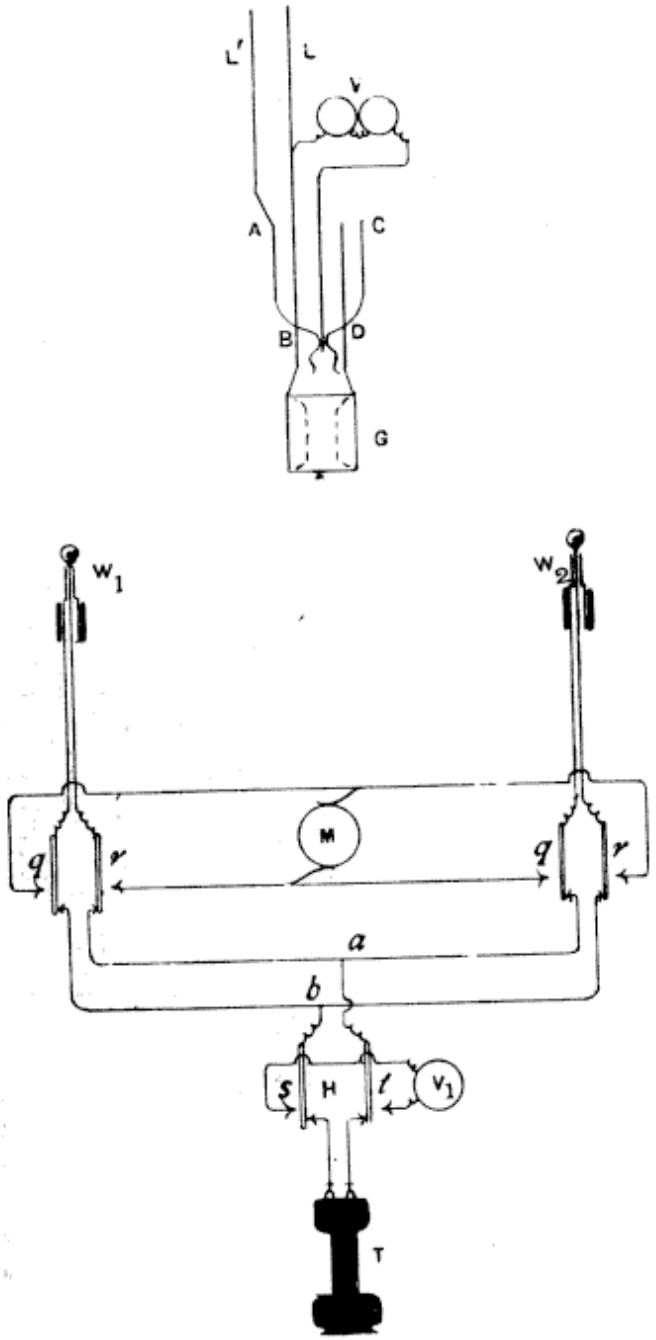


FIG. 473 et 474.

Sur le panneau horizontal, sont disposés les boutons d'appel, les clés d'écoute et les fiches. Celles-ci sont maintenues verticalement dans leur alvéole et leurs cordons restent constamment tendus dans toutes les positions qu'elles peuvent occuper, au moyen de contre-poids pourvus d'une petite poulie. Chaque cordon traverse la tablette horizontale, passe entre la poulie et le contre-doids pesant 280 gr qui fait corps avec elle, puis vient s'attacher à une traverse horizontale, fixée à l'arrière du meuble.

Le nombre de paires de fiches doit être de 10 à 15 % du nombre des numéros de la table ; enfin, un microphone et un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

téléphone (du type serre-tête, si le trafic est considérable), complètent l'équipement de la table.

Les connexions d'une paire de fiches W_1 et W_2 (fig. 474) sont établies de la manière suivante : les fiches W_1, W_2, communiquent par les conducteurs de leurs cordons avec des boutons d'appel, dont les lames q et r reposent sur des contacts reliés à une clé d'écoute H qui, dans la position de repos, les connecte avec le circuit du poste d'opérateur T et, dans sa position de travail, substitue au poste un annonciateur V_1 de fin de communication. En appuyant sur un des boutons, on coupe toute relation avec la clé et on met les deux conducteurs du cordon conjugué en rapport avec les deux pôles de la magnéto d'appel M.

Fonctionnement de l'appareil. — Quand un abonné émet des signaux d'appel, le volet de son annonciateur déclenche, démasquant le numéro qui lui est affecté. L'employé saisit une fiche, W_1 par exemple, et l'introduit dans le jack G. La pointe de la fiche écarte les ressorts de la lame centrale du jack, ce qui isole l'annonciateur ; d'autre part, le contact est établi entre les deux conducteurs du cordon et les fils L et L', par l'intermédiaire du canon du jack (partie extérieure de la fiche) et des ressorts extérieurs (partie centrale de la fiche). La connexion est donc obtenue avec le poste téléphonique de l'opérateur, qui peut ainsi prendre connaissance de la communication demandée. Il enfonce alors la fiche conjuguée W_2 dans le jack G_N de l'abonné N demandé, et pousse à fond le bouton conjugué en actionnant la magnéto M, ce qui envoie des courants d'appel chez ce dernier. Celui-ci vient à l'appareil, l'opérateur dit : « parlez » et fait basculer la clé d'écoute H, de manière à intercaler l'annonciateur de fin de communication en dérivation sur les fils temporairement reliés. Quand la communication est terminée, les abonnés font effectuer quelques tours à la manivelle de leur magnéto, ce qui provoque le déclenchement du volet de l'annonciateur de fin de communication V_1, et l'employé, ainsi averti, enlève les fiches hors des jacks, rétablissant tout dans l'état primitif.

Lorsque le nombre d'abonnés dépasse la capacité d'une table, on lui accole un second meuble du même type et les cordons

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sont suffisamment longs pour que toutes les communications puissent être établies directement d'un appareil à l'autre. Lorsqu'une troisième unité est ajoutée, la longueur des cordons ne permet pas d'établir directement des communications entre les tables extrêmes. Il convient donc de prévoir dans celles-ci des

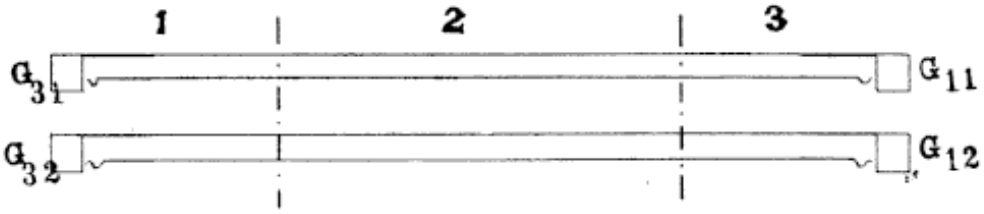


FIG. 475.

jacks de renvoi G_{31}, G_{32}, G_{11}, G_{12} (fig. 475), reliés entre eux comme l'indique la figure.

Si un abonné de la table 3 demande un abonné relié à la table 1, l'opératrice introduit dans le jack G_{11} ou G_{12}, la fiche conjuguée à celle qui lui a servi pour répondre à l'abonné demandeur. Elle prévient alors de vive voix sa collègue de la table 1 qu'on demande le n° N ét qu'elle donne le demandeur par le jack G_{11} ou G_{12}. Il ne reste plus à l'opératrice 1 qu'à sonner l'abonné N, en introduisant dans le jack de sa ligne la fiche conjuguée à celle qu'elle a porté dans le jack G_{31} ou G_{32}, suivant le numéro du circuit de renvoi utilisé.

On admet généralement qu'il faut, dans chaque table, un jack de renvoi par 25 abonnés.

Lors de l'adjonction d'une quatrième table, des jacks de renvoi devront être établis entre celle-ci et les tables 1 et 2. Le nombre de communications *indirectes*, exigeant l'emploi de quatre fiches et l'intervention de deux employés, va augmenter. Les appels se croisant en tous sens rendront le service plus difficile. On pourra remédier à ce défaut en complétant les jacks de renvoi par des signaux et en transmettant tous les ordres par téléphone. Mais, si le nombre de tables croît encore, le service se trouvera paralysé du fait des communications indirectes, de beaucoup les plus nombreuses. On y remédie en recourant au *multiple*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Commutateur multiple. — Dans le système multiple, *toute opératrice peut atteindre directement le circuit d'un abonné quelconque aboutissant dans le commutateur.* Elle le fait par l'intermédiaire d'un jack dit *général*, placé à sa portée, et intercalé dans chacun des circuits d'abonnés. Comme la longueur des cordons ne lui permet pas de travailler au-delà des deux positions adjacentes, occupées de part et d'autre par ses collègues, il en résulte que tous les jacks généraux devront être groupés suivant trois tableaux A,B,C ; A,B,C... (fig. 476) constituant des sections ou *tables* desservies chacune par trois opératrices, 1,2,3 ; 4,5,6, etc.

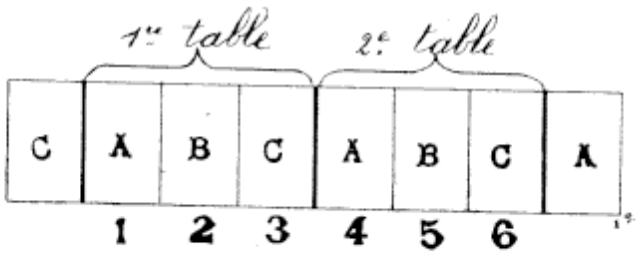


Fig. 476.

L'opératrice 1, placée en face du premier tableau A (position 1 de la première table), doit avoir tous les jacks généraux à sa disposition. On est donc forcé de placer, à sa gauche, le tableau C, dénommé *tierce-section* ; de même l'opératrice extrême 6, devra disposer, à sa droite, de la tierce-section complémentaire A.

En somme on trouve, dans le commutateur multiple, pour chaque circuit d'abonné : tous les trois tableaux ou toutes les trois positions ou par table ou par section, un jack général portant le numéro de cet abonné, puis dans le tableau de l'opératrice qui doit répondre aux appels de l'abonné, un *jack local* et un annonciateur ou signal lumineux.

Ligne d'essai. — Le circuit d'un abonné devant pouvoir être utilisé par n'importe quelle opératrice, et les opératrices trop éloignées ne pouvant se rendre compte visuellement de cette utilisation, il importe, pour éviter l'établissement de communications simultanées constituant de fausses manœuvres, de donner la faculté à chaque agent de s'assurer sans peine de l'occupation d'une ligne. On y arrive en complétant le circuit de l'abonné dans le commutateur par un fil auxiliaire dit *circuit d'essai* ou « test-line », raccordé à la partie massive de tous les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

jacks de chaque ligne. En touchant la partie massive d'un jack quelconque avec la pointe d'une fiche, l'opératrice sait immédiatement, suivant le mécanisme que nous décrirons ci-après, si la ligne est occupée ou non.

Montage des jacks. — Les jacks d'une ligne peuvent être reliés l'un à l'autre, soit en série, soit en dérivation.

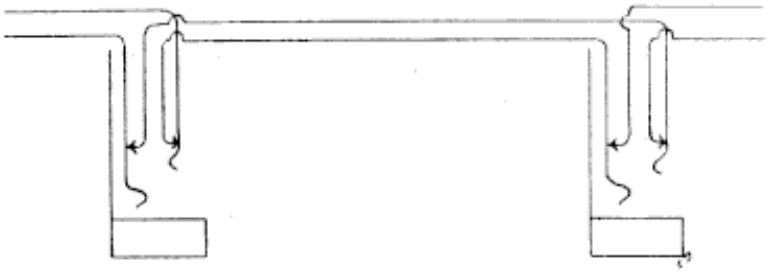


Fig. 477.

Dans le montage en série (fig. 477), chaque fil de ligne se raccorde à deux lames en contact dans chaque jack. Il suffit d'une poussière dans un des contacts, pour paralyser le fonctionnement de tout le circuit. En outre, si l'on effectue par erreur la liaison d'une ligne avec celle d'un abonné en communication, on risque d'interrompre par isolement le reliement établi, ou d'isoler la nouvelle ligne reliée, suivant la position dans le circuit du jack ainsi utilisé. Pour ces motifs, le montage en série a été complètement abandonné au profit du montage en dérivation.

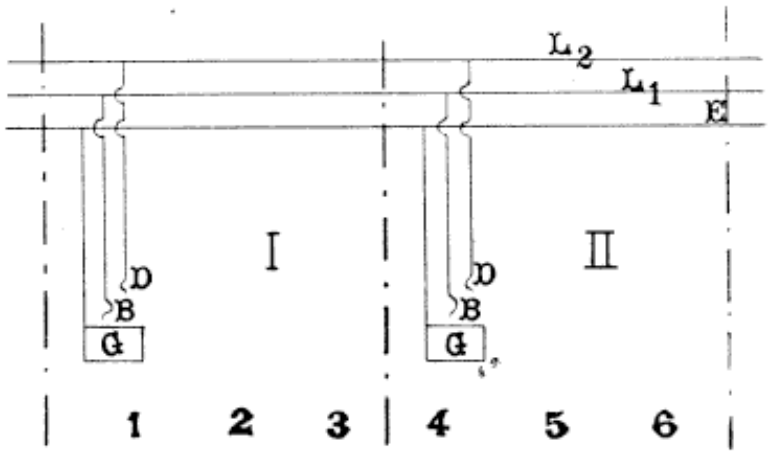


Fig. 478.

Dans celui-ci (fig. 478), les trois parties de chaque jack : l'anneau G, la grande lame B et la petite D, sont dérivées respectivement sur le fil d'essai E et les fils de ligne L_1 et L_2.

Principaux types de multiples. — On distingue le *multiple ordinaire*, desservi par des postes d'abonnés du type décrit (fig. 462) et qui comportent outre le transmetteur et le récepteur, une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bobine d'induction, une pile, une sonnerie et une magnéto d'appel, et le *multiple à batterie centrale*, la pile et le générateur d'appel n'existent plus chez l'abonné, la source d'électricité, tant pour actionner le transmetteur que pour produire l'appel du bureau central, étant reportée à ce dernier. Les signaux sont alors, en général, automatiques et lumineux.

D'autres systèmes, intermédiaires entre les deux premiers, sont aussi en exploitation, mettant partiellement à contribution les signaux lumineux ; mais ils paraissent devoir céder le pas au dernier, qui se répand de plus en plus.

Multiple à batterie centrale type de la Western Electric Cy. — Poste d'abonné. — Le poste d'abonné comporte deux bornes de ligne L_1 et L_2 (fig. 479), entre lesquelles restent intercalés en permanence une sonnerie électromagnétique S de 1000 ohms et de grand coefficient de selfinduction, ainsi qu'un condensateur C de 2 microfarads.

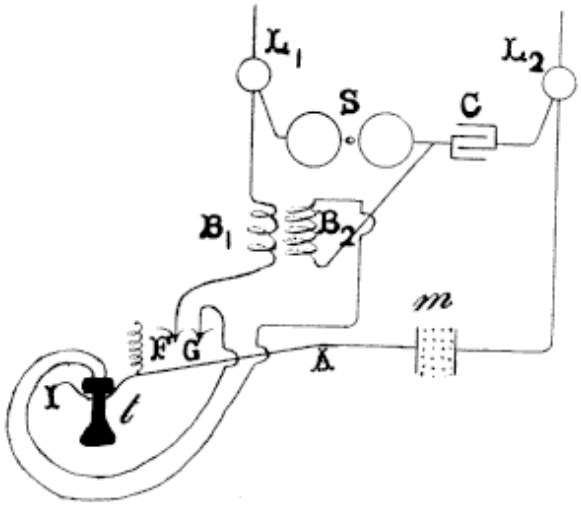


FIG. 479.

A la fourche-commutatrice A1, qui supporte le téléphone à l'état de repos, se rattache le microphone *m* de grande résistance, relié d'autre part à L_2.

Quand on décroche *t*, la fourche se relève et ferme, par les contacts F et G, deux nouveaux circuits comportant l'un : l'enroulement primaire B_1 d'une bobine d'induction, l'autre : le téléphone et l'enroulement secondaire B_2 de la bobine, ce dernier inversé, pour que les courants qu'il émet soient concordants avec le courant dérivé qui le traverse par rapport au circuit extérieur.

Commutateur. — Après avoir emprunté les appareils de protection et d'essai, le circuit d'une ligne d'abonné L_1 L_2 (fig. 480), aboutit d'une part à la suite de jacks généraux G, G_1,... et au jack local *g*, montés en dérivation et, d'autre part, à un relais

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dit de *coupure* R_1, dont les armatures établissent la communication des deux fils de ligne avec 9 accumulateurs d'une batterie A de 11 éléments, dont le positif est sur terre par l'intermédiaire d'un relais R_2 dit *de ligne* et d'une lampe L', qui accuse par son incandescence une mise sur terre accidentelle du fil L_1, tout en empêchant, par sa résistance (60 ohms), la batterie de débiter alors un courant trop intense.

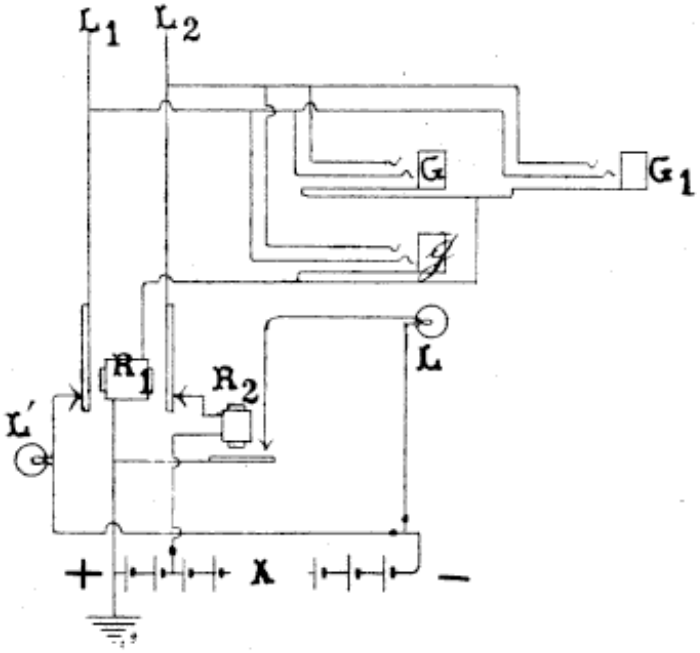


FIG. 480.

Lorsque l'abonné décroche son téléphone, il ferme un circuit en dérivation sur le condensateur de son poste, de sorte que le courant de la batterie peut dès lors passer. Le relais R_2 est activé, il attire son armature, ce qui ferme le circuit de la lampe d'appel L, placée sous le jack local *g* de l'abonné considéré, et par conséquent provoque l'allumage de cette lampe.

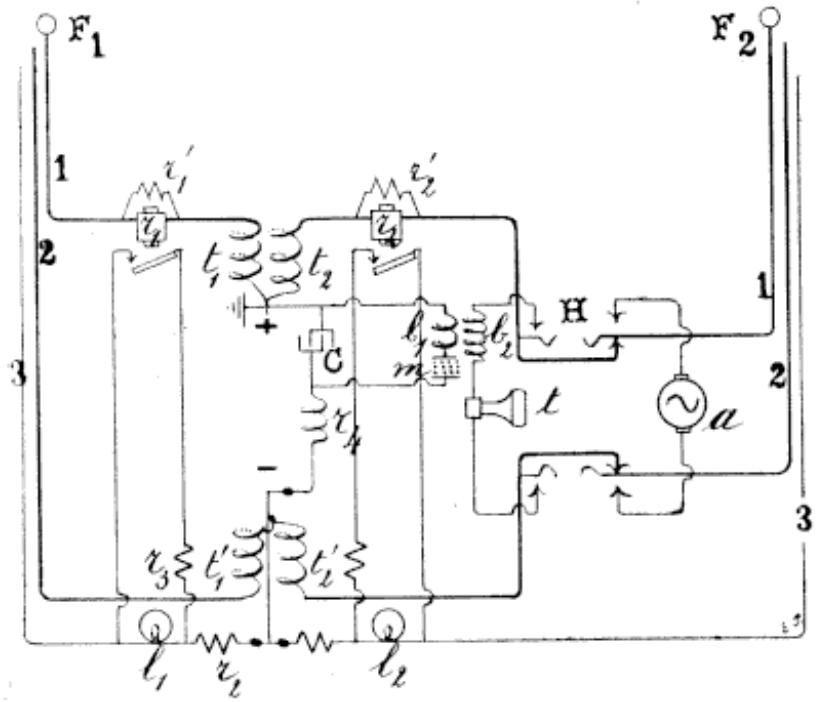


FIG. 481.

Avant d'aller plus loin, voyons quels sont les organes conjoncteurs et leur agencement. L'opératrice dispose d'une série de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

paires de fiches F_1, F_2 (fig. 481), montées sur cordons souples à trois conducteurs. Le conducteur 1 de la fiche F_1, raccordé à la pointe, est en rapport avec un relais r_1 dit de *supervision*, l'enroulement t_1 d'un transformateur, puis le positif, mis à la terre, de la batterie; le conducteur 2 se raccorde à la seconde moitié t'_1 du même enroulement du transformateur et au négatif de la batterie; enfin, le conducteur 3 rattache au négatif de la batterie, par l'intermédiaire d'une résistance r_2, une lampe l_1 que l'armature du relais r_1 peut shunter par une résistance r_3. La fiche F_1 sert exclusivement à répondre aux abonnés.

Du côté de la fiche F_2 nous trouvons les mêmes organes : deux moitiés t_2 et t'_2 du second enroulement du tranformateur, un relais de supervision r_2 dont l'armature peut shunter la lampe l_2. En outre, une clé double d'appel et d'écoute H est intercalée dans les conducteurs 1 et 2 de F_2 permettant, quand on la pousse vers la droite de la figure, de connecter les conducteurs 1 et 2 de F_2 avec les pôles de l'alternateur d'appel a, c'est-à-dire de lancer des courants d'appel sur les fils 1 et 2 de F_2 et, quand on la pousse vers la gauche, de placer en dérivation sur les conducteurs 1 et 2 des deux fiches, le poste de l'opératrice représenté par le téléphone serre-tête t et l'enroulement secondaire b_2 d'une bobine d'induction, dont le primaire b_1 et le microphone m s'alimentent aux bornes d'un condensateur c, dérivé sur les accumulateurs par l'intermédiaire d'une résistance inductive r_4. Un condensateur de 2 μF, omis sur la figure, est intercalé dans le circuit secondaire, pour empêcher le fonctionnement du relais de supervision r_2, chaque fois que l'opératrice se met sur écoute.

Réception d'une demande. — Quand un abonné décroche son téléphone, sa lampe de ligne s'allume ainsi que nous l'avons vu plus haut. L'opératrice saisit une fiche F_1 et l'introduit dans le jack local de l'abonné demandeur. Par cette manœuvre, la pointe de la fiche déplace la lame courte D du jack et se met donc en contact avec elle, tandis que la lame longue B s'appuie sur la nuque de F_1. En d'autres termes, les deux conducteurs 1 et 2 de F_1 sont connectés avec les fils de ligne L_1, L_2 de l'abonné

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

appelant. Cet abonné ayant décroché son récepteur, un courant traverse le relais r_1, dont l'armature est attirée. D'autre part, le col de F_1, en relation, par la lampe l_1, avec le pôle négatif de A, prend contact avec la bague du jack raccordée au pôle positif, par l'intermédiaire du relais de coupure R_1 (fig. 480), de sorte qu'un courant traverse ce dernier, la lampe l_1 et son shunt, tandis que les armatures de R_1 étant attirées, isolent les deux fils de ligne. Le circuit de R_2 se trouvant ainsi coupé, l'armature de ce relais retombe et la lampe de ligne L s'éteint.

En faisant basculer la clé H vers la gauche, l'opératrice place son poste en dérivation sur la ligne de l'abonné demandeur et peut prendre connaissance du n° qu'il désire.

Essai. — Connaissant ce n°, l'opératrice saisit la fiche F_2 et touche avec sa pointe la bague d'un jack général quelconque de l'abonné demandé. Si cet abonné est en communication, une fiche se trouve enfoncée en un de ses jacks dans une section, ce qui porte la bague de tous ces jacks à un certain potentiel intermédiaire entre zéro et la différence totale de potentiel de la batterie prise négativement. La tête de la fiche F_2 se trouve à un potentiel moindre et, dès lors, à chaque contact, un courant dérivé traverse t, lequel émet un « clac » trahissant l'occupation du circuit demandé.

Appel et mise en communication. — Si le clac ne se produit pas, la ligne de l'abonné demandé est libre. L'opératrice enfonce la fiche à fond dans le jack, fait basculer un instant la clé H vers la droite, ce qui provoque l'envoi de courants d'appel puis remet la clé dans la position médiane. Tant que l'abonné demandé ne vient pas décrocher son téléphone, la lampe de supervision l_2 reste allumée, puisqu'aucun courant ne passe dans le relais r_2; elle s'éteint, au contraire, dès qu'il l'a décroché.

Fin et rupture de la communication. — La communication étant terminée, les deux abonnés raccrochent leurs récepteurs. Les circuits de leurs postes étant coupés par les condensateurs, le courant de la batterie ne passe plus, les armatures des relais de supervision r_1 et r_2 retombent, les lampes l_1 et l_2 s'allument.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ainsi prévenue, l'opératrice enlève les fiches des jacks et tout rentre en l'état primitif.

Chaque opératrice dispose de 18 paires de fiches ; elle dessert un nombre d'abonnés dépendant de l'activité du service, à Bruxelles 160 sous le régime forfaitaire.

Les relais r_1 et r_2 sont shuntés par des résistances non inductives r'_1 et r'_2, ayant pour objet de diminuer la résistance du circuit de conversation.

Lampe pilote. — Pour ne pas surcharger la figure 480, nous avons omis un organe supplémentaire : la *lampe pilote* qui a pour but de répéter et mieux marquer l'appel de la lampe de ligne. C'est une lampe un peu plus forte que celles de ligne, actionnée par un relais monté en série avec ces dernières.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

CHAPITRE XVIII.

Effets physiologiques du courant. Facteurs en jeu. Mesures à prendre en cas d'accidents de personnes.

Effets produits [1]. — Le courant provoque la mort de deux manières différentes : 1° La dépense d'énergie dans le corps de la victime élève sa température, brûle certains points, détruit les tissus, calcine les os aux articulations qui peuvent être déboîtées, produit l'électrolyse des liquides, distend et rompt les canaux sanguins; 2° L'excitation des centres nerveux produit l'arrêt de la circulation, la paralysie du cœur, la syncope.

Facteurs en jeu. — Les premiers effets ne peuvent généralement être provoqués que par la haute tension ; les seconds peuvent résulter de tensions basses si, par suite de bons contacts, l'intensité est assez grande ou si le cœur se trouve sur le trajet du courant. Les conditions dans lesquelles se produisent les accidents sont au surplus extrêmement variables. Leur gravité est influencée non seulement par l'état, la constitution et les tares physiologiques des personnes atteintes, les endroits du corps touchés, le voltage, la puissance, la nature et éventuellement la fréquence des courants, mais encore par l'état momentané de l'installation au point de vue de son bon isolement et de la position de ses défauts par rapport au point où se produit le contact.

Il est donc pour ainsi dire impossible d'établir des règles fixes. On sait cependant que les alcooliques, de même que les

(1) A. MEYNIER. *Des Dangers des Canalisations et Appareils électriques.* Electricien du 17/7/09, p. 40.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

personnes atteintes de maladies du cœur, sont beaucoup plus sujettes que les autres à subir des accidents graves, et que le voltage est d'autant plus dangereux qu'il est plus élevé. Avec le courant continu, sauf dans le cas où les yeux sont atteints, les accidents graves pour des tensions ne dépassant pas 110 à 120 volts sont excessivement rares.

Le courant alternatif est plus dangereux, à cause des excitations périodiques qu'il produit; 100 volts efficaces (maximum 142 volts) constituent la limite à partir de laquelle il y a danger.

La fréquence joue aussi un rôle qui, chose curieuse, s'intervertit. D'après M. d'Arsonval, la nocivité des courants alternatifs croît avec la fréquence jusqu'à 2500 périodes par seconde; elle décroît ensuite et, à 10 000 périodes, des courants de faible intensité, loin d'être nuisibles à l'organisme, peuvent lui être utiles. On y recourt en effet en électrothérapie.

Processus à suivre dans les accidents. — Les personnes frappées par des manifestations électriques industrielles ou naturelles (la foudre) doivent, d'une manière générale, être considérées comme asphyxiées. Pour agir efficacement, il y a lieu de *supprimer d'abord la cause de l'accident* et d'*appliquer ensuite immédiatement le traitement approprié*, tout en requérant l'*aide d'un médecin*.

Suppression de la cause.— *A*. PAR ÉLOIGNEMENT. — Il faut écarter le patient des conducteurs électriques et, pour éviter de recevoir soi-même des commotions dangereuses, mettre des gants en caoutchouc, s'envelopper les mains plusieurs fois avec des vêtements (de préférence en laine), couverture, ceinture de flanelle; employer, pour éloigner les conducteurs, une canne ou un bâton de bois sec; saisir la victime par les vêtements; s'isoler soi-même du sol en se plaçant sur des tapis, vêtements, planches sèches et, en tous cas, éviter soigneusement de toucher simultanément deux conducteurs.

Si la victime est suspendue, il faut naturellement prendre des mesures pour atténuer la chute, en amortissant celle-ci par des matelas, bottes de paille, etc, ou en faisant usage de cordes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

B. Par extinction du courant. — S'il n'est pas possible d'arriver à un résultat net ou rapide de cette manière, il convient de faire suspendre l'action du courant en demandant immédiatement à l'usine d'arrêter les machines, ou de manœuvrer les interrupteurs commandant le circuit, siége de l'accident. Si l'application de ces mesures est trop longue ou présente des difficultés spéciales, les personnes du métier devront chercher à mettre en court-circuit les conducteurs au moyen d'une chaîne ou d'un fil métallique, pour faire sauter les fusibles de la centrale, ou couper les fils avec une hache à manche de bois sec. Ces deux opérations se feront avec beaucoup de précaution et seulement par des personnes absolument compétentes.

Soins à donner. — On transporte la victime dans un local aéré et on congédie tous ceux dont la présence n'est pas nécessaire. On enlève les habits couvrant le haut de son corps, on dégrafe ou déboutonne tout ce qui peut la serrer; un rouleau qui servira de coussin, à défaut de mieux, est fait avec les vêtements enlevés.

A. La victime respire encore. — Le rouleau d'habits est placé sous la tête de manière que celle-ci soit légèrement inclinée, et l'on applique sur le front des compresses d'eau froide ou de glace.

B. La victime ne respire plus. — Le rouleau d'habits est placé sous ses épaules. On lui ouvre la bouche de force au besoin, par exemple avec un morceau de bois et non avec un objet métallique, pour ne pas détériorer les dents; on sort la langue et on l'attache sur le menton avec un linge propre. Puis, s'agenouillant derrière la tête, on saisit les avant-bras près des coudes et on les presse fortement sur la poitrine (fig. 483). Par cette opération, l'air se trouvant dans les poumons est expulsé. On reste un instant dans cette position, puis on tire les bras à soi en les allongeant au-dessus de la tête du patient (fig. 482), ce qui distend la poitrine et fait rentrer l'air dans les poumons. Cette position est maintenue deux secondes, pour revenir à la position première, et ainsi de suite, quinze à vingt fois par minute. On

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

obtient le rythme nécessaire en comptant jusque cinq dans chaque position.

L'opération doit être continuée d'une manière régulière, jusqu'à ce que la victime commence à respirer seule. En l'absence de résultats, on ne devra s'arrêter qu'après deux heures au moins.

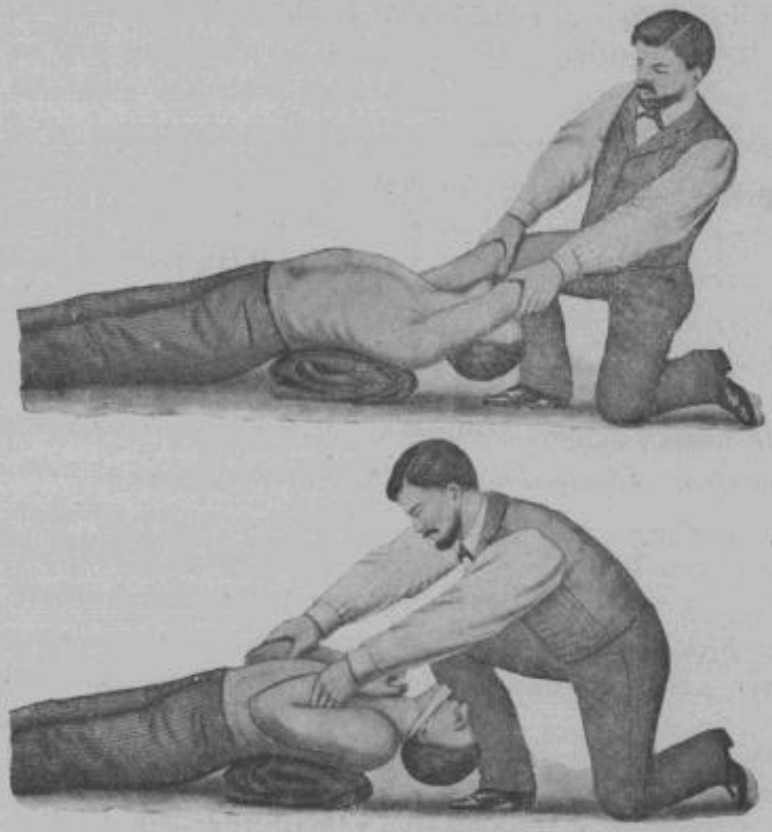


Fig. 482 et 483.

Pour augmenter l'efficacité du traitement, une seconde personne peut pratiquer la traction rythmée de la langue, ce qui se fait en même temps que la respiration artificielle, en tirant la langue lorsque les bras sont allongés et la faisant rentrer au moment de la compression.

Dès que le patient paraît revenir à la vie, on modère le mouvement sans l'abandonner, jusqu'à ce que la respiration soit définitivement rétablie. En même temps, on cherche à ramener la circulation en frictionnant la surface du corps, en flagellant le tronc avec les mains ou avec des serviettes mouillées, en jetant de temps en temps de l'eau froide sur la figure, en faisant respirer de l'ammoniaque ou du vinaigre.

Quand la victime a repris connaissance, on lui administre un stimulant chaud : grog, thé, café, au moyen d'une petite cuillère.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

Préface V

CHAPITRE I. — PILES THERMO-ELECTRIQUES.

§ **1. — Généralités** 1

Effet Volta. Effet Seebeck. Loi des températures successives. Couple thermo-électrique. Inversion. Courbes de Gaugain. Pouvoir thermo-électrique. Piles thermo-électriques.

§ **2. — Description et usage de quelques piles thermo-électriques** 6

Pile de Nobili et Melloni, de Noé et Rebicek. Pyromètre Le Chatelier. Pile Clamond et Carpentier. Rendement. Usages.

CHAPITRE II. — PILES HYDRO-ELECTRIQUES.

§ **1. — Principales piles hydro-électriques** 11

Piles sans dépolarisant. Pile de Volta. *Piles à dépolarisant solide.* Elément Leclanché. Leclanché à agglomérés. Leclanché-Barbier. Warnon. Eléments secs. De Lalande et Chaperon. Modification Edison. *Piles à dépolarisant liquide et à un seul liquide.* Elément Grenet. *Piles à deux liquides.* Eléments Daniel, Gravity, d'Infreville, Bunsen. *Piles étalons.* Eléments au sulfate de cuivre, Latimer Clarck, Weston ou au cadmium. *Choix des constituants des piles.* Pôle négatif. Pôle positif. Cloisons et récipients poreux.

§ **2. — Energie fournie par les piles hydro-électriques** . 26

Quantités de substances réagissant dans une pile.

§ **3. — Essai des piles hydro-électriques** 29

Essai à circuit ouvert. Essai télégraphique. Essai téléphonique. Essai de polarisation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

CHAPITRE III.— LES DYNAMOS A COURANT CONTINU.

§ 1. — **Etude de l'induit** 33

INDUIT BIPOLAIRE EN ANNEAU. Noyau et bobinage. Collecteur et balais. *Diagramme des potentiels au collecteur. Procédé Mordey. Suppression des étincelles sous les balais. Décalage et réglage des balais. Influence de la selfinduction des sections. Réaction d'induit. Calcul de la force magnétomotrice à appliquer aux inducteurs pour compenser la réaction d'induit.* DIVERSES PERTES DANS L'INDUIT. 1° *Courants de Foucault dans le noyau et dans le fil induit.* 2° *Hystérèse.* 3° *Effet Joule dans l'enroulement. Enroulements divers. Induits multipolaires en anneau en quantité.* Dispositif Mordey. Balais multiples. Connexions équipotentielles. *Induits multipolaires en anneau en tension.* INDUITS BIPOLAIRES EN TAMBOUR. *Enroulements imbriqués ou bouclés. Répartition du potentiel au collecteur et dans les conducteurs voisins. Décalage des balais. Calage des balais perpendiculairement à la ligne neutre. Spires raccordées suivant des cordes. Réaction d'induit. Induits multipolaires en tambour enroulés en quantité.* Enroulements ondulés. *Formule générale des enroulements ondulés en tambour. Enroulements imbriqués.* TAMBOURS MULTIPOLAIRES EN SÉRIE. *Application aux induits bipolaires. Décalage des balais. Formule des anneaux en série.* ENROULEMENTS SÉRIES-PARALLÈLES. ENROULEMENTS MULTIPLES. *Emploi de plusieurs conducteurs par encoche et de conducteurs multiples. Comparaison des enroulements ondulés et imbriqués.* INDUIT EN DISQUE. *Constitution des noyaux induits : noyaux lisses et dentés. Comparaison des types d'induit : supériorité du tambour.* L'anneau. Le tambour. *Eléments constitutifs d'un induit. Force électromotrice et puissance des machines à courant continu.* Puissance approximative. Inductions et vitesses admises. Volume réel du fer. Dimensions relatives de l'induit. Densité de courant. Surface de refroidissement. Collecteur.

§ 2. — **Circuit magnétique des dynamos. Divers modes d'excitation** 84

Machines magnéto-électriques. Excitation indépendante. Auto-excitation. Amorcement. Inducteurs en serie. Inducteurs en dérivation. Inducteurs à excitation composée ou machines compounds. Princi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

pales formes des inducteurs. Inducteurs bipolaires. Multipolaires. Nombres de pôles à adopter. Flux perdu. Inductions admises. Densité de courant. Surface de refroidissement. *Construction des bobines magnétisantes.*

§ 3. — **Suppression des étincelles au collecteur. Rendements. Tableaux de distribution.** 98

Suppression des étincelles. Saturation des noyaux. Sectionnement des noyaux polaires. Formes spéciales données aux expansions polaires. Balais résistants. Pôles compensateurs. *Rendements. Tableaux de distribution.*

§ 4. — **Les caractéristiques.** 103

Généralités. Excitation indépendante. En série. Construction graphique des caractéristiques externe et interne d'après la caractéristique à circuit ouvert. *Machine en dérivation.* Construction graphique des caractéristiques externe et interne à l'aide de la caractéristique à circuit ouvert. *Machine compound.* Construction graphique des caractéristiques externe et interne à l'aide de la caractéristique à circuit ouvert. *Application des caractéristiques.*

CHAPITRE IV. — MOTEURS A COURANT CONTINU.

§ 1. — **Considérations générales : puissance, couple, rendement.** 118

Courant absorbé, puissance et couple. Rendement. Fonctionnement théorique. Fonctionnement pratique. Renversement du sens de la rotation. Rendement dans le fonctionnement en générateur et en moteur. Equations fondamentales.

§ 2. — **Divers types d'électromoteur et leur fonctionnement** 127

Nécessité d'employer un rhéostat de démarrage. DIVERS TYPES DE RHÉOSTATS DE DÉMARRAGE. Rhéostat liquide. Rhéostat métallique en boudins. Rhéostat émaillé. MOTEUR MAGNÉTO ET MOTEUR A EXCITATION INDÉPENDANTE. I *constante.* E *constante.* MOTEUR SÉRIE. I *constante.* Modification de la vitesse. E *constante.* Modification de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

vitesse. Renversement du sens de rotation. Emploi du moteur série. MOTEURS EN DÉRIVATION. I *constante*. E *constante*. Modification de la vitesse. Renversement du sens de rotation. Emploi du moteur shunt. Schémas d'installation. MOTEURS COMPOUNDS. Enroulements concordants. Enroulements différentiels. *Moteur cuirassé. Puissance approximative d'un moteur. Quelques cas particuliers d'application des moteurs.* Emploi d'accumulateurs. Système Léonard. Ilgner. Moteur de tension double de celle du réseau. *Projet d'installation d'un moteur.*

CHAPITRE V. — COUPLAGE ET ESSAI DES DYNAMOS.

§ 1. — **Couplage.** 143

Dynamos série, en dérivation, compounds.

§ 2. — **Essais** 146

Méthode de Swinburne. Machine série, générateur, moteur. Machine en dérivation. Exactitude de la méthode. Séparation des pertes. Méthode de Housman, de Bienaimé.

CHAPITRE VI. — LES ACCUMULATEURS.

§ 1. — **Généralités** 155

Rendements. Facteurs spécifiques. Substances essayées.

§ 2. — **Théorie, composition et fonctionnement des accumulateurs au plomb, essai au cadmium** . . 158

Formation. Théorie de la double sulfatation. Moyen d'accélérer la formation. Moyens chimiques. *Moyens physiques :* tartinage et chauffage. *Electrodes à formation autogène ou hétérogène. Forme générale et disposition des électrodes.* Forme spiraloïde, plane, surface active, forme massive. *Séparation et fixation des électrodes. Electrolyte.* Liquide libre. Liquide immobilisé. Variation de la force électromotrice avec la densité. *Récipients.* Installations fixes, mobiles. *Montage d'une batterie. Résistance intérieure. Divers modes de charge. Variation du voltage avec le régime. Régimes normaux de charge et de décharge. Aspect des électrodes.* Après la charge.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

Après la décharge. *Variation de la capacité avec le régime, ses causes. Caractéristiques des charges et décharges normales.* Variation du voltage. *Chute de voltage spontanée. Variation de la densité de l'électrolyte à la charge et à la décharge. Rendements. Durée. Conservation d'une batterie. Locaux. Détermination de l'état des électrodes d'une batterie.* Essai au cadmium.

§ 3. — **Quelques types d'accumulateurs** 177

Tudor. Industrielle d'Accumulateurs. Gottfried Hagen.

§ 4. — **Usage des accumulateurs. Puissance. Calcul d'une batterie. Schéma d'installation. Survolteur. Batterie-tampon** 180

Usage. Puissance massique. Calcul d'une batterie. Calcul du poids. Nombre d'éléments. Chargement de la batterie. *Schéma d'une installation.* Remarque sur la construction des adjoncteurs. Automaticité. Emploi d'un survolteur. *Batterie tampon.* Courbe caractéristique d'une batterie. *Survolteur différentiel à courant constant système Entz.*

CHAPITRE VII. — DIVERS MODES DE REPRÉSENTATION DES COURANTS ALTERNATIFS.

§ 1. — **Par les vecteurs** 188

Représentation graphique des fonctions sinusoïdales. Applications. Evaluation graphique de la puissance d'un courant alternatif. Partage du courant entre des dérivations quelconques. Impédance combinée, détermination graphique. Cas d'impédances dérivées égales. *Remarque sur les forces contre-électromotrices développées par le courant dans un circuit. Lois de Kirchhoff pour les ondes alternatives. Autre mode de représentation vectorielle.*

§ 2. — **Repésentation symbolique ou par les imaginaires.** 201

CHAPITRE VIII. — LES ALTERNATEURS.

§ 1. — **Les alternateurs monophasés** 206

1° *Inducteur fixe et induit mobile.* Première machine d'induction

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

de Siemens. Machine Siemens à disque. Dynamo bipolaire à anneau. 2° *Inducteur mobile et induit fixe.* Machine Gramme à anneau. Induit en tambour. 3° *Inducteur et induit fixe ou alternateur à fer tournant.* Machine d'Oerlikon. *Comparaison des trois systèmes. Bobinage des induits en tambour.* Bobines longues, courtes. *Tambour tournant.* Montage en dérivation, en série. *Tambour fixe. Force électromotrice des alternateurs. Réaction d'induit. Excitation des inducteurs. Courant maximum. Caractéristiques d'un alternateur. Etude graphique.* Méthode de Behn-Eschenburg. Diagramme simplifié.

§ 2. — **Couplage des alternateurs monophasés** 225

Couplage en série. — Influence d'un déphasage du courant en avant. Etude graphique. *Couplage en parallèle.* Adjonction d'un alternateur. Suppression d'un alternateur. *Cas de plus de deux alternateurs. Indicateur de phase.* Couplage à l'extinction. Couplage à l'allumage. Cas du haut voltage. *Synchroniseur.*

§ 3. — **Essai et rendement des alternateurs monophasés** 236

Essais de rendement. Mesure directe. Méthode des pertes séparées. *Essais de régulation. Procédés directs. Courbes de régulation. Procédés indirects. Rendements.*

§ 4. — **Les courants polyphasés** 240

Propriété fondamentale des systèmes polyphasés. Divers modes de montage. Montage en étoile, en polygone, semi-polyphasé. *Courants polyphasés usuels.* Biphasé. Triphasé. *Représentations schématiques. Le champ magnétique tournant. Changement du sens de rotation d'un champ tournant.* Biphasé, triphasé.

§ 5. — **Les alternateurs polyphasés** 252

Alternateur biphasé, triphasé. Montage en étoile. Mesure d'une puissance triphasée étoilée. Méthode des trois wattmètres. Méthode des deux wattmètres. *Montage en polygone.* Raison de la préférence donnée au montage en étoile. Mesure d'une puissance triphasée en triangle. *L'induit bipolaire à anneau comme alternateur polyphasé.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

§ 6. — Couplage, essai et rendement des alternateurs polyphasés 261

Couplage des alternateurs polyphasés. Indicateur à feux tournants. Synchroniseur d'Evershed. *Essais. Rendements. Compoundage des alternateurs. Emploi d'une commutatrice en opposition avec une source constante. Système Marius Latour.*

CHAPITRE IX. — LES ALTERNOMOTEURS. 268

§ 1. — Moteurs synchrones. 269

MOTEUR SYNCHRONE MONOPHASÉ. a) *Alimentation sous courant efficace constant.* b) *Alimentation sous force électromotrice efficace constante.* Etude graphique. Surexcitation des moteurs synchrones. Mise en marche. Indifférence du sens de rotation. *Réaction d'induit.* MOTEUR SYNCHRONE POLYPHASÉ. *Démarrage des moteurs synchrones.*

§ 2. — Moteurs asynchrones à bagues et en cage d'écureuil 277

MOTEUR ASYNCHRONE POLYPHASÉ. Discussion de la valeur du couple. Couple maximum. Démarrage. Synchronisme. Dépassement du synchronisme. *Induit en cage d'écureuil. Moteur Boucherot. Moteurs multipolaires. Bobinage des moteurs asynchrones.* Inducteur. Induit. *Caractères spéciaux et cas d'emploi des deux systèmes.* 1° Moteurs en cage d'écureuil ou en court-circuit. 2° Moteurs à bague ou à rotor bobiné. *Rendement.* MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ. *Démarrage des moteurs monophasés. Rendement.*

§ 3. — Alternomoteurs à collecteur. 294

MOTEUR MONOPHASÉ. *Moteur série à collecteur. Moteur à répulsion. Moteur mixte ou moteur Latour.* Réglage de la vitesse. MOTEUR TRIPHASÉ A COLLECTEUR.

§ 4. — Essai des alternomoteurs 305

ESSAI DES MOTEURS SYNCHRONES. *Rendement. Courbes en V.* ESSAI DES MOTEURS ASYNCHRONES. *Glissement. Essai au frein. Mesure du glissement.* Moteur à bagues. Moteur sans bagues. Mesures des résistances. *Représentation des résultats. Essais de démarrage. Autres méthodes. Moteur asynchrone monophasé.* MOTEURS A COLLECTEURS.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

CHAPITRE X. — LES TRANSFORMATEURS.

§ 1. — Courants alternatifs transformés en courant alternatifs 312

APPAREILS HOMOMORPHIQUES. *Transformateurs monophasés. Théories simplifiées. Théories complètes. Pertes d'énergie dans les transformateurs.* 1° *Transformateurs à noyaux.* Noyau. Bobines. *Comparaison des deux systèmes. Autotransformateur. Transformateurs polyphasés.* Refroidissement et isolation des transformateurs. *Coefficients de construction admis. Rendements et poids. Essais d'un transformateur. Essais d'isolement. Vérification rapide du bon fonctionnement. Courant et dépense à vide. Mesure du rapport de transformation. Coefficient de régulation. Mesure du rendement. Essais de durée.* TRANSFORMATEURS HÉTÉROMORPHIQUES. *Bobine de Ruhmkorff. Rupteurs.* a) *Mécaniques.* b) *Electrolytiques.* Wehnelt. Caldwell. *Transformation des courants biphasés en triphasés.* Système Scott. *Transformation des courants triphasés en courants alternatifs.* Système Ulbricht.

§ 2. — Courants alternatifs en continus et réciproquement 334

Moteur-générateur. Commutatrice ou convertisseur. Essai des commutatrices. Rapport de transformation à vide. Rendement. *Comparaison des deux systèmes précédents. Permutatrice. Clapet ou redresseur électrolytique.* Formation. Applications. *Convertisseur Cowper-Hewit.* Pour courant triphasé. Pour alternatif simple.

§ 3. — Courant continu en continu 342

Survolteur. Dynamo série, en dérivation, compound différentielle.

CHAPITRE XI. — LES LIGNES ÉLECTRIQUES.

§ 1. — Choix du conducteur. Circuits aériens 343

Fer, cuivre et dérivés, aluminium. *Tension à donner au fil.* Action du vent, givre, neige et glace. *Effet de la température. Emploi du dynanomètre. Pince à tirer. Joints.* Manchon Baron. Joint Britannia. Joint Arld. *Isolateur. Basse et moyenne tension.* Roulette. Iso-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

lateur à cloches, à l'huile. *Haute tension.* Isolateur en chapelet, en plusieurs pièces. *Attache du fil sur l'isolateur. Ferrures. Sourdines. Poteaux en bois.* Supériorité des longues portées. *Poteaux métalliques.* Ecartement des fils. *Introduction dans les immeubles.*

§ 2. — Conducteurs recouverts 367

Nature et forme du conducteur. Cuivre. Conducteurs Cordés. *Isolants.* Caoutchouc. Gutta-percha. Papier. Toile vernissée. *Canalisations extérieures.* Câbles aériens. Conducteurs nus posés en caniveaux sur isolateurs. Câbles tirés dans des conduites. Câbles armés. *Canalisations intérieures.* Fils sous coton et soie. Tubes genre Bergman. Systèmes Peschel, Kuhlo. LIAISON DES CONDUCTEURS RECOUVERTS. 1° *Entre eux.* Fils de petits diamètres. 2° *Aux appareils et tableaux.* Fils minces. Gros conducteurs. *Isolement des lignes.* Essai de rigidité diélectrique. *Indicateurs de terre.*

§ 3. — Impédance des lignes. Effets Kelvin. Détermination de la section 378

IMPÉDANCE DES LIGNES. *Courant alternatif simple.* COURANTS TRIPHASÉS. DÉTERMINATION DE LA SECTION DES CONDUCTEURS. 1° *Effet Joule.* Lignes en fil nu. Conducteurs sous caoutchouc en tubes. Conducteurs torsadés sur isolateurs. 2° *Chute de voltage.* 3° *Condition d'économie, règle de Kelvin.*

§ 4. — Appareils accessoires : commutateurs, interrupteurs, fusibles, parafoudres et limiteurs de tension 391

COMMUTATEURS ET INTERRUPTEURS. *Interrupteurs à main.* A rupture lente. Rupture brusque. Avec pare-étincelle. *Interrupteurs automatiques.* FUSIBLES, COUPE-CIRCUITS OU SURETÉS. Lampes et fils multiple. Edison. *Emplacement des fusibles. Degré de sécurité obtenu.* PROTECTION CONTRE LA FOUDRE. *Parafoudre des supports.* Fil de terre général. *Parafoudre des conducteurs.* Parafoudre à cornes. Déchargeur à cylindre. Parafoudre à jet d'eau. *Parafoudres des appareils et câbles.* Parafoudre à pointes. Parafoudre à vide de Siemens. Parafoudre électrolytique. *Protection contre les surtensions : limiteurs de tension. Protection contre les ruptures de fil.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

CHAPITRE XII. — TRANSPORT DE L'ÉNERGIE.

§ 1. — **Choix du courant.** 404

Courant alternatif. Courant continu. Triphasé en étoile, en polygone. *Biphasé* avec quatre fils de ligne, avec trois fils de ligne.

§ 2. — **Courants continus** 409

GÉNÉRALITÉS. *Systèmes utilisés. Excitation indépendante. Machines série. Eléments d'un transport à distance.*

§ 3. — **Courants triphasés** 414

GÉNÉRALITÉS. *Calcul d'une transmission triphasée.*

CHAPITRE XIII. — DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE.

§ 1. — **Courants continus** 414

INTENSITÉ CONSTANTE. *Distribution de l'énergie mécanique.* Génératrices. Réceptrices. Sécurité. *Récepteurs électrolytiques.* TENSION CONSTANTE. *Conducteurs cylindriques. Câbles coniques. Dérivation avec récepteurs en série. Système à 3 fils. Compensateurs.* Efficacité du compensateur. Accumulateurs. *Système Von Dolivo Dobrowolski. Système à 5 fils. Distribution par réseau et artères. Généralités.* Répartition de la chute de voltage entre les distributeurs et les branchements. Nombre d'artères. Réglage de la tension. Survolteurs. Limite du rayon de distribution. Position de l'usine.

§ 2. — **Courants alternatifs et polyphasés** 434

Transformateurs isolés, groupés.

§ 3. — **Poids de cuivre nécessités par les divers courants** 436

Alternatif simple. Courant continu. Triphasé en étoile avec 4 fils. Triphasé en triangle. Diphasé avec 4 fils de ligne. Considérations générales. *Fréquence.*

§ 4. — **Calcul des artères, distributeurs et branchements** 439

ARTÈRES OU FEEDERS. DISTRIBUTEURS. *Simplification des schémas. Lois des moments. Distributeur fermé. Distributeur ordinaire. Sec-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

tion la plus économique. Application. MODIFICATION DE RÉSEAUX EXISTANTS. *Composantes des courants dérivés et potentiels aux nœuds. Méthode de Coltri.* Application. Modification de M. Buffa. *Branchements. Calcul des sections. Réseaux à courants alternatifs. Signes conventionnels.*

CHAPITRE XIV. — ÉCLAIRAGE.

Production des radiations lumineuses.

§ 1. — **Incandescence.** 460

Qualités des corps à utiliser. LAMPES AU CARBONE. *Fabrication des lampes. Divers modes d'attache des lampes.* Système Edison, Swan, à bayonnette. *Lampe portative, hermétique. Intensités lumineuses et voltages. Dimensions des filaments. Variation de la consommation spécifique avec le voltage normal et l'intensité lumineuse, avec l'âge de la lampe. Fonctionnement à voltage réduit, à haut voltage. Tension de rupture. Fonctionnement sous courant alternatif. Coût de l'éclairage par incandescence au carbone.* LAMPES AUX OXYDES ALCALINO-TERREUX. *Lampe Nernst.* LAMPES A FILAMENT MÉTALLIQUE. *Lampe Auer. Lampe au tantale. Lampes Wolfram, Osram. Lampes diverses. Consommation spécifique des lampes à incandescence et variation de la puissance lumineuse avec le voltage. Mise en activité des lampes.* Commande de plusieurs points. Commande alternative de deux groupes. Commande alternative et simultanée.

§ 2. — **L'arc voltaïque** 481

ARC AU CARBONE. *Production de l'arc à courant continu.* Crayons à mèche. Chute de potentiel dans l'arc. Stabilité et rendement. *Arc alternatif. Arc enfermé. Fabrication et dimensions courantes des crayons. Classification des lampes à arc. Conditions à remplir par les régulateurs. Régulateurs à courant constant.* Système à déclic. *Régulateurs à tension constante.* Allumage et fonctionnement. *Régulateur différentiel. Voltages nécessaires. Comparaison des trois systèmes.* Courant constant. Dérivation. *Mécanismes. Bougies électriques. Puissances et consommations.* ARCS A FLAMMES ET A LA MAGNÉTITE. *Lampe Bremer. Lampe Blondel. Particularités des lampes à flamme. Arc à la magnétite.* ARC AU MERCURE. *Lampe Cowper-Hewit. Lampe Quartz.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

§ 3. — **Répartition de la lumière. Modes d'alimentation des foyers. Données pratiques** 505

RÉPARTITION DE LA LUMIÈRE. *Incandescence. Arc.* Espaces découverts. MODES D'ALIMENTATION DES FOYERS. *Incandescence.* Dérivation directe. Système Weissmann. *Arc.* Intensité constante. Tension constante. Voltages limites. Fréquence. *Données pratiques.* Incandescence. Arc.

CHAPITRE XV. — TRACTION.

§ 1. — **Généralités** 510

CLASSIFICATION DES SYSTÈMES DE TRACTION. *Renforcement de la voie. Effort de traction. Roulement.* Palier. Rampes et pentes. Courbes. *Résistance de l'air. Démarrage. Puissance totale nécessaire.* Démarrage. En régime. *Adhérence. Puissances pratiques admises. Emploi de locomotives. Rampe maximum. Types de voitures. Trucks.* Truck rigide. Boggie. Essieux radiaux. Chasse-corps. *Nature du courant. Types des moteurs. Modification de la puissance et de la vitesse. Coupleur. Précautions à prendre au démarrage.*

§ 2. — **Alimentation directe** 524

Divers systèmes. CONDUCTEURS AÉRIENS. *Poteaux et consoles. Suspension de l'isolateur. Isolateur. Oreille. Conducteur de prise de courant. Artères. Trôlet.* Axial. Dickinson. *Archet. Mât. Eclissage électrique des rails. Joint Falk. Combinaisons de circuit réalisées par le coupleur. Appareils accessoires.* LE 3e RAIL. LE CANIVEAU. CONTACTS SUPERFICIELS.

§ 3. — **Alimentation indirecte.** TRACTION PAR ACCUMULATEURS 536

Charge lente, rapide. Calcul de la capacité nécessaire. Coupleur.

§ 4. — **Avant-projet de tramway électrique** 53

Nombre de voitures nécessaires. Effort moyen de traction. Puissance motrice moyenne des voitures. Puissance de l'usine.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.

CHAPITRE VI. — TÉLÉGRAPHIE. 543

SYSTÈME MORSE. *Transmetteur. Récepteur. Réception à l'ouïe.* Relais et parleurs. *Appareils d'appel.* Sonnerie vibrante. Annonciateurs. *Appareils de vérification.* Galvanoscope et milliampèremètre. *Commutateur suisse. Générateurs utilisés. Translateur. Relais polarisé.* Ralentissement de la transmission. *Amélioration du rendement. Duplex différentiel. Duplex par le pont de Wheastone. Communications directes et indirectes. Divers modes d'exploitation. Ligne à courant permanent.*

CHAPITRE VII. — TÉLÉPHONIE. 556

Microphone. Hughes. Grünenwald. Delville. *Renforcement de la transmission. Microphone à grande résistance. Solid-Back. Téléphone.* Récepteur à main. Téléphone serre-tête. Téléphone et microphone combinés. *Appareils d'appel.* Sonnerie vibrante. Machine magnéto-électrique. *Poste normal.* COMMUTATEURS. *Annonciateurs* de ligne, de fin de communication. *Jacks.* Jack fermé, ouvert. *Fiches et cordons.* A deux conducteurs, à trois conducteurs. *Clés d'écoute et boutons d'appel. Commutateur standard, multiple. Multiple à batterie centrale de la Western Electric Cy. Poste d'abonné. Commutateur.*

CHAPITRE VIII. — EFFETS PHYSIOLOGIQUES. ACCIDENTS. 580

Effets produits. Facteurs en jeu. PROCESSUS A SUIVRE DANS LES ACCIDENTS. *Suppression de la cause.* A. Par éloignement. B. Par extinction du courant. *Soins à donner* A. La victime respire encore. B. La victime ne respire plus.

ERRATA 597

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Errata.

P. 52, ligne 6, *au lieu de* ces bobines, *lire* les balais.
ligne 7, *biffer* d'ailleurs et *remplacer* trouvant par trouveront.

P. 67, ligne 11 du bas, *au lieu de* $m = 1$, *lire* $m = 2p$.

P. 68, fig. 51, *remplacer* p', p_1 et p_2 *par* y', y et y_2.

P. 75, ligne 14 du bas, *ajouter* et sauf dans l'exemple de la p. 73, ligne 8 du bas *après* l'induit, *ajouter* (fig. 54).

P. 102, ligne 11 du bas, *supprimer* pourront *ét* l'un ou l'autre; *remplacer* des *par* les.

P. 103, *au lieu de* § 2 *mettre* § 4.

P. 104, ligne 13 du haut, N' *au lieu de* N; dernière ligne, e_2 *au lieu de* e.

P. 123, ligne 14, *supprimer* l'indice i de τ_i.

P. 189, fig. 142, mettre b pour la projection de B sur l'axe des y.

P. 223, fig. 172, écrire $\omega l\, i_{eff}$ sur C F et $\omega \mathfrak{L}\, i_{eff}$ sur F D.

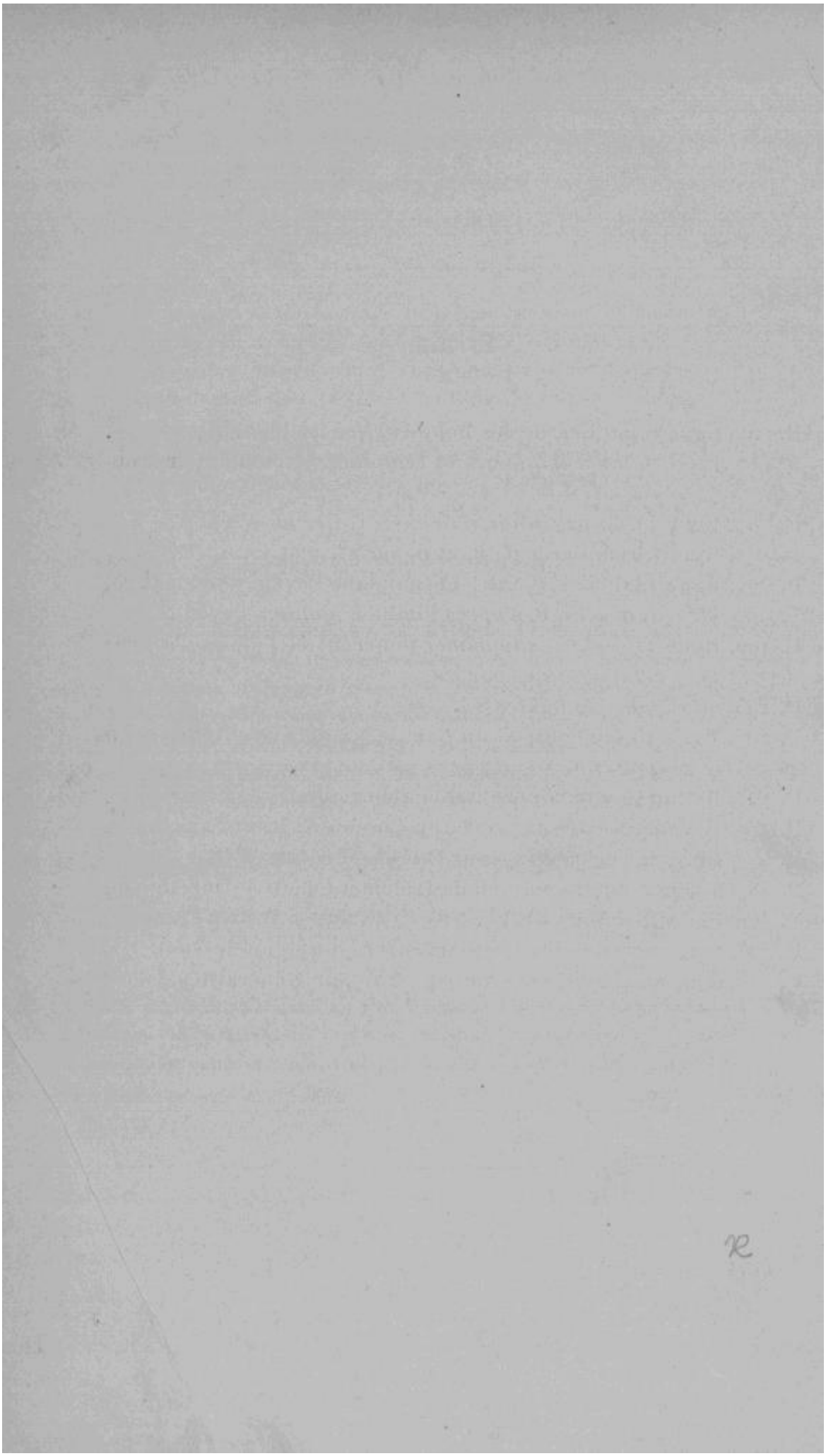
P. 384, à la manchette, *au lieu de* Isolement, mettre Impédance.

P. 422, ligne 18, *biffer* $= \Delta V'_1$.

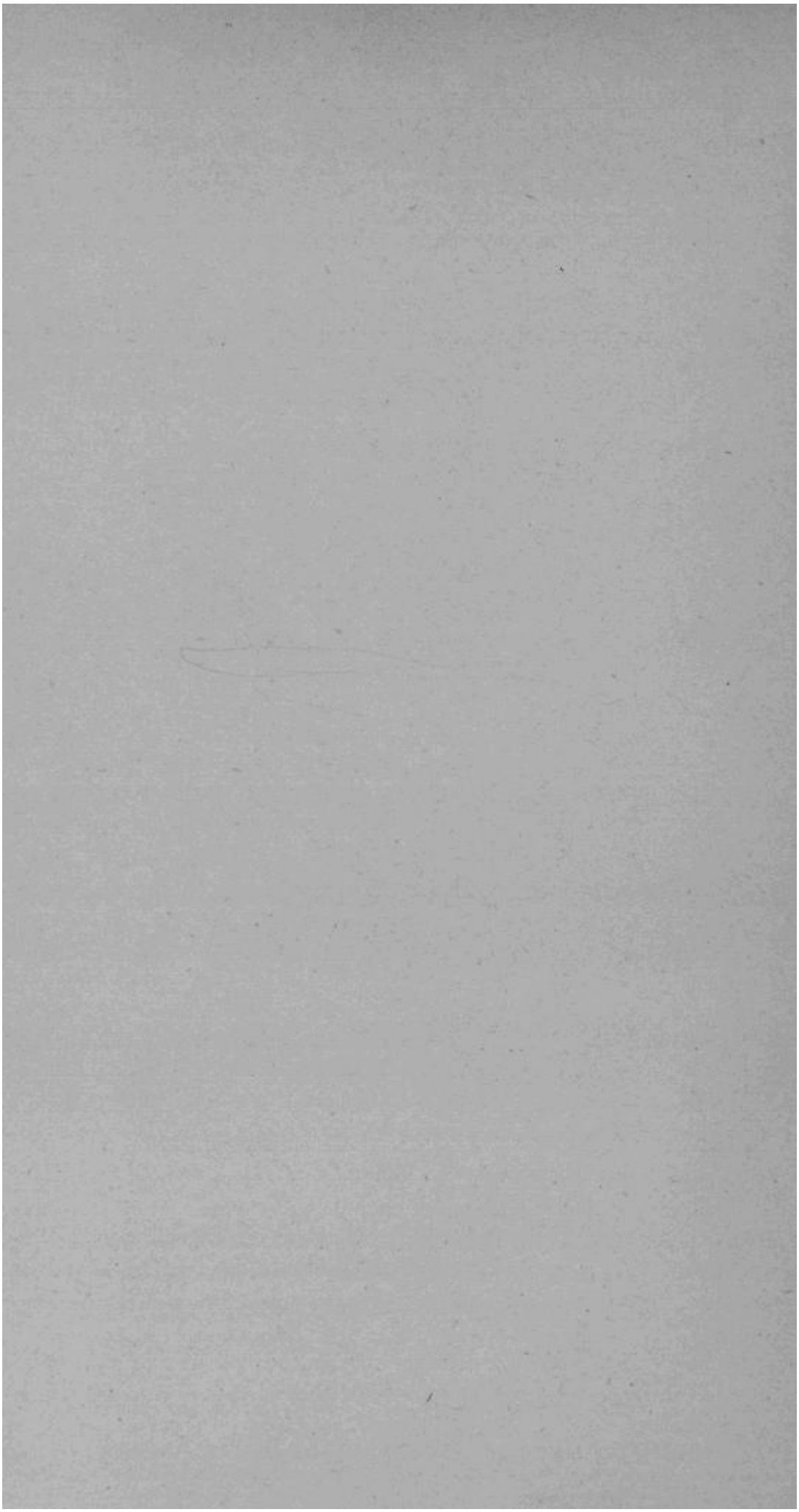
P. 483, la fig. 379 doit être retournée (crayon + au-dessus).

P. 513, à la manchette, *remplacer* par arc *par* Généralités.

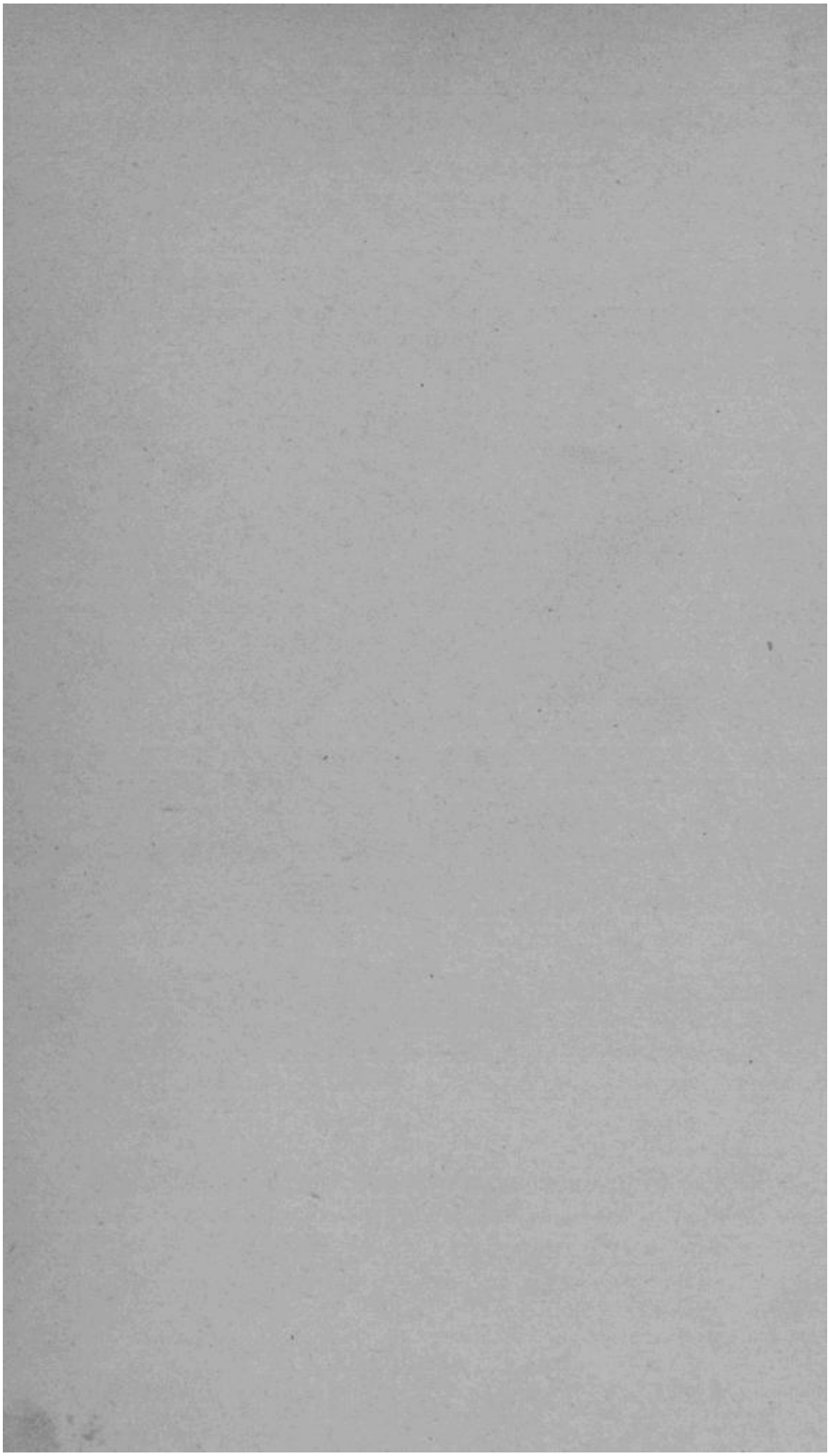
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



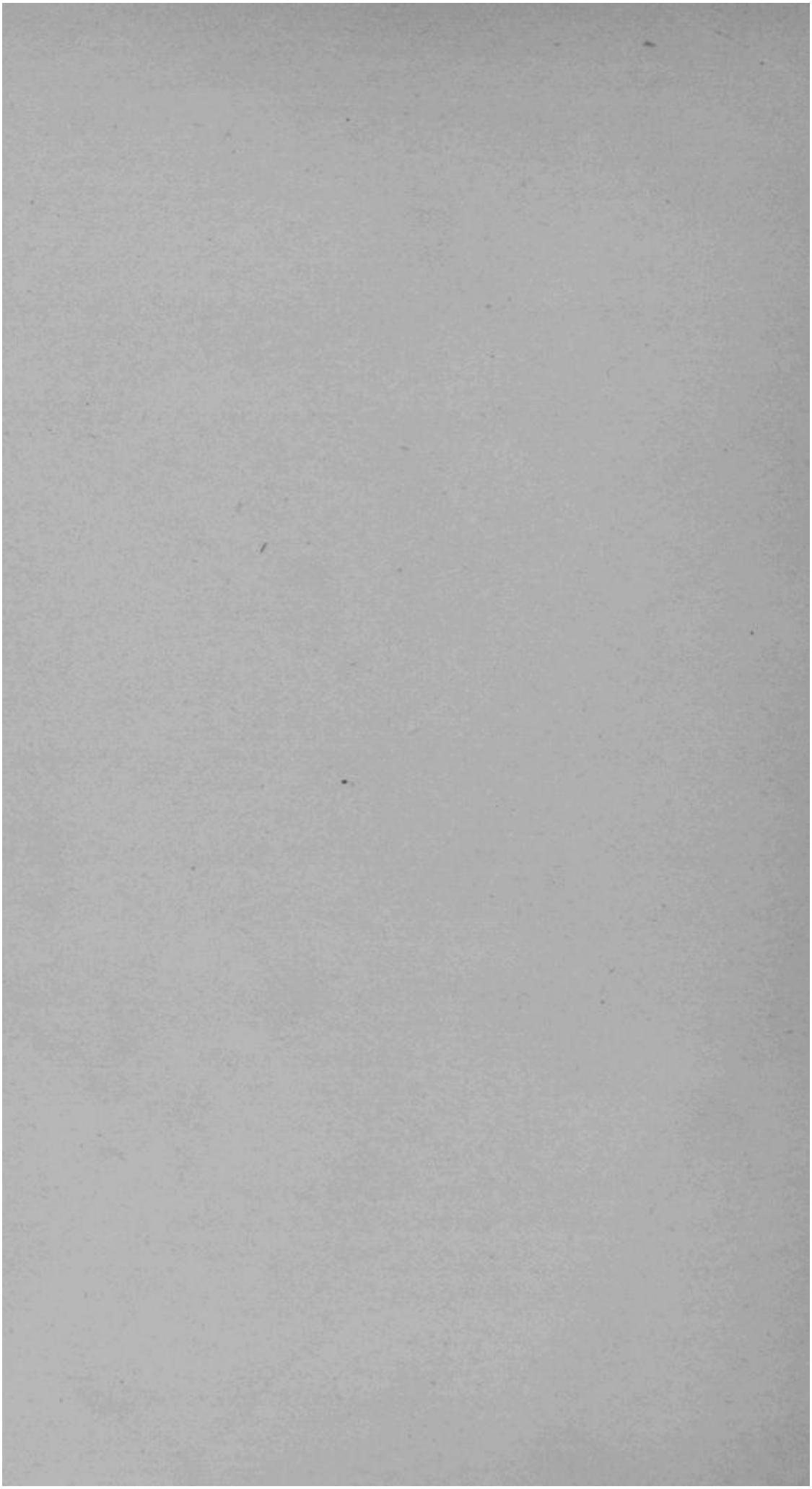
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



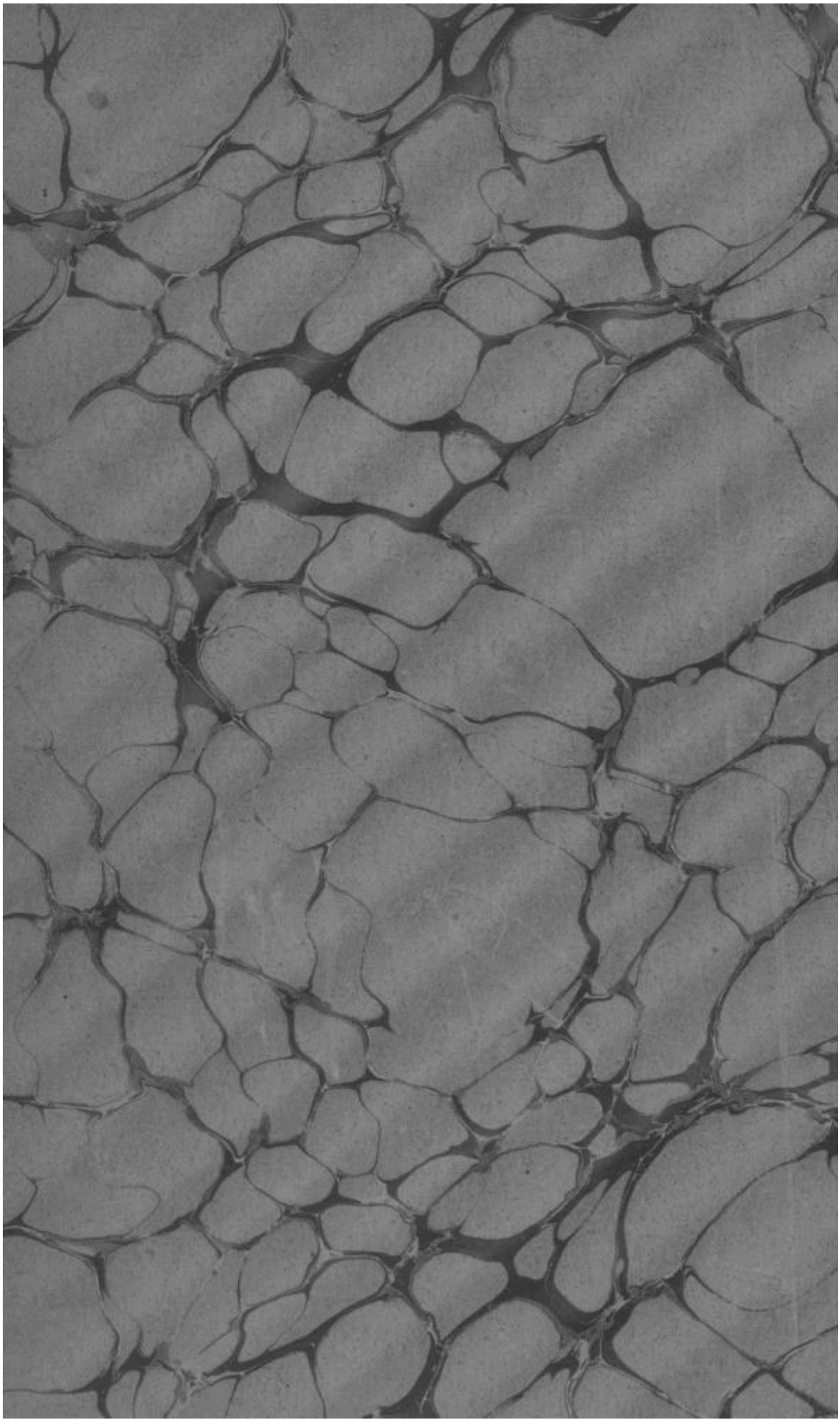
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



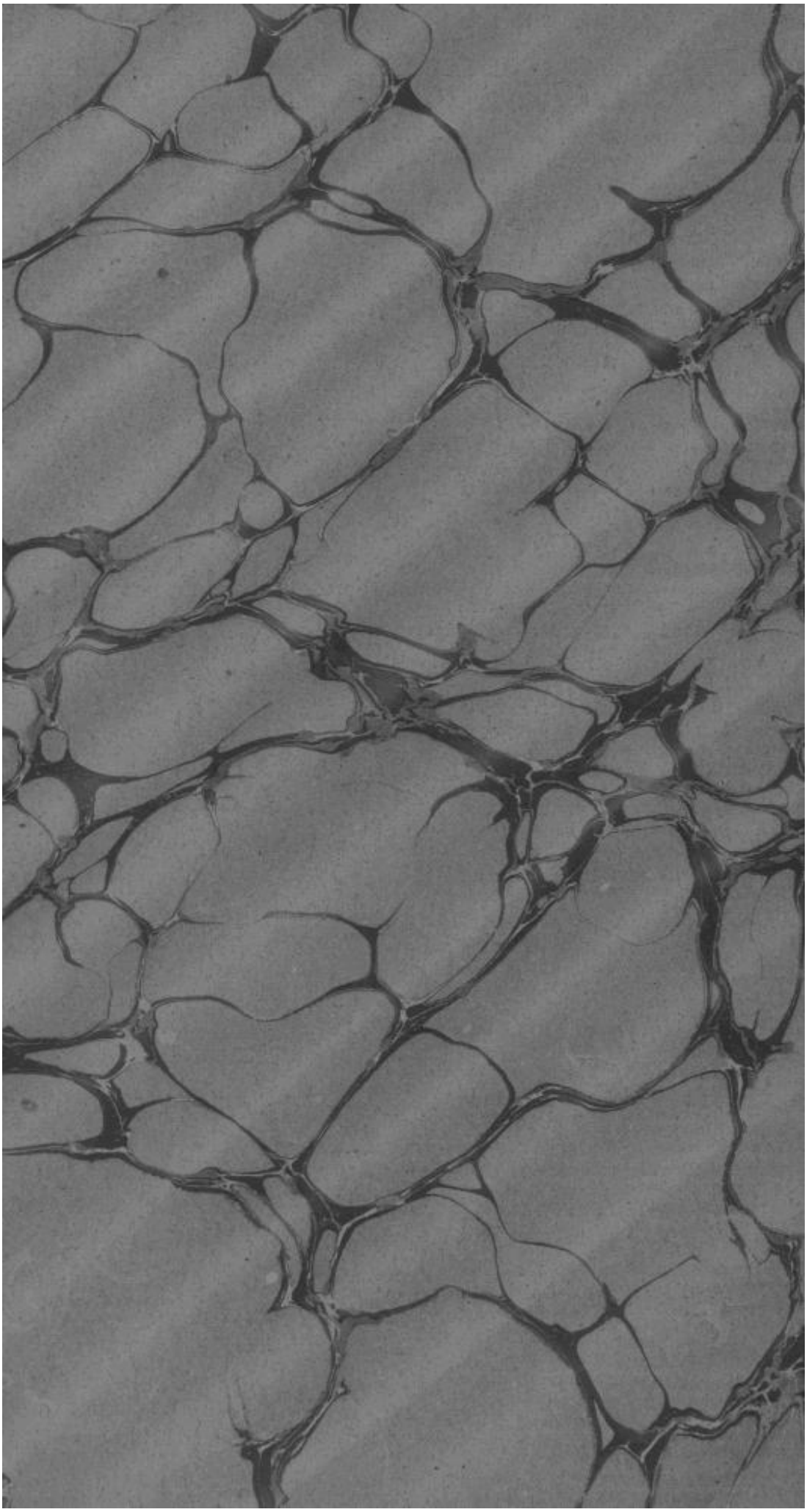
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



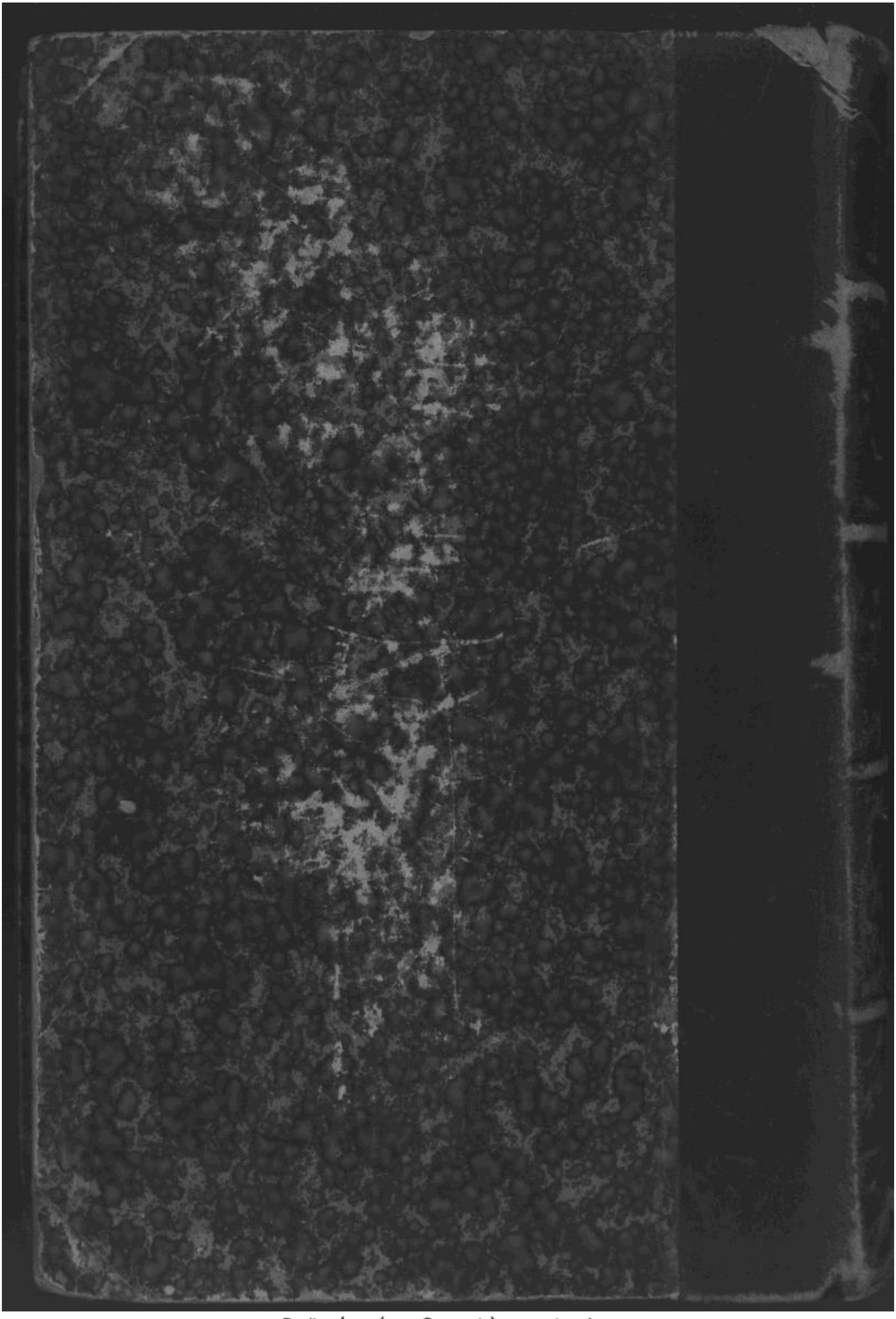
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires