

ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE

TRAITÉ

D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

II

- BARNI et MONTPELLIER. — Le Monteur électricien**, 1900, 1 vol. in-16 de 500 pages avec 120 figures, cartonné (*Encyclopédie industrielle*). 5 fr.
- BOUANT (E.). — La Galvanoplastie**, le nickelage, l'argenture, la dorure, l'électro-metallurgie et les applications chimiques de l'électrolyse, 1894, 1 vol. in-18 jés. de 384 p., avec 52 fig., cart. (*Encyclopédie industrielle*). 5 fr.
- BUIGNET. — Manipulations de physique**. Cours de travaux pratiques, 1 vol. in-8 de 788 pages, avec 265 figures et 1 planche, cartonné 16 fr.
- DE LA RIVE. — Traité d'électricité** théorique et appliquée, 3 vol. in-8, avec 447 figures 27 fr.
- GORDON (J.-E.-H.). — Traité expérimental d'électricité et de magnétisme** avec une introduction de M.-A. CORNU, de l'Institut, 2 vol. in-8, ensemble 1.332 p., 58 pl. et 371 fig . . . 35 fr.
- GRANGE (E.). — Des Accidents produits par l'électricité** dans son emploi industriel, in-8, avec 1 pl. 1 fr. 50
- GUN. — L'Électricité appliquée à l'art militaire**, 1 vol. in-16 de 380 pages, avec 140 fig. (*Bibl. scient. cont.*) 3 fr. 50
- IMBERT (A.). — Traité élémentaire de physique biologique**, 1895, 1 vol. in-8 de 1084 pages, avec 400 figures . . . 16 fr.
- LECADET. — Le Champ électrique de l'atmosphère**, 1898, 1 vol. in-8, 200 pages avec 3 fig. et 10 planches 6 fr.
- LEFEVRE (J.). — Dictionnaire d'électricité**, comprenant les applications aux sciences, aux arts et à l'industrie, par Julien LEFÈVRE, agrégé des sciences physiques, professeur au Lycée et à l'Ecole des sciences de Nantes. Introduction par M. BOUTY, professeur à la Faculté des Sciences de Paris, 2^e édition, 1896, 1 vol. gr. in-8 de 1250 pages, avec 1250 figures 25 fr.
- **Dictionnaire de l'Industrie**, 1899, 1 vol. grand in-8 de 924 pages, avec 847 figures 25 fr.
- **Les Nouveautés électriques**, 1896, 1 vol. in-16 de 412 pages, avec 157 fig. cart. (*Bibl. des conn. utiles*). 4 fr.
- MONTILLOT. — La Télégraphie actuelle** en France et à l'étranger, lignes, réseaux, appareils, téléphones, par le colonel Louis MONTILLOT, directeur de télégraphie militaire, 1 vol. in-16 de 334 pages, avec figures (*Bibl. scient. contemp.*). 3 fr. 50
- **L'Éclairage électrique**, guide pratique des électriciens et des amateurs 1894, 1 vol. in-18 jésus de 408 pages, avec 190 fig., cartonné (*Bibl. des conn. utiles*) 4 fr.
- PÉCHEUX. — Précis de physique industrielle**, 1899, 1 vol. in-16 de 576 pages, avec 464 figures, cartonné. 6 fr.
- PLANTÉ. — Phénomènes électriques de l'atmosphère** (foudre, grêle, trombes, aurores polaires, etc.), 1 vol. in-16 de 322 p. avec 50 fig. (*Bibl. scient. contemp.*) 3 fr. 50

RAYMOND BUSQUET

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

TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

TOME SECOND

Avec 288 figures dans le texte.

*Distribution des courants. — Transformateurs.
Accumulateurs. — Transmission de l'énergie. — Moteurs
Applications mécaniques. — Traction électrique.
Éclairage électrique. — Électro-métallurgie.
Galvanoplastie. — Canalisations. — Conduite des dynamos
Télégraphie et Téléphonie.*

PARIS

LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS

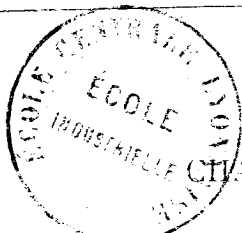
19, RUE HAUTEFEUILLE, PRÈS DU BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1900

Tous droits réservés.

ommage de l'auteur
R. Busquet

D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE



CHAPITRE XII

DISTRIBUTION DES COURANTS ÉLECTRIQUES

188. Classification des divers modes de distribution. — L'énergie électrique développée sous forme de courants par les générateurs ou sources d'électricité, doit être utilisée dans des appareils de diverses natures, lampes, moteurs, bains électrolytiques qui constituent les *appareils récepteurs*.

Ces appareils doivent être nécessairement reliés aux sources d'électricité par des canalisations conductrices ; le problème de la distribution comprend donc deux questions, celle de l'emploi des conducteurs d'une part, et celle de la disposition des récepteurs sur les canalisations d'autre part.

Il y a lieu de distinguer d'abord deux modes généraux de distribution : la *distribution directe* et la *distribution indirecte*.

La première, qui est évidemment la plus simple, utilise directement les courants tels qu'ils sont produits par les dynamos génératrices, c'est-à-dire avec la force électromotrice et l'intensité d'origine.

Dans le second système, au contraire, les courants engendrés par les dynamos sont transformés dans leurs

éléments constitutifs, force électro-motrice et intensité, avant d'être admis dans les récepteurs.

Pour effectuer ces modifications on a recours à des appareils supplémentaires qui portent généralement le nom de *transformateurs*, mais certains d'entre eux, comme nous le verrons, sont plus spécialement désignés sous le nom d'*accumulateurs* et de *condensateurs*.

La transformation ne peut donc que compliquer la distribution ; elle est pleinement justifiée toutefois par les avantages économiques qu'elle présente dans les exploitations industrielles. Elle rend en effet pratique l'emploi des hautes tensions, sans lesquelles on ne pourrait transporter l'énergie électrique à une distance notable, qu'au prix de dépenses excessives de canalisations.

On peut en effet transporter la même quantité d'énergie électrique par seconde, soit au moyen d'un grand courant sous faible tension, soit inversement avec un faible courant à haute tension. Or, si l'on admet, comme il convient, que la densité du courant soit limitée à un nombre d'ampères déterminé par millimètre carré de section du conducteur, soit un ampère par exemple, il est évident que la seconde solution, qui comporte peu d'ampères avec beaucoup de volts, donnera des conducteurs de plus faible section et partant plus économiques.

D'autre part, si l'on peut pratiquement faire circuler des courants à tension foudroyante, sur les conducteurs de transport, à travers la campagne, ces mêmes courants ne pourraient être admis raisonnablement à l'intérieur des habitations : d'où la nécessité des transformateurs qui modifient l'énergie, en élevant l'intensité aux dépens de la tension et réduisant celle-ci à un voltage pratiquement sans danger.

On voit déjà que la distribution indirecte comportera deux canalisations distinctes, l'une pour les courants d'origine ou *canalisation primaire*, l'autre pour les courants transformés ou *canalisation secondaire*. Il s'ensuit que les systèmes de canalisation dans les deux genres de distribution, directe et indirecte, seront notablement diffé-

rents, mais il n'en sera pas ainsi en ce qui concerne les récepteurs, qui seront disposés de même sur les conducteurs de distribution, dans les deux systèmes.

Nous décrirons donc d'abord les divers modes de distribution dans le système direct, et tout ce que nous aurons dit à cette occasion, touchant la disposition des récepteurs sur les conducteurs, s'appliquera aux distributions indirectes.

Distributions directes.

189. **Distribution en série.** — On aura tout de suite une idée des divers modes d'installation des récepteurs sur les conducteurs électriques, en se reportant aux dispositions employées pour l'accouplement des générateurs, piles ou dynamos.

On sait que les piles, par exemple, peuvent être groupées soit en *série* ou *tension*, soit en *dérivation*, *quantité* ou *parallèle*, soit dans le *système mixte*; les mêmes dispositions se retrouvent dans le groupement des récepteurs sur les canalisations.

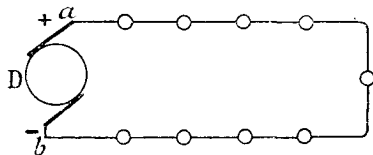
Nous nous occuperons d'abord de la distribution en série et nous supposerons dans tout ce qui va suivre, pour plus de simplicité dans l'exposition, que les récepteurs ne comprennent que des lampes et des résistances inertes, non des moteurs ni des bains électro-chimiques, qui développent, comme l'on sait, des forces contre-électro-motrices antagonistes.

Il ne faut pas perdre de vue les trois éléments de la distribution, qui sont : la source d'électricité ou l'usine génératrice représentée ici simplement par le collecteur et les balais de la dynamo D (fig. 276), la canalisation et les récepteurs.

Dans la distribution en série, un circuit unique part de la borne a, traverse les récepteurs enfilés sur le conducteur comme les grains d'un chapelet, et vient se souder

par son autre extrémité au second pôle *b*. L'ensemble constitue donc un circuit complètement fermé, quand il est en charge, bien entendu.

La conséquence de cette disposition est que toutes les lampes sont parcourues par le même courant, car le circuit



étant unique, le même nombre d'ampères passe évidemment en tous les points du circuit. Il est non moins évident que la différence de tension aux bornes de la

FIG. 276. — Distribution en série.

source doit être égale à la somme des chutes de tension dans chaque lampe.

Soit, en effet, $r = 5$ ohms la résistance commune à toutes les lampes que nous supposons identiques, et $i = 2$ ampères le courant qui traverse également tous les récepteurs ; chacune des lampes donnera lieu à une chute de tension du courant à travers sa résistance qui, d'après la loi d'Ohm, aura pour valeur :

$$e = r \times i = 5 \times 2 = 10 \text{ volts.}$$

Cette chute de tension à travers chaque récepteur est ce qu'on appelle la *différence de tension aux bornes dudit récepteur*, car c'est bien aussi la différence de tension qu'il faut appliquer aux bornes de la lampe pour qu'elle soit traversée par le courant nécessaire à son fonctionnement. Si donc on a placé 10 lampes semblables en série, la dynamo devra donner à ses bornes une hauteur de tension totale :

$$E = 10 \times 10 = 100 \text{ volts}$$

qui se répartit en chutes partielles successives, à travers les différentes lampes. L'énergie absorbée par chaque lampe est :

$$W = e \times i = 10 \times 2 = 20 \text{ watts.}$$

Cette énergie a encore pour expression, d'après la loi de Joule :

$$W = r \times i^2 = 5 \times 4 = 20 \text{ watts}$$

et l'on voit que r étant donné et résultant d'ailleurs de la construction de la lampe, l'énergie ne dépend que du courant i . Il faut donc que l'intensité du courant soit maintenue d'une manière invariable à la valeur voulue, soit ici 2 ampères, pour développer dans la lampe l'énergie capable de fournir la lumière normale convenue. Comme d'autre part le courant traversant chaque lampe se confond avec le courant total, nous dirons que ce courant même doit être constant; c'est pourquoi ce système de distribution est dit à *intensité constante*.

La constance de cet élément entraîne en pratique la variation du second, c'est-à-dire de la force électro-motrice ou de la tension aux bornes de la dynamo. Puisque chaque récepteur absorbe une tension déterminée, la tension totale devra en effet varier en plus ou en moins, suivant le nombre des récepteurs; la distribution est donc en même temps à *potentiel variable*. Il faut bien qu'il en soit ainsi, car l'intensité étant constante quel que soit le nombre de récepteurs, si le potentiel restait immuable, on arriverait à alimenter, sans dépense supplémentaire, autant de lampes qu'on voudrait, ce qui est contraire à la loi de la conservation de l'énergie, d'après laquelle on ne peut recueillir ni utiliser plus de travail qu'on n'en a produit.

Comme première conséquence de ce fait, la tension des distributeurs en série est généralement élevée, et atteindrait une valeur dangereuse si, dans le cas de l'éclairage par exemple, on n'avait pas à sa disposition des lampes à faible voltage, c'est-à-dire n'exigeant à leurs bornes qu'une différence de potentiel peu élevée et au contraire un courant relativement intense. La lampe choisie comme exemple dans le calcul précédent, remplit ces conditions.

Il ne faut pas confondre la tension de la lampe avec celle du circuit qui est la somme des tensions aux bornes de toutes les lampes; de même l'intensité du courant total se réduisant à celui d'une lampe est toujours relativement

faible; aussi l'on arrive à ce résultat, qui paraît paradoxal au premier abord, que les lampes doivent être à faible tension et à grande intensité relative, alors que le circuit de distribution comporte, au contraire, beaucoup de volts et peu d'ampères.

La distribution en série est donc en définitive une distribution à haute tension et à faible intensité; elle présente par suite les avantages et les inconvénients des hauts potentiels.

Les inconvénients résident dans les dangers inhérents à l'emploi de l'électricité à haute tension et les soins tout particuliers qu'il faut prendre pour isoler les conducteurs de transport.

L'avantage provient de l'économie réalisée dans la canalisation qui, pour la même énergie distribuée, ne doit livrer passage qu'à un courant de faible intensité; la section des conducteurs est donc notablement réduite, tandis que leur développement est encore diminué, du fait de la disposition en circuit unique. Il résulte donc de ces circonstances une double économie, sur la section et la longueur des conducteurs.

Il y a lieu de remarquer, d'autre part, que les dangers de la haute tension ne se font sentir en réalité qu'aux bornes de l'usine, puisque, entre deux points voisins, il n'existe que la différence de tension correspondant aux chutes de potentiel des lampes intercalées entre ces deux points. Cette différence de potentiel est généralement faible et, pour qu'elle acquière une valeur notable, il est nécessaire que les fils d'aller et de retour soient placés dans le voisinage l'un de l'autre, ce qui n'arrive pas d'ordinaire; dans ce cas toutefois, elle peut prendre, suivant les points considérés, toutes les valeurs comprises entre la chute de tension d'une lampe et la différence totale de tension aux bornes de la station.

Il faut aussi prévoir le cas où le circuit présenterait un défaut d'isolement ou, comme on dit, *une terre* mettant au potentiel zéro le point défectueux du conducteur; la différence de tension à laquelle on sera alors exposé, en

touchant un autre point du conducteur, sera égale à la hauteur de potentiel de ce dernier point au-dessus du sol, et cette tension sera d'autant plus grande que les points considérés seront respectivement plus rapprochés chacun des deux pôles. Il y a donc toujours danger éventuel à se mettre en contact avec le conducteur à haute tension, même en un point unique du circuit.

Au point de vue de la disposition des lampes, la distribution en série a l'inconvénient de rendre tous les appareils solidaires; il faut nécessairement éteindre et allumer toutes les lampes en même temps, puisqu'il n'y a qu'un seul circuit commun à tous les appareils. De même, s'il se produit une extinction accidentelle, par suite de la rupture du filament de l'une des lampes, toutes les autres lampes s'éteignent en même temps.

On peut toutefois remédier à cet inconvénient à l'aide d'un dispositif établissant automatiquement la connexion des deux bornes de la lampe, en cas de rupture du filament; nous en donnerons des exemples lors de la description des lampes à incandescence. Quoi qu'il en soit, une interruption dans une section du conducteur reliant deux lampes quelconques, entraîne l'extinction de tous les appareils.

MODES DE RÉGLAGE DE L'INTENSITÉ. — La suppression d'une ou plusieurs lampes, soit par suite d'usure et de rupture accidentelle, soit par suite de mise en court circuit volontaire, diminue nécessairement la résistance du circuit général et détermine un accroissement de l'intensité du courant. Or, cette intensité doit être maintenue constante quel que soit le nombre des appareils en service, ainsi qu'il a été dit plus haut.

Il conviendrait donc de remplacer chaque lampe, supprimée pour une cause quelconque, par une résistance équivalente, mais cette solution a le grave inconvénient d'absorber de l'énergie en pure perte dans ces résistances auxiliaires. Il est bien plus logique de proportionner l'énergie engendrée par la dynamo à la consommation des lampes réellement en service.

Puisque l'intensité doit être constante, il faudra faire varier la force électro-motrice de la machine, proportionnellement à la résistance du circuit. On arrive à ce résultat de différentes façons. Si la dynamo génératrice est excitée en série, on peut introduire dans le circuit inducteur des résistances en vue de réduire l'excitation, mais ces résistances étant ainsi traversées par le courant total donneront encore lieu à une perte notable d'énergie.

Il est préférable d'employer le système mis en œuvre dans la machine Brush, qui consiste à introduire des résistances variables dans un circuit auxiliaire, placé en dérivation sur les inducteurs de la dynamo (tome I, § 130). Cette dérivation joue le rôle d'un robinet d'érogation plus ou moins ouvert, suivant la valeur des résistances introduites et qui détourne des inducteurs un courant d'intensité variable, de manière à modifier l'excitation suivant les besoins.

Dans le cas d'excitation indépendante, on introduira les résistances de réglage dans le circuit inducteur qui est entièrement distinct du circuit d'utilisation, il n'y aura donc pas à subir de ce fait la perte d'énergie due à la chute du courant principal dans les résistances auxiliaires.

Si la machine est excitée en dérivation, la régulation du potentiel en vue de maintenir l'intensité constante, se fera comme à l'ordinaire par un rhéostat de résistances variables, placées dans le circuit des inducteurs en dérivation.

On peut encore obtenir le même résultat, sans le secours de résistances auxiliaires, en faisant varier le calage des balais sur le collecteur des dynamos à courant continu. On sait, en effet, que la différence de potentiel maximum est recueillie aux extrémités du diamètre perpendiculaire à l'axe polaire inducteur; la différence de potentiel est nulle sur le diamètre axial; enfin, les diamètres de calage intermédiaires donnent toute la gamme des potentiels compris entre 0 et le maximum.

D'autre part, on a vu, dans l'étude de la machine Thomson-Houston (tome I, § 130), les procédés particuliers

employés pour obtenir la différence de potentiel requise à l'effet de maintenir l'intensité constante.

La disposition des lampes en série n'a guère d'application pratique que pour l'éclairage public, dans les petites villes. Dans ce cas, en effet, les lampes s'éteignent et s'allument en même temps, en totalité ou du moins par groupes importants, on n'a donc pas à se préoccuper de la variation continuelle de la résistance du circuit. Dans les grandes villes, les extinctions accidentelles s'étendant à un circuit général auraient des conséquences beaucoup plus graves et ce système ne conviendrait pas.

Dans ce qui précède, nous n'avons pas tenu compte de la résistance du circuit extérieur : celle-ci donne lieu comme les lampes à une chute de potentiel, et la dynamo doit y pourvoir. Il faut donc élever d'autant la différence de potentiel aux bornes de la dynamo : celle-ci sera par suite donnée par l'expression :

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

dans laquelle n est le nombre des lampes, e la chute de tension dans celles-ci et $R \times I$ la tension absorbée par la résistance du conducteur, d'après la loi d'Ohm.

Il y a lieu de faire une remarque intéressante sur la distribution en série, c'est que la perte de tension $R \times I$ sur le conducteur de jonction n'influence en rien le fonctionnement des lampes, l'intensité étant maintenue constante, bien entendu. Ceci se traduit par ce fait très important, que chaque lampe prend la différence de potentiel qui lui convient, quel que soit son éloignement de la source et, par suite, que toutes les lampes fonctionnent à leur régime normal. Nous verrons qu'il n'en est pas tout à fait de même pour la distribution en dérivation, dans laquelle cependant on maintient la différence de potentiel constante, à l'origine de la distribution.

190. Distribution en dérivation. — Des bornes a et b de la dynamo (fig. 277) partent deux conducteurs qui, contrairement à la disposition précédente, ne se soudent pas aux extrémités A et B, mais laissent le circuit ouvert ;

celui-ci n'est fermé que par l'intermédiaire des lampes.

Les récepteurs sont disposés en dérivation sur ces conducteurs, c'est-à-dire que leurs bornes m et n sont toujours connectées l'une sur le fil d'aller, l'autre sur le fil de retour.

Pour bien saisir le fonctionnement électrique de ce système, supposons que les conducteurs principaux soient supprimés momentanément et que chaque lampe soit directement reliée aux bornes a et b de la dynamo par des

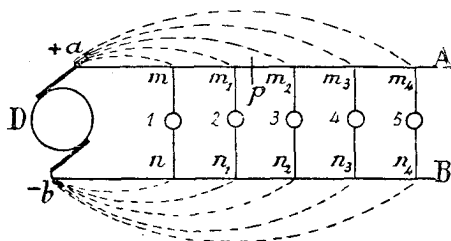


FIG. 277. — Distribution en dérivation.

conducteurs séparés tels que ma et nb représentés en traits pointillés. Il est alors évident que chaque lampe est soumise à la différence de potentiel totale des pôles de la dynamo ; que toutes les lampes, par conséquent, sont au même potentiel.

Dans cette disposition théorique, chaque lampe se trouve desservie par un circuit distinct, le courant qui passe dans la lampe 1, par exemple, se ferme sur les pôles de la dynamo sans passer par aucune autre lampe ; si, pour fixer les idées, chaque lampe exige 1 ampère, le courant total débité par la dynamo devra comprendre autant d'ampères que de lampes.

La distribution en dérivation est donc une distribution à potentiel constant et à intensité variable.

Si nous supposons maintenant que tous les fils distincts am , bn , sont rassemblés en faisceau et soudés ensemble, de manière à constituer respectivement les deux conduc-

teurs a A, b B, il est évident que rien ne sera changé aux conditions électriques précitées et que les mêmes conclusions resteront applicables à la disposition comportant les deux tronçons conducteurs communs.

Le grand avantage de cette distribution est d'assurer la complète indépendance des lampes. L'une quelconque, la lampe n° 3 entre autres, venant à se briser, le circuit des autres lampes ne sera nullement interrompu et leur fonctionnement ne sera pas modifié, si l'on a soin de maintenir une différence de potentiel constante aux bornes de la station génératrice.

Supposons même que le conducteur principal a A soit détérioré en p , de telle sorte que le courant venant de la dynamo ne puisse pas passer au delà; toutes les lampes situées à droite du point défectueux s'éteindront évidemment, mais toutes celles en deçà continueront à marcher comme précédemment.

À l'inverse de la distribution en série, celle-ci est *une distribution à faible tension et à grande intensité*; la tension est en effet constante, quel que soit le nombre des lampes, tandis que l'intensité est directement proportionnelle à ce nombre. La tension est d'ailleurs limitée à celle que peut supporter individuellement un seul récepteur, et, pour des lampes à incandescence, cette tension varie pratiquement de 50 à 220 volts au maximum.

Cette distribution exige par conséquent des câbles de grande section et des circuits multiples d'un développement considérable: ainsi la sécurité dans le fonctionnement s'achète ici, comme toujours, au prix de plus grands sacrifices sur les frais de premier établissement des canalisations électriques.

Dans tout ce qui précède, nous avons admis implicitement que les fils des circuits particuliers ou les conducteurs étaient dépourvus de résistance et ne donnaient lieu à aucune chute de potentiel. Il n'en est pas ainsi dans la pratique et, par suite de cette circonstance, le voltage décroît à mesure qu'on s'éloigne de la source.

À ce point de vue, il y a lieu de considérer deux sec-

tions bien distinctes dans les conducteurs, l'une constituée par le premier double tronçon am , bn compris entre la dynamo et la première dérivation, l'autre le tronçon sur lequel sont distribués les récepteurs. La première section est parcourue sur toute sa longueur et dans ses deux branches d'aller et de retour, par le courant total, tandis que le courant va en diminuant tout le long des conducteurs de la seconde section de m en A et en augmentant de B en n .

Il résulte de ce fait que toutes les lampes subissent d'abord la chute de tension inhérente à la première section, plus celles relatives au double tronçon compris entre la lampe considérée et la première lampe. Ainsi la dernière lampe n° 5 aura une tension réduite de la chute du tronçon principal am , nb et de la somme des chutes dans les tronçons partiels doubles mm_1 , m_1m_2 , m_2m_3 et m_3m_4 .

CALCUL DES CHUTES DE TENSION. — Il est facile de calculer ces chutes de tension successives, en tenant compte de la résistance des branches aller et retour de chaque tronçon et de l'intensité du courant qui le traverse.

Supposons, pour simplifier l'exposition, que les intensités des courants dans toutes les lampes sont égales et que celles-ci sont placées à des intervalles égaux, soit R la résistance du double tronçon principal am , soit r celle de chacun des doubles tronçons partiels, i le courant dans chaque lampe et $I = 5i$ le courant total.

La chute de tension totale, de la dynamo à l'extrémité des conducteurs, c'est-à-dire à la dernière lampe, sera d'après la loi d'Ohm :

$$e = R \times 5i + r \times 4i + r \times 3i + r \times 2i + r \times i$$

Ce qui peut s'écrire :

$$e = R \times 5i + r \times 10i$$

ou encore :

$$e = (5R + 10r) \times i = 5(R + 2r) \times i$$

Soit $R = 1$ ohm, $r = 0,1$ ohm et $i = 0,5$ ampère; la chute totale de tension entre la dynamo et la dernière lampe sera :

$$e = 5(1 + 0,2) \times 0,5 = 3 \text{ volts}$$

mais elle sera seulement de :

$$e_1 = 10 \times r \times i = 0,5 \text{ volts}$$

entre la première et la dernière lampe. Toutes les lampes seront donc soumises à la même tension, à $1/2$ volt près.

Cette installation serait acceptable, car on admet que la tension applicable aux lampes incandescentes peut varier de 1,5 à 2 pour 100 en dessus ou en dessous du voltage normal pour lequel ces lampes ont été construites.

On remarquera encore que la chute de tension sur le premier tronçon n'a aucune influence sur le fonctionnement des lampes; en effet, cette chute étant ici de $2^v,5$, il suffira de porter à $112^v,5$ la tension au départ de la station pour que la première lampe dispose de la tension normale de 110 volts qui lui convient; mais on ne pourra pas faire que la dernière lampe n'ait pas 0,5 volts de moins et que sa tension ne soit réduite à $109,5$ volts.

Les lampes intermédiaires seront donc elles aussi soumises à des tensions allant progressivement en diminuant de 110 à $109,5$ volts.

La chute de tension dans le tronçon principal ne nuit pas au fonctionnement des lampes comme nous l'avons vu, dans le cas du moins où le nombre des lampes est invariable. Cette chute toutefois correspond à une perte d'énergie qu'il est intéressant de réduire le plus possible.

On remarquera que l'absorption de tension dont il s'agit est importante, surtout à cause de la grande intensité du courant qui traverse le tronçon correspondant. On peut donc présumer que l'on obtiendrait un résultat plus avantageux, si l'on disposait les lampes sur plusieurs conducteurs principaux, prenant directement le courant aux bornes de la station, ainsi qu'il est indiqué dans la figure 278.

Où arrive ainsi, pour une même chute de tension, à réduire considérablement la section des conducteurs et à réaliser une économie très notable sur le poids du cuivre.

CHUTE DE TENSION SUR LE TRONÇON PRINCIPAL. — Si la chute de tension qui se produit dans le tronçon principal n'influence pas le fonctionnement des lampes, lorsque leur

nombre est constant, comme nous l'avons dit plus haut, il n'en est pas de même lorsque ce nombre varie, ainsi que cela se produit constamment en pratique.

Supposons par exemple que la lampe n° 1 (fig. 277) soit à la tension normale de 110 volts, lorsque les cinq lampes

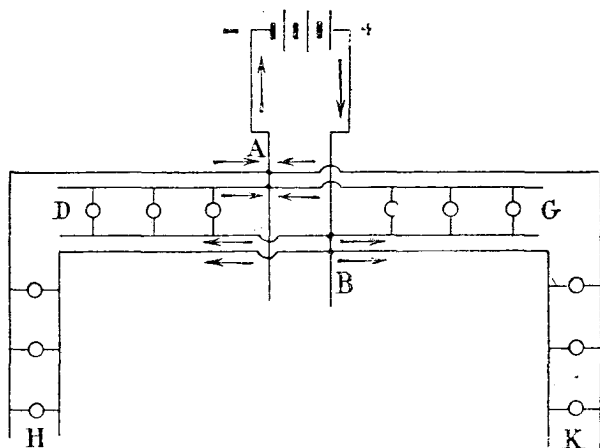


FIG. 278. — Dérivations multiples.

de 0,5 ampère étant allumées, le courant total du tronçon principal est de 2,5 ampères. La chute de tension dans ce dit tronçon de la résistance d'1 ohm est alors :

$$e = 2,5 \times 1 = 2,5 \text{ volts.}$$

Si maintenant 2 lampes seulement restent allumées, le courant total est réduit à 1 ampère et la chute de tension est seulement :

$$e_1 = 1 \times 1 = 1 \text{ volt.}$$

Tout à l'heure, la tension, aux bornes de la station était à 112,5 volts et se réduisait à 110 volts aux bornes de la première lampe, elle ne se réduit plus qu'à 111,5 et la même lampe est soumise à un voltage supérieur de 1,5.

Ainsi la variation du nombre des lampes fera constamment osciller le voltage de la première lampe et, par suite,

celui de toutes les autres lampes qui resteront en circuit, du fait de la chute variable de tension afférente au premier tronçon. Cette variation sera d'autant plus grande que ce tronçon principal sera plus chargé et desservira par suite un plus grand nombre de lampes. C'est encore une considération qui doit engager à diviser le courant entre plusieurs conducteurs principaux, afin que la variation sur chacun d'eux soit moins forte que sur un tronçon unique.

CONDUITE CONIQUE. — Nous avons admis implicitement dans ce qui précède que les conducteurs forment une conduite cylindrique, c'est-à-dire ayant la même section en tous les points de sa longueur. On peut imaginer qu'il serait préférable de donner une grande section au premier tronçon qui est parcouru par le courant total et des sections décroissantes aux tronçons consécutifs; en un mot de proportionner la section du conducteur à l'intensité du courant qui le traverse, en chaque point.

On arrive ainsi à la disposition des conduites coniques fig. 279, qui suppose d'ailleurs que les dérivation sont très rapprochées et à égale distance les unes des autres.

Cette répartition du cuivre ne donne en réalité aucun avantage

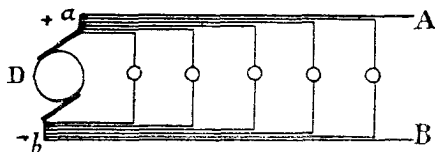


FIG. 279. — Conduites coniques.

sur la conduite cylindrique, au point de vue de la perte de tension aux extrémités A, B. On démontre par le calcul que cette perte est la même, pour le même volume de cuivre employé en conducteurs coniques ou cylindriques. Cela se comprend d'ailleurs, car si l'on réduit la chute sur les premiers tronçons, dans le voisinage de la base du cône, on l'augmente évidemment dans les derniers tronçons amincis, du côté de la pointe.

La seule différence consiste en ce que la tension présente une chute plus brusque dans le cas de la conduite cylindrique que dans celui de la conduite conique, ce qui se

traduit dans le premier cas, par une plus grande différence de voltage entre les lampes les plus voisines de la source et, par contre, une différence moins sensible entre les lampes de l'extrémité de la conduite.

CONDUITE EN BOUCLE. — Cette disposition a pour but d'égaliser les longueurs de circuit des diverses lampes, de manière à réduire les différences entre les tensions appliquées à chacune d'elles.

A cet effet, l'un des conducteurs partant du pôle b de la dynamo, par exemple (fig. 280), s'étend jusqu'à l'extré-

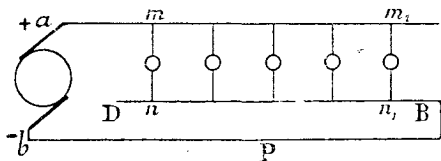


FIG. 280. — Conduite en boucle.

mité de l'installation et revient sur lui-même par une seconde branche $B D$, sur laquelle sont connectées les bornes correspondantes des lampes.

Il est facile de voir que dans ces conditions, le parcours du circuit de chaque lampe est le même pour tous les récepteurs : ainsi le circuit de la première lampe $am n n_1 P b$ est égal au circuit de la dernière lampe $am m_1 n_1 P b$. Il n'en résulte pas toutefois que les pertes de tension correspondant aux différentes lampes soient égales, sauf pour les lampes $m n$ et $m_1 n_1$ qui sont semblablement placées par rapport à la dynamo. En faisant les calculs des pertes pour chaque lampe, comme il a été indiqué plus haut, on reconnaît que la chute de tension est maximum pour la lampe du milieu et qu'elle va en diminuant à partir de cette lampe, vers les deux extrémités, à droite et à gauche.

Pour que toutes les lampes soient soumises à la même tension, il faudrait que les conducteurs soient établis suivant le mode conique, la section étant proportionnelle en chaque point à l'intensité du courant. Tout se passerait

alors comme si chaque lampe était reliée directement à la source par un circuit particulier, de longueur égale pour toutes les lampes, avec la même densité de courant, donnant lieu par suite à la même chute de potentiel.

Toutefois, si l'on fait varier le nombre des lampes, les conditions de densité changent, un plus faible courant peut passer dans les sections de gros diamètre et inversement, d'où résulte une différence de pertes et de tensions aux lampes. Ce fait ne se produirait pas si les récepteurs étaient reliés effectivement par circuits distincts aux bornes de la dynamo.

La disposition par boucle, même en circuit cylindrique, a pour effet de réduire de moitié, par rapport au système ordinaire, la différence maximum de tension entre deux lampes de la distribution. D'autre part, elle donne un développement de la canalisation supérieur de 50 pour 100, puisqu'il y a en réalité trois longueurs de conducteurs au lieu de deux.

Toutefois, dans le cas d'une distribution circulaire, comme lorsqu'il s'agit de l'éclairage d'une grande salle ou d'un îlot de maisons groupées sur le périmètre

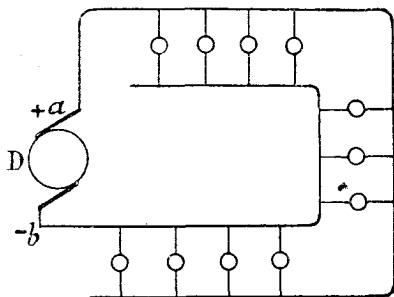


FIG. 281. — Conduite circulaire.

d'une cour intérieure, la disposition en boucle peut ne pas occasionner un développement de conducteurs plus considérable que dans le système ordinaire, ainsi que le montre la figure 281.

191. Distributions mixtes. — Ce système est une combinaison des deux précédents : il permet de réaliser, dans la mesure qu'on juge nécessaire, l'économie du premier et la sécurité du second (fig. 282).

L'extinction d'une lampe ou la rupture d'un fil de déri-

vation amène l'arrêt de toutes les lampes de la même série; cette considération montre qu'il convient de ne pas

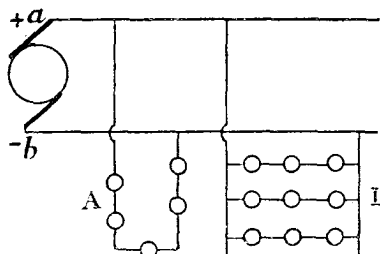


FIG. 282. — Distribution mixte.

établir des séries comportant un grand nombre de lampes.

Cette disposition est surtout usitée pour les lampes à arc que l'on place généralement par groupe de deux ou un plus grand nombre en tension. Par

exemple, on pourra sur un circuit à 250 volts, disposer des dérivations de cinq lampes à arc ou *régulateurs* en tension A, ces lampes devant absorber, en moyenne, 45 à 50 volts individuellement, pour un fonctionnement normal.

En même temps on pourra établir sur le même réseau des dérivations composées de séries de trois lampes à incandescence I marchant à la tension de 100 volts. On réalise ainsi un montage mixte à un autre point de vue, soit un montage mixte de régulateurs et de lampes à incandescence.

192. Distribution par feeders. — Le système consiste à établir deux réseaux distincts, l'un de *câbles distributeurs* reliés aux récepteurs a, l'autre de *feeders* ou *artères* qui partent des bornes de la station génératrice G et sont destinés à transporter directement l'énergie électrique aux différents *centres de distribution* ou boîtes de jonction J (fig. 283). Par suite, aucune dérivation n'est prise sur le système de feeders A et B; les distributeurs où se branchent les dérivations des lampes vont puiser le courant aux boîtes J, où aboutissent les feeders.

Pour comprendre l'économie de ce système, il faut se reporter à ce que nous avons dit plus haut, touchant la première section des conducteurs d'un circuit électrique. Les feeders jouent le même rôle, puisqu'ils sont traversés

sur toute leur longueur, sans dérivation latérale, par le courant entier de distribution.

Nous avons remarqué que la chute de tension sur ces premières sections pouvait être très grande, sans que le fonctionnement des lampes placées à la suite en soit compromis. Il en sera de même pour les feeders, sur lesquels on pourra consentir toute la perte de tension que comporte l'éloignement des boîtes de jonction, par rapport à la station génératrice.

Tout se passera comme si les distributeurs, reliés

aux appareils récepteurs, étaient alimentés directement par autant de stations génératrices qu'il y a de boîtes de distribution. Il suffira donc de maintenir aux bornes de ces boîtes une différence de potentiel constante, quelle que soit la perte subie dans les feeders, entre ces boîtes et l'usine génératrice.

Connaissant la résistance de chaque couple de feeders, on en déduit aisément la perte de tension aux extrémités, c'est-à-dire aux boîtes, pour chaque valeur du courant transmis ; la tension aux boîtes sera donc égale à chaque instant à la tension des dynamos à l'usine, diminuée de la chute de potentiel calculée.

Supposons qu'il faille maintenir par exemple, aux boîtes de distribution, une différence de potentiel de 112 volts, et qu'au même instant la tension de la dynamo soit de 120 volts, avec une chute de potentiel sur le couple de feeders de 12 volts ; il n'y aurait plus aux bornes de la boîte correspondante que $120 - 12 = 108$ volts, et il man-

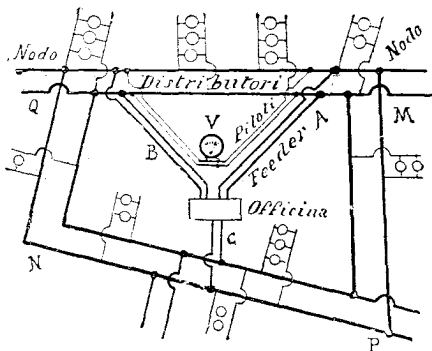


FIG. 283. — Distribution par feeders.

querait 4 volts. Pour relever en ce point la différence de potentiel à 112 volts, on portera à l'usine, la tension de la dynamo à 124 volts.

L'électricien a d'ailleurs constamment sous les yeux l'état de la tension, aux différentes boîtes de distribution, par l'indication de voltmètres *V* reliés par des *fils pilotes p* ou fils de retour, à chacune de ces boîtes. Le courant excitateur de ces voltmètres étant très faible, vu la grande résistance des bobines qui les actionnent, il ne se produit dans les fils pilotes de petit diamètre qu'une chute de tension négligeable et l'on peut considérer le voltage donné par l'instrument, comme étant réellement en pratique, celui aux bornes des boîtes de distribution.

Le calcul indiqué ci-dessus, touchant la chute de potentiel proportionnelle au courant traversant chaque feeder, permet d'éviter l'emploi des fils pilotes. On peut même se dispenser de faire ce calcul, en plaçant dans le circuit du feeder de résistance r , un ampèremètre gradué de manière à indiquer directement la chute de tension $r \times i$; on relève en proportion et d'après les indications du voltmètre connecté aux bornes de la dynamo, la tension de la machine alimentant le feeder considéré.

On peut encore combiner les deux appareils ampèremètre et voltmètre en un seul galvanomètre composé, comprenant deux bobines agissant sur l'aimant mobile, en sens inverse. L'une de ces bobines à fil fin est reliée aux bornes du générateur et donne sa tension effective, lorsque la seconde bobine à gros fil, qui est intercalée dans le circuit du feeder, n'est traversée par aucun courant. Quand le feeder est en charge, la dernière bobine agit sur l'aiguille mobile, en réduisant la dérivation en proportion de l'intensité du courant; on fait croître alors la tension du générateur jusqu'à ce que l'aiguille soit revenue à sa position initiale. Pour qu'il en soit ainsi, il faut que la tension de la dynamo ait augmenté d'une valeur égale à la chute de tension produite dans le feeder, l'action antagoniste de la bobine à gros fil étant proportionnelle à cette absorption de potentiel.

RÉGLAGE DU POTENTIEL. — Le problème du maintien d'un potentiel constant aux bornes des boîtes est moins simple qu'il ne paraît au premier abord. Il faut considérer en effet, que ces diverses boîtes peuvent être à des distances très inégales de la station génératrice : il en résulte que les différents feeders donnent lieu, pour une même émission de courant, par exemple, à des chutes de tension pouvant différer sensiblement entre elles.

Si tous les feeders étaient alimentés par les mêmes générateurs associés en dérivation sur les bornes du tableau de l'usine, la surélévation de tension donnée à ces générateurs, pour le réglage, ne conviendrait pas à tous les couples de feeders, étant trop forte pour les uns et trop faible pour les autres.

Ces considérations conduiraient donc à former plusieurs groupes ne comprenant chacun que les feeders présentant la même chute de tension et à alimenter séparément ces divers faisceaux de conducteurs par des générateurs distincts.

Pour éviter cette sorte de morcellement de l'usine génératrice, on pourra chercher à uniformiser la chute de tension dans les divers feeders, en intercalant dans les plus courts ou plutôt dans les moins résistants, des résistances artificielles disposées à la station ; tous les feeders pourront alors être alimentés par l'ensemble des dynamos génératrices. L'inconvénient de cette disposition est de donner lieu à une perte d'énergie électrique continue, à travers les résistances additionnelles.

Ces procédés obligent donc à faire varier la tension des générateurs suivant la chute de potentiel dans les feeders. On peut encore éviter cette sujétion en utilisant un grand nombre de feeders de même résistance que l'on met successivement en charge au fur et à mesure des besoins, de telle sorte que chacun des feeders marchant à plein débit, donne toujours lieu à la chute maximum et, par suite, à une perte constante. Avec ce système, les dynamos doivent marcher à la tension maximum toute la journée, tandis qu'autrement cette tension ne se produirait qu'au moment

de la charge maximum de l'exploitation, cette circonstance a pour effet de diminuer le rendement économique.

Bien que le procédé des feeders ait pour principe de créer des centres où viennent s'alimenter les distributeurs desservant le périmètre correspondant, il convient de relier ensemble les distributeurs des différentes sections, afin que, en cas d'interruption des communications avec les feeders sur un point, la section intéressée puisse être secourue et alimentée d'un autre côté.

La perte de tension sur les feeders pourra aller pratiquement jusqu'à 10 pour 100 de la tension initiale. A partir des boîtes de distribution, on n'admettra plus qu'une absorption de voltage de 2 pour 100 sur les distributeurs et de 1 pour 100 dans les installations intérieures. Les diverses lampes d'une même section seront donc soumises à des tensions qui ne pourront différer entre elles de plus de 3 pour 100 au maximum.

On voit dès lors quelle est l'économie du système en question. Etant donné qu'il faut consentir nécessairement une chute de tension notable pour transporter l'énergie électrique en des points éloignés de la station génératrice, on localise la plus grande partie de cette perte, soit les 70 ou 80 pour 100, sur les feeders et par conséquent en dehors du circuit occupé par les récepteurs : le surplus de la perte ne comprenant plus que quelques centièmes est réparti sur ce dernier circuit, et comme celui-ci forme une agglomération de peu d'étendue autour de son centre de distribution, il ne peut donner lieu qu'à une faible perte de tension, comme il convient au bon fonctionnement des lampes.

POINTS DE RACCORDEMENT DES FEEDERS AU RÉSEAU DE DISTRIBUTION. — Ces points de raccordement doivent être choisis judicieusement, de telle sorte que les variations de tension entre deux boîtes de distribution ne dépassent pas les limites convenues, au point où se produit la chute de potentiel maximum.

Ce point est évidemment celui qui sert pour ainsi dire de

section de partage des courants affluents à gauche et à droite des deux extrémités du distributeur; il est donc déterminé par une certaine dérivation aux récepteurs qui reçoit le courant des deux côtés à la fois.

Pour fixer les idées, considérons un distributeur compris entre deux boîtes A et B (fig. 284); nous supposons pour

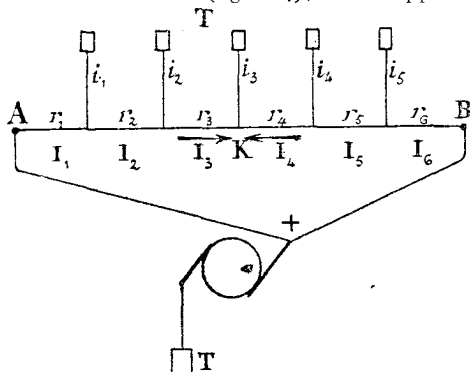


FIG. 284. — Détermination du point de partage des courants.

simplifier que ce distributeur est à un seul fil, ce qui reviendrait à admettre implicitement que le retour du courant se fait par la terre. Cette hypothèse est parfaitement licite pourvu qu'on ait soin de doubler la résistance de chaque tronçon du conducteur unique, afin de tenir compte du conducteur supprimé.

On connaît les courants de i_1 à i_5 qui traversent les cinq dérivation des récepteurs que nous supposons échelonnés sur le distributeur, ainsi que les résistances doublées de r_1 à r_6 des six tronçons déterminés par les points de dérivation.

La répartition des courants dans les divers groupes de récepteurs permet de présumer approximativement la position du point de partage, sauf à vérifier ultérieurement l'hypothèse faite à ce sujet. Supposons que le point K ainsi indiqué corresponde à la dérivation i_3 ; les courants sur le distributeur seront alors dirigés, suivant les flèches du dessin.

De l'hypothèse faite sur le point de partage des courants,

nous pourrons, par l'application des lois de Kirchhoff, poser les relations suivantes, en désignant de I_1 à I_6 les courants traversant les divers tronçons du distributeur :

$$I_1 - I_2 = i_1; I_2 - I_3 = i_2; I_3 + I_4 = i_3$$

$$I_5 - I_4 = i_4; I_6 - I_5 = i_5$$

D'autre part, il est évident que la chute de tension produite par le courant allant de A en K est la même que celle provenant du courant de B au même point K, puisque nous avons admis que les points A et B étaient maintenus au même potentiel par les feeders, on pourra donc égaliser ces deux chutes et écrire :

$$I_1 \times r_1 + I_2 \times r_2 + I_3 \times r_3 = I_4 \times r_4 + I_5 \times r_5 + I_6 \times r_6$$

Ces relations permettent d'exprimer les quantités inconnues I en fonction des quantités connues i et r et notamment de calculer les valeurs de I_3 et de I_4 . Supposons en effet qu'on ait :

$$I_3 + I_4 = 8$$

On peut satisfaire à cette égalité de plusieurs manières : soit par exemple avec :

$$I_3 = 5 \text{ et } I_4 = 3$$

ce qui donne :

$$I_3 + I_4 = 5 + 3 = 8$$

soit avec $I_3 = 10$ et $I_4 = -2$, d'où l'égalité :

$$I_3 + I_4 = 10 + (-2) = 8$$

Si le calcul des relations précédentes donne pour résultat les premières valeurs supposées de I_3 et I_4 , c'est-à-dire deux valeurs positives, le point K sera bien celui qui correspond au partage des courants, puisque la relation posée *a priori* admettait le même signe pour I_3 et I_4 . Au contraire, si l'on trouvait un résultat analogue au second, avec des valeurs de signe contraire pour I_3 et I_4 , c'est que l'hypothèse admise était inexacte et que le point de partage est plus éloigné sur la droite.

Le courant I_4 se dirigerait alors vers la dérivation i_4 et si celle-ci est supérieure à I_4 , égale à 5 par exemple, c'est évidemment que la dérivation i_4 est alimentée à la fois par le courant $I_4 = 2$ et $I_5 = 3$, donc que i_4 correspond au point de partage. Si, au contraire, i_4 était inférieur à I_4 , une partie de ce dernier courant continuerait vers i_5 et l'on devrait chercher

plus loin et dans la même direction le point de partage réel.

Ce point étant déterminé, on calculera la somme des pertes de charge depuis l'une des extrémités du distributeur jusqu'au dit point de partage, et l'on vérifiera si cette somme est supérieure à la variation de tension tolérée. S'il en était ainsi, il faudrait rapprocher les points de jonction des feeders, et multiplier le nombre des artères, s'il était nécessaire, afin de maintenir la variation de tension entre les divers récepteurs dans la limite exigée par le bon fonctionnement des appareils.

CAS DE DISTRIBUTEURS MULTIPLES. — Le calcul précédent s'applique au cas d'un distributeur simple compris entre deux boîtes de jonction des feeders; la question se complique lorsqu'il existe entre les deux points de jonction des distributeurs multiples formant un réseau fermé plus ou moins étendu. La méthode générale exposée ci-dessus est encore applicable, mais elle donnerait lieu à des calculs très laborieux et il existe des méthodes plus expéditives parmi lesquelles la plus simple est celle de M. Cruciani, que nous

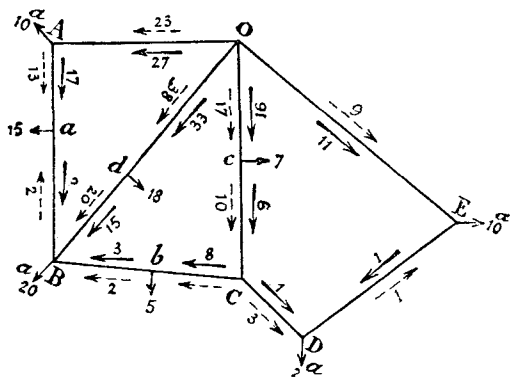


FIG. 285. — Détermination des points de jonction dans le cas général.

exposerons en empruntant au *Traité d'électricité* d'Eric Gérard l'exemple numérique et le schéma que comporte sa démonstration.

Soit o l'un des points de jonction des feeders (fig. 285), par lequel arrivent les courants; ceux-ci se distribuent dans le

réseau, de manière à alimenter les dérivations indiquées par des flèches normales aux conducteurs, suivant l'intensité requise par chacune de ces dérivations. On peut donc à ce point de vue assigner aux courants une première répartition qui sera ensuite vérifiée et rectifiée par la méthode dont il s'agit.

Tous les courants étant supposés émaner du point *o*, il est logique d'envisager les points B et D qui se présentent comme les points extrêmes du réseau et d'imaginer, *a priori*, que les courants se dirigent vers ces deux points directement par les divers trajets *y* aboutissant; nous traçons aussi les flèches parallèles aux distributeurs.

Considérons par exemple le trajet OAB qui conduit du point O au point B; le courant qui traverse le conducteur OA, doit alimenter vraisemblablement les dérivations en A et *a* et contribuer, dans une certaine mesure, à l'alimentation de la dérivation B; ce courant sera donc au moins égal à 25 ampères, nous admettrons 27 en comptant 2 ampères pour cette dernière dérivation.

Par le chemin OCB on peut admettre qu'il arrive à la dérivation B un courant à peu près égal, soit 3 ampères par exemple; il reste donc à fournir à cette dérivation par le troisième chemin OB, un courant :

$$I = 20 - (2 + 3) = 15^a$$

et comme la dérivation *d* prend 18 ampères, le tronçon *o d* devra être parcouru par un courant ;

$$I_1 = 18 + 15 = 33^a$$

et ainsi de suite.

Telles sont les considérations qui permettent d'établir une première répartition logique, sinon exacte des courants.

En s'imposant par exemple une densité de courant de 1 ampère par mm², on en déduira immédiatement les diamètres des conducteurs dans les diverses sections. On calculera maintenant dans chaque tronçon les pertes de tension résultant de cette répartition supposée des courants. Supposons que le calcul ait donné pour la maille OCDE en particulier, les pertes de tensions suivantes sur les deux tronçons :

OC . . .	9,70 volts	} O C D . . .	10,17
CD . . .	0,47 —		
OE . . .	14,60 —		
ED . . .	1,00 —		
		O E D . . .	15,60
		Moyenne . . .	<u>12,50</u>

Comme il faut nécessairement arriver à la même tension en D, quel que soit le chemin suivi à partir de o, on devra admettre que la perte de tension est en réalité de 12,50, valeur moyenne sur chacune des branches considérées. Il en résulte que le tronçon O E subit en réalité une chute de tension qui doit être diminuée de $14,6 - 12,5 = 2,1$ volts. Comme d'autre part la chute calculée était due à un courant de 11 ampères, le courant correspondant à la chute de 2,1 volts sera :

$$i = \frac{11}{14,6} \times 2,1 = 2 \text{ ampères environ.}$$

Il doit donc passer 2 ampères de moins dans le tronçon O E, soit 9 ampères au lieu de 11. D'un autre côté, la dérivation E exigeant 10 ampères, recevra les 9 ampères de O E et 1 ampère de D E; le point E sera donc un point de partage et les courants devront suivre en réalité le parcours des flèches pointillées.

Comme la dérivation D absorbe 2 ampères, la section C D devra débiter $(2 + 1) = 3$ ampères. Les calculs effectués dans l'hypothèse faite sur la première répartition des courants, ayant donné une perte de tension par ampère de 0,47 volts sur C D, la perte réelle sera maintenant :

$$e = 0,47 \times 3 = 1,41$$

La perte de tension suivant O E devant être égale à la moyenne de 12,50 et le point E étant reconnu comme point de partage, la chute suivant le chemin O C D E est aussi de 12,5,5.

La perte de tension sur le tronçon O C sera donc :

$$e_1 = 12,5 - (1 + 1,41) = 10,09$$

au lieu de 9,7 résultant de la première distribution; il faut donc perdre un supplément de volts égal à $(10,09 - 9,7)$ et comme on a trouvé dans les calculs préliminaires que la perte de tension par ampère, sur le tronçon O C, est de 0,75 volts, on en déduira que le nombre d'ampères supplémentaires passant par O C doit être de :

$$i_1 = \frac{10,09 - 9,7}{0,75} = 1 \text{ ampère.}$$

Il passera donc $(16 + 1) = 17$ ampères par O C, et puisque $(7 + 3) = 10$ ampères sont dérivés dans e et dans C D, il restera

7 ampères se dirigeant sur Cb et 2 ampères contribueront à la dérivation B .

On vérifiera de même que le point de partage dans la dérivation OAB est la dérivation a , où la perte de tension moyenne serait de 16,5. Par les mêmes considérations que ci-dessus, on arrivera à fixer dans chaque branche la nouvelle répartition des courants, telle qu'elle est indiquée sur le schéma par les flèches en pointillé.

Il faudra s'assurer dans tous les cas que les pertes maxima de tension, qui se produisent du point d'origine de l'alimentation aux divers points de partage, ne dépassent pas la limite qu'on s'est imposée, 2 pour 100 de la tension totale, par exemple.

Dans le cas où cette perte est supérieure, on augmente la section des conducteurs en conséquence et l'on déplace au besoin les points de jonction des feeders, pour arriver à un résultat satisfaisant.

193. Distribution à conducteurs multiples. — La distribution en dérivation utilisant de basses tensions est peu économique, tandis que, d'autre part, la distribution en série qui permet l'emploi d'une canalisation relativement peu coûteuse, supprime toute indépendance des lampes.

Le système à conducteurs multiples a pour but de concilier la sécurité de la distribution et l'économie de la canalisation, en permettant d'appliquer au système de distribution en dérivation des tensions aussi élevées qu'on le désire.

Dans le système à trois fils, par exemple (fig. 286), les dynamos sont accouplées par deux en série à la station génératrice; deux câbles extrêmes partent du pôle positif de la dynamo D et du pôle négatif de la dynamo D_1 . Un troisième câble, dit *conducteur neutre ou de compensation* part des pôles communs b, a_1 des deux dynamos.

Les lampes sont placées en dérivation sur chacun des ponts constitués par l'un des câbles extrêmes et par le fil neutre commun aux deux ponts. Si le nombre des lampes est le même sur chacun d'eux, on peut considérer chaque couple de lampes telles que $l s, l_1 s_1$, comme formant un

groupe de deux lampes en série; ces groupes seront donc capables de supporter une tension double de celle afférente à chaque lampe isolée. La tension totale est fournie par la somme des tensions des deux dynamos en série.

Dans l'hypothèse admise d'un nombre égal de lampes sur les deux ponts, le courant ayant traversé les lampes l , passera par les lampes s pour se fermer sur le pôle négatif de la batterie des dynamos; il ne passera donc aucun courant dans le fil neutre N. Celui-ci constitue justement l'élément qui assure l'indépendance des lampes, car si nous supposons que dans le groupe l , s , par exemple, la

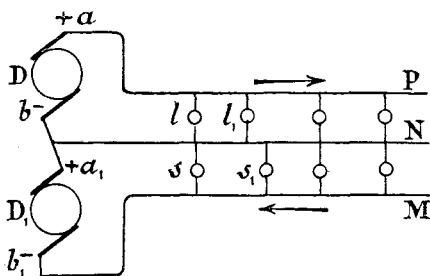


FIG. 286. — Distribution à trois conducteurs.

lampe s vienne à se briser, le courant de l ne trouvant plus d'issue par s , empruntera le fil neutre pour rejoindre le pôle négatif b de la dynamo D.

On peut même supprimer toutes les lampes s ; dans ce cas le courant de retour passera tout entier par le câble N et le système fonctionnera comme si la dynamo D existait seule, dans un système à deux conducteurs ordinaires.

En pratique, on a soin de distribuer les lampes sur les deux ponts, de manière que les récepteurs en activité soient à peu près en nombre égal, des deux côtés, et que dans tous les cas on ait la certitude que la différence ne dépasse jamais 50 pour 100. Lorsque cette répartition est sûrement étudiée, on est autorisé à prendre pour section du fil neutre, la moitié seulement de la section donnée aux

fils extrêmes, puisque le courant ne doit pas dépasser dans ledit fil neutre la moitié du courant total.

Quelle que soit la différence des récepteurs en service sur les deux ponts, le fonctionnement et l'indépendance des lampes se trouvent entièrement assurés.

Comme, d'autre part, il est impossible que le nombre des lampes en service soit toujours le même sur les deux ponts, il en résulte des chutes de tension différentes sur chacun d'eux, et les lampes sur le pont le plus chargé sont soumises à une tension inférieure à celle que supportent les lampes du pont le moins chargé.

On pourrait employer les moyens de régulation ordinaires : variation de l'excitation du champ inducteur des dynamos, ou introduction de résistances variables dans les conducteurs de chaque pont pour y maintenir la tension constante ; mais en pratique on a recours à des procédés automatiques que nous expliquerons ci-après.

La distribution à trois fils a donc pour effet de doubler la tension et de réduire par conséquent de moitié le courant nécessaire ; on voit d'ailleurs que le même courant sert pour deux lampes en série.

Le taux de l'économie réalisée sur les conducteurs dépend du point de vue auquel on se place ; la question peut en effet se poser de trois façons différentes ; savoir : quelle est l'économie, 1° pour une même perte de tension absolue ; 2° pour une même perte de tension relative ; 3° pour une même perte d'énergie.

On peut encore faire l'hypothèse que les trois conducteurs ont le même diamètre ou que le fil neutre a un diamètre moitié de celui des deux autres ; nous n'envisagerons que le cas des trois conducteurs égaux.

Une tension double, comportant une intensité moitié moindre, la même perte de potentiel se produira sur des conducteurs deux fois plus résistants ou ayant une section deux fois plus petite. Ainsi, l'on consent par exemple une perte de potentiel de 10 pour 100, sur une tension totale de 110 volts, ou 10 volts en nombre rond ; soit s la section des conducteurs du système ordinaire à deux fils

qui produit cette chute de 10 volts ; la section des conducteurs du système à trois fils, sera pour la même perte absolue de $\frac{S}{2}$ seulement. Mais cette perte de 10 volts sur le dernier système qui fonctionne à 220 volts, ne constitue qu'une perte relative de 5 pour 100 ; si l'on consent dans ce cas la même perte de 10 pour 100 que dans le premier, les conducteurs pourront être encore de section deux fois plus petite soit $\frac{S}{4}$.

La section totale du système à deux fils étant 2 S, elle sera $3 \times \frac{S}{4}$ pour le système à trois fils ; le rapport entre les quantités de cuivre des conducteurs, qui est évidemment le même que celui des sections sera donc :

$$\frac{3 \times S}{4 \times 2 \times S} = \frac{3}{8}$$

C'est-à-dire que le poids total du cuivre des canalisations à trois fils sera seulement les $\frac{3}{8}$ de celui que nécessiterait la distribution ordinaire à deux fils, avec une tension moitié moindre ; l'économie est donc de $\frac{5}{8}$.

On arriverait à la même proportion en considérant l'énergie absorbée par la résistance des conducteurs. Cette énergie, exprimée en volts, a pour expression :

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

Or, comme dans le système considéré le courant I est deux fois plus petit, son carré I^2 est quatre fois plus petit que dans l'autre cas ; on pourra donc prendre pour R une valeur quatre fois plus grande, si l'on consent la même absorption d'énergie ; cette résistance correspond à des conducteurs de section quatre fois plus petite, c'est-à-dire égale à $\frac{S}{4}$, soit $\frac{S}{2^2}$.

On peut aisément généraliser ces formules pour les appli-

quer à des distributions multiples à plus de trois fils; on emploie en effet pratiquement la distribution à quatre et à cinq fils (fig. 287); l'économie augmente avec le nombre

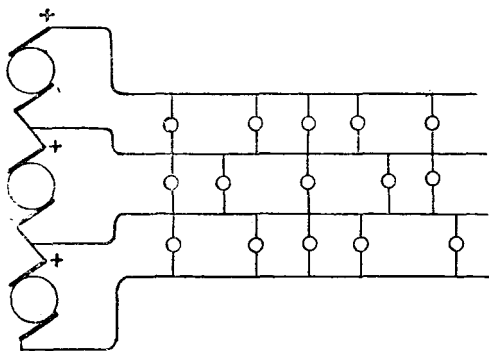


FIG. 287. — Distribution à conducteurs multiples.

des fils, mais en même temps aussi la complication des connexions et la difficulté de maintenir l'égalité constante de potentiel sur les différents ponts.

On voit sur le schéma ci-joint d'une distribution à quatre fils que le nombre des conducteurs dépasse d'une unité celui des dynamos en série.

Soit, pour la généralisation, n le nombre des dynamos, $(n + 1)$ sera le nombre des fils. Dans la formule précédente, on avait $n = 2$ et $n^2 = 4$, le rapport précédent deviendra donc :

$$\frac{(n + 1) S}{n^2 \times 2 S} = \frac{n + 1}{2 n^2}$$

Si dans cette formule on fait $n = 2$ pour le système à trois fils, on retrouve bien :

$$\frac{n + 1}{2 n^2} = \frac{3}{8}$$

Faisant l'application de la même relation au système à cinq fils, il vient :

$$\frac{n+1}{2n^2} = \frac{5}{2 \times 16} = \frac{5}{32}$$

C'est-à-dire que le poids de cuivre, en admettant que tous les conducteurs sont d'égale section, serait à peine le sixième du poids nécessaire dans la distribution ordinaire à deux fils; toutefois, le prix des conducteurs et de la main-d'œuvre, surtout dans le cas de câbles souterrains isolés, ne serait pas réduit dans la même proportion.

DISTRIBUTION A FILS MULTIPLES PAR FEEDERS. — ÉGALISATEURS DE TENSION. — Au lieu de disposer plusieurs dynamos en série à l'usine génératrice, pour obtenir la tension désirée, il est plus simple, au point de vue de la régulation du potentiel sur les différents points, de mettre en œuvre une seule dynamo ou un groupe de dynamos en dérivation donnant chacune directement le potentiel voulu.

Dans ce cas, les deux câbles extrêmes jouent le rôle de feeders partant des pôles de la station, et les conducteurs intermédiaires ou de compensation existent seulement dans le réseau de distribution et n'aboutissent pas à la station génératrice (fig. 288).

Avec une pareille disposition, le potentiel de la dynamo D de 330 volts, par exemple, se répartit entre les lampes

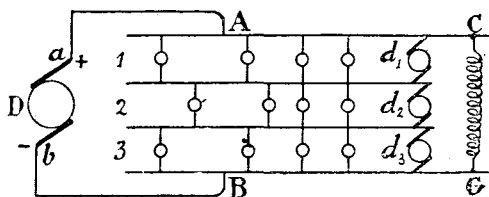


FIG. 288. — Égalisateurs de tension.

de chaque groupe de trois en série, par des chutes égales de 110 volts, sur chaque point, si les trois circuits sont également chargés.

Supposons maintenant que le nombre des lampes en activité diminue sur le pont n° 2, la tension correspon-

dante augmentera de manière à forcer le courant venant des lampes plus nombreuses du pont n° 1 dans les lampes réduites du pont précité et en raison de la moindre perte de charge qui se produira dans ce circuit.

On remédie à cette inégalité des potentiels se produisant sur les différents ponts, par l'emploi des égalisateurs de tension, dont la première application est due à Elihu Thomson.

Ces appareils ne sont autre chose que des dynamos de faible puissance dont les induits sont montés solidairement sur le même axe et sont intercalés entre les couples de fils des différents ponts, comme les dynamos génératrices dans le système en série décrit précédemment. L'enroulement de l'inducteur C G commun à tous les induits, est connecté entre les fils extrêmes. Ces induits disposés sur le réseau des câbles, comme les lampes, jouent le rôle de récepteurs-moteurs et tournent sous l'action du courant qui les traverse, d'un mouvement commun.

On sait que les électro-moteurs développent une force contre-électro-motrice opposée à la force agissant à leurs bornes ; il en résulte que le courant absorbé par les induits est dû à la différence des deux forces antagonistes et qu'il est, par conséquent, très faible ; ainsi ces moteurs, qui n'ont d'ailleurs aucun travail mécanique à effectuer, ne dépensent qu'une très faible quantité d'énergie.

Les choses continuent ainsi tant que les trois ponts sont également chargés et soumis, par suite, à la même tension. Mais si celle-ci augmente, comme nous l'avons dit plus haut, sur le pont n° 2, par exemple, le courant reçu par d_2 devient plus grand et cet induit tend à tourner avec une plus grande vitesse, il entraîne alors les autres induits et joue vis-à-vis d'eux le rôle de moteur. La force contre-électro-motrice de ces derniers augmentant avec la vitesse devient supérieure à la force agissant aux bornes dans les ponts correspondants, et ces induits déversent alors leur courant dans le circuit au lieu d'en recevoir de celui-ci.

Ainsi l'énergie disponible sur le pont n° 2 se transforme en force motrice dans l'induit d_2 , qui restitue cette énergie, sous forme électrique, aux induits d_1 et d_3 chargés de la répartir dans les ponts correspondants, au prorata des besoins de l'alimentation dans chacun d'eux. Cette distribution d'énergie supplémentaire relève la tension dans les circuits les plus chargés et ramène ainsi l'égalité de potentiel entre les divers ponts du réseau.

Cette régulation se fait donc automatiquement et sans autre dépense d'énergie que celle absorbée par les résistances mécaniques, électriques et magnétiques des électromoteurs, dont la puissance est faible, d'ailleurs, puisqu'elle correspond uniquement à des différences de charge toujours peu importantes.

La figure 289 montre la répartition des courants dans le cas particulier d'une distribution à trois fils. On voit que

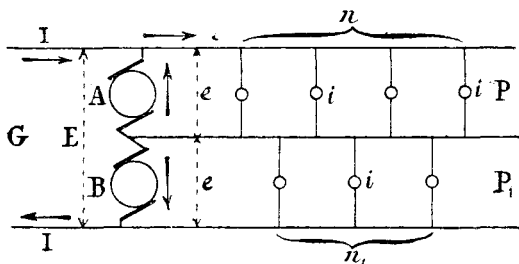


FIG. 289 — Répartition des courants.

la dynamo régulatrice B placée sur le pont P_1 le moins chargé, reçoit le courant de la station génératrice G et joue le rôle de moteur vis-à-vis de la dynamo A qui fournit le complément de courant nécessaire au pont P le plus chargé.

ÉGALISATEURS DE TENSION SYSTÈME SIEMENS. — Au lieu d'employer des dynamos pour compenser les variations de tension provenant des différences de charges sur les divers branchements, Siemens a combiné des régulateurs spéciaux, dont les bornes sont connectées sur les conduc-

teurs de distribution, pris deux à deux, comme les induits des dynamos régulatrices.

Dans le système de distribution à quatre fils (fig. 290), un système de feeders à deux câbles part des bornes de

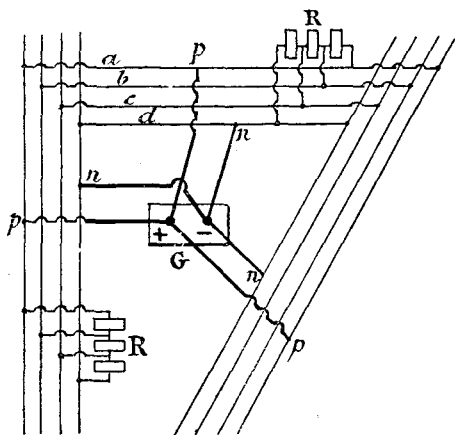


FIG. 290. — Système Siemens d'égalisation des tensions.

l'usine génératrice G et vient se souder aux points p et n , aux distributeurs extrêmes; les régulateurs R sont disposés, comme l'indique le schéma, dans les régions où se produisent les chutes de tension les plus étendues. Il y a donc dans chaque sous-station régulatrice trois appareils reliés en dérivation entre les divers groupes de deux distributeurs.

Considérons un de ces appareils connecté entre les distributeurs a et b (fig. 291). Il se compose essentiellement d'un secteur K , dont l'axe o porte une poulie sur laquelle s'enroule le fil à deux brins soutenant les noyaux d'électro N_1 et N_2 ; un balai p frotte sur le moyeu du secteur.

Celui-ci en tournant glisse sur les plots d'une série de résistances tels que 1, 2, 3, en dérivation sur le fil ef , qui est en connexion permanente avec le distributeur a ; les

mêmes résistances sont reliées en nombre variable au second conducteur *b*, suivant le jeu du secteur, par *p h g B*.

Le courant arrivant de *B*, passe en *g h*, pour atteindre le balai *p*, de là se répand dans le secteur et se distribue dans les divers plots des résistances en contact, pour se fermer sur le pôle *A*. On voit donc que le courant débité dans ce système, sera d'autant plus intense qu'il y aura

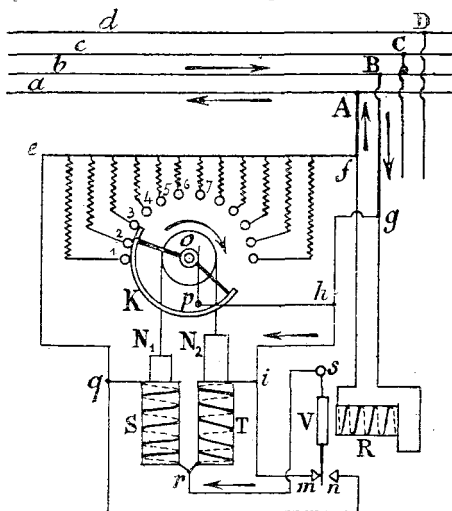


FIG. 291. — Appareil égalisateur de tension.

un plus grand nombre de plots recouverts par le secteur ou de résistances dérivées en circuit : ce courant ne pouvant provenir que des conducteurs *a* et *b*, détermine sur ce couple de distributeurs une chute de tension plus ou moins grande. Tout se passe comme si, dans une distribution d'eau, on ouvrait un certain nombre de robinets d'érogation sur les conduites, pour provoquer par un excédent de débit, une perte de charge déterminée.

Le reste de l'appareil a pour but de produire cette régu-

lation d'une façon automatique. A cet effet, une seconde dérivation prise aux points f et g alimente le solénoïde R d'un électro-aimant qui peut attirer vers la droite l'armature V munie d'un style qui s'appuie alors sur le plot n . Cette attraction est combattue par le ressort s qui tend à ramener l'aiguille vers la gauche au contact du plot m .

Les noyaux N_1 et N_2 dont il a été parlé plus haut plongent dans les solénoïdes S et T. Ces solénoïdes sont disposés de telle sorte que le courant venant de h pénétrera soit par i dans T, soit par r dans S.

Supposons que la tension croît entre les conducteurs a et b , le courant augmentera en R, l'armature V attirée vient en contact avec n et ferme le circuit $h i T r s n q e f A$ par le solénoïde T; le noyau N_2 est alors attiré et il entraîne la poulie et le secteur dans le sens de la flèche. Le secteur recouvrant un plus grand nombre de plots, détermine un afflux de courant dans les résistances en dérivation et par suite une chute de potentiel compensant l'élévation de tension sur les conducteurs $a b$.

Si au contraire, la tension diminue, l'action du ressort antagoniste l'emporte sur l'attraction de R et l'aiguille de l'armature V se portant au contact du plot m , ferme le circuit $h i m s r S q e f A$ à travers le solénoïde S; le secteur tourne en sens inverse et des résistances sont retirées du circuit, jusqu'à ce que la différence de potentiel sur les branchements $a b$ soit revenue à son taux normal; l'aiguille de l'armature prend alors sa position d'équilibre à égale distance des plots m et n .

Cette régulation entraîne une dépense d'énergie constante, à travers les résistances en dérivation; il faut, en effet, que dans la position d'équilibre il y ait toujours un certain nombre de résistances en circuit, afin que le réglage puisse se faire dans les deux cas de diminution et d'augmentation de tension.

194. Conditions spéciales aux distributions par courants alternatifs. — Dans tout ce qui précède, nous n'avons pas eu égard à la nature des courants utilisés pour la distribution d'énergie électrique. Il n'y a, en effet, aucune distinction

à faire entre les courants continus et alternatifs, en ce qui concerne la disposition des lampes et autres récepteurs sur les conduites de distribution.

On sait que la force électro-motrice et l'intensité efficace des courants alternatifs jouent le même rôle que la force électro-motrice et l'intensité des courants continus; que les premiers obéissent comme les seconds à la loi d'Ohm et donnent lieu, sur les conducteurs de distribution, aux mêmes chutes de tension et aux mêmes pertes de puissance.

Les modes de distribution de l'énergie aux récepteurs sont donc les mêmes dans les deux cas, bien que, le plus généralement, l'emploi des courants alternatifs comporte le système de distribution indirect par transformateurs.

Dans tous les cas, le calcul de la ligne, c'est-à-dire de la section des conducteurs, se fera de la même façon, en se basant soit sur la perte de tension, soit sur l'absorption d'énergie que l'on aura consentie.

Soit R la résistance en ohms commune aux conducteurs d'aller et de retour, I le courant efficace et e la perte de tension consentie; on aura toujours les relations;

$$e = 2 R \times I \quad \text{et} \quad R = \frac{r \times l}{S}$$

d'où l'on tirera facilement la résistance R et la section correspondant à la chute de tension donnée.

Si la ligne doit être calculée pour une absorption de puissance déterminée w , on se servira de la formule de Joule :

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

d'où :

$$R = \frac{w}{2 \times I^2}$$

et l'on en déduira, comme ci-dessus, la section S correspondant à la perte de puissance consentie.

RÉACTANCE DES RÉCEPTEURS. — Toutefois, la self-induction et la capacité des circuits ont, dans le cas des courants alter-

natifs, une influence qui apporte de nouveaux éléments au calcul des conducteurs traversés par ces courants.

Supposons que les récepteurs, comme il arrive notamment dans le cas des lampes à arc ou des électro-moteurs, possèdent une certaine inductance provenant de leur self-induction; le courant présente alors une différence de phase avec la force électro-motrice, et la puissance prend la forme :

$$W = E \times I \times \sqrt{1 - M^2}$$

expression dans laquelle $\sqrt{1 - M^2}$, est une quantité qui varie de 1 à 0 lorsque M varie de 0 à 1. Posons pour simplifier :

$$\sqrt{1 - M^2} = K_1$$

la quantité K_1 sera donc généralement une fraction, et sa valeur maximum ne dépassera pas l'unité.

Soit, par exemple, $K_1 = 0,7$; on aura :

$$W = E \times I \times 0,7$$

On voit par là, qu'un courant ayant pour valeur :

$$I_1 = I \times 0,7$$

donnerait la même énergie dans un circuit dépourvu de self-induction; réciproquement, le courant I nécessaire dans le cas du décalage sera supérieur à I_1 et aura pour expression :

$$I = \frac{I_1}{0,7} = 1,43 I_1 = \frac{I_1}{K_1}$$

Désignons par $2 R$ la résistance du circuit où se font sentir les effets de la self-induction et par $2 R_1$ celle du circuit sans décalage qui donnerait lieu à la même perte de puissance W ; on aura respectivement dans les deux cas :

$$W = 2 R \times I^2 = 2 R \times \frac{I_1^2}{K_1^2}$$

et :

$$W = 2 R_1 I_1^2$$

Ces quantités étant égales par hypothèse, on en déduit :

$$R_1 = \frac{R}{K_1^2}$$

et encore :

$$R = R_1 \times K_1^2$$

c'est-à-dire que la résistance de la ligne à self-induction

s'obtient en multipliant, par le carré du coefficient correspondant au décalage de cette ligne, la résistance d'une ligne sans inductance donnant lieu à la même perte de puissance.

Pour l'exemple numérique choisi, on aurait :

$$R = R_1 \times \overline{0,7}^2 = \frac{R_1}{2}$$

Donc la résistance de la ligne avec inductance est, toutes choses égales d'ailleurs, la moitié de la résistance de la ligne sans décalage; autrement dit, la section des conducteurs doit être doublée dans le premier cas. Ce fait résulte de ce que le courant est alors supérieur dans la proportion indiquée; soit :

$$I = \frac{1}{0,7} I_1 = 1,43 I_1$$

Il semblerait que la perte de tension sur la ligne dût être plus grande avec ce courant que dans le cas du circuit sans inductance, et que par suite la tension efficace à l'extrémité de la ligne fût plus réduite du fait de l'inductance; mais c'est le contraire qui se produit, par suite de l'avance de phase que prend la tension à l'extrémité de la ligne, sur la tension à l'origine.

Toutefois cette différence en moins est pratiquement négligeable et elle ne dépasse en aucun cas 2 pour 100, car elle varie, comme l'a démontré M. Rodet dans son ouvrage de la *Distribution de l'énergie par courants polyphasés*, de 0,1 à 1,9 pour des pertes de puissance de 5 à 30 pour 100 et des valeurs de K_1 comprises entre 0,5 et 0,9.

On obtiendra donc pratiquement la perte de tension, en multipliant la résistance $2R$ de la ligne par l'intensité I déduite de la valeur de la puissance transmise sans décalage, soit :

$$W = E \times I \text{ d'où } I = \frac{W}{E}$$

Si les récepteurs étaient pourvus de capacité au lieu d'inductance, les effets seraient les mêmes, au point de vue de la perte de tension et de la tension efficace, à l'extrémité de la ligne.

Il peut arriver que le circuit de distribution comporte à la fois des récepteurs à inductance, tels que les électro-moteurs et des appareils sans inductance, comme des lampes à incandescence. Dans ces conditions, le courant alimentant les

moteurs présentera une certaine différence de phase avec la tension, et la puissance absorbée par ces récepteurs sera :

$$P_m = E \times I_1 \times K$$

E étant la tension sur le circuit d'utilisation. Quant au courant des lampes, il sera en concordance de phase avec la tension, et la puissance correspondante est simplement :

$$P_l = E \times I_2$$

Soit O A le vecteur de la tension à un instant donné (fig. 292), O C le courant I_1 faisant l'angle φ avec la tension, et C D le courant I_2 dirigé suivant une parallèle à O A, puisqu'il est

en concordance de phase avec la tension. On voit que O D sera le courant résultant, lequel n'est pas égal à la somme $(I_1 + I_2)$, par suite du décalage du premier courant. L'angle φ_1 de différence de phase du courant résultant et de la tension est d'ailleurs moindre que celui du courant composant.

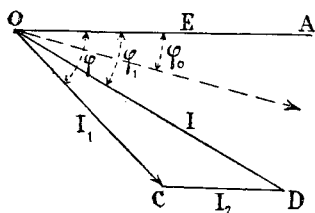


FIG. 292. — Composition des courants avec et sans inductance.

Si nous désignons par I le courant résultant O D qui fait un angle φ_1 avec la tension E au point d'utilisation, ce courant donne lieu dans la ligne à une chute de potentiel $2 R \times I$, qui suit toutes les phases de l'intensité I et constitue une tension de même direction que O D; or la tension E_0 à l'origine de la ligne est la résultante des deux tensions précitées; elle fera donc un certain angle φ_0 avec O A. Par suite, la puissance à la sortie de l'usine génératrice sera :

$$W_0 = E_0 \times I \times K_0$$

et la puissance à l'extrémité de la ligne, c'est-à-dire au point d'utilisation :

$$W = E \times I \times K_1$$

les coefficients K_0 et K_1 correspondant aux angles φ_0 et φ_1 ; on pourra donc écrire finalement en vertu du principe de la conservation de l'énergie :

$$E \times I \times K_0 = E \times I \times K_1 + 2 R \times I^2$$

RÉACTANCE DES LIGNES. — Nous avons supposé que la réac-

tance, inductance ou capacité, était confinée dans les récepteurs; mais les lignes elles-mêmes possèdent une certaine réactance.

L'inductance des câbles souterrains est toujours très faible. Celle des lignes aériennes varie d'après MM. Houston et Kennelly, suivant les diamètres des fils et les distances entre axes des deux conducteurs, de 0,6 à 1,6 millihenrys par kilomètre de conducteur simple.

Supposons, en empruntant l'exemple numérique à l'ouvrage précité de M. Rodet, une ligne de 30 kilomètres de long, transmettant un courant de 50 ampères, sous 10.000 volts, avec une fréquence n de 50 périodes, à des appareils ne décalant pas le courant, mais possédant elle-même une inductance de 2,2 millihenrys par kilomètre de double fil. La force électro-motrice d'induction sera ;

$$e = 2 \pi \times n \times L \times I = 1036 \text{ volts.}$$

La perte de tension due à la résistance de la ligne de 38 millimètres de section sera pour le courant de 50 ampères qui traverse les appareils récepteurs sans décalage :

$$\frac{r \times 2 l}{S} \times I = \frac{18 \times 2 \times 30}{38} \times 50 = 1415 \text{ volts.}$$

Soit E_1 la tension aux bornes des récepteurs (fig. 293); la tension initiale $E = 10.000$ doit pouvoir suffire à la chute de tension de 1415 volts, en laissant un excédent disponible E_1 aux bornes des récepteurs; en outre, elle doit équilibrer la force électro-motrice de self-induction e .

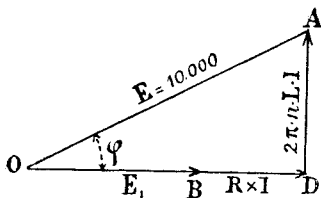


FIG. 293.— Composition des forces électro-motrices sur les lignes à réactance.

On remarquera que les récepteurs ne décalant pas le courant, par hypothèse, la différence de potentiel $E_1 = OB$ à leurs bornes, aura la même direction que le courant I et présentera la même différence de phase avec la tension E à l'origine; quant à la force électro-motrice de self-induction, elle est en retard de 90 degrés sur le courant, et la droite AD qui la représente sera à angle droit sur OB .

Le triangle rectangle OAD donnera donc :

$$\overline{10.000}^2 = (E_1 + 1415)^2 + \overline{1036}^2$$

d'où l'on tire :

$$E_1 = 8531 \text{ volts.}$$

Si la ligne était dépourvue d'inductance, la tension aux bornes des récepteurs serait : $10.000 - 1415 = 8585$.

La différence $8585 - 8531 = 54$ volts constitue l'excédent de perte de tension dû à l'inductance de la ligne.

Si les appareils récepteurs sont eux-mêmes pourvus d'inductance, ils détermineront un nouveau retard de phase du courant et de la tension $R \propto I$, qui produira une baisse de tension encore plus grande.

Un phénomène spécial aux courants alternatifs a été mis en évidence par M. Thomson, au sujet de la répartition de l'intensité dans la section des conducteurs ; le courant semble en effet se concentrer dans les couches extérieures et cela d'une manière d'autant plus prononcée que la fréquence du courant est plus grande. Pour les sections de conducteurs inférieures à 10 millimètres, l'accroissement apparent de résistance qui résulte de ce fait est insignifiant, mais il atteint 17 pour 100 pour les conducteurs de 20 millimètres.

Il conviendrait donc de prendre des conducteurs tubulaires, au lieu de câbles massifs, pour le transport des courants alternatifs, dès qu'on dépasse la fréquence de 50 périodes et le diamètre de 20 millimètres.

La capacité des câbles conducteurs a aussi une certaine influence dans les distributions par courants alternatifs. Une partie du courant produit par les génératrices est emmagasinée pour la charge des conducteurs et n'est pas utilisée pour le travail. Une capacité notable peut donner lieu à un grand courant de condensation, qui aura pour effet de charger inutilement les génératrices et de diminuer ainsi le rendement de la distribution.

Toutefois, comme le courant de charge est décalé de 90 degrés par rapport au courant principal de travail, son influence est d'autant plus faible que l'intensité de

celui-ci est plus grande, et il est à peine appréciable à pleine charge.

Les capacités de câbles pour lumière ne dépassent guère quelques dixièmes de microfarads par kilomètre. Les câbles concentriques Ferranti, constitués par deux tubes de cuivre de 14 millimètres et de 20 millimètres de diamètre, isolés entre eux, ainsi que de l'armature en fer extérieure, par du papier enduit de cire, ont donné les capacités suivantes par kilomètre, savoir : entre les deux conducteurs, 0,23 microfarad ; entre le conducteur extérieur et l'armature de fer, 2 microfarads.

Les capacités des lignes aériennes sont beaucoup plus faibles ; elles atteignent seulement quelques centièmes de microfarad, soit entre deux fils, soit entre un fil et la terre.

195. Distribution par courants diphasés. — Si l'on utilise simultanément sur un même circuit plusieurs courants alternatifs présentant entre eux, deux à deux, une même différence de phases, on réalise ce que l'on appelle une distribution par courants *polyphasés*.

Un *courant diphasé* sera constitué par deux courants alternatifs déphasés d'un quart de période, l'un par rapport à l'autre.

Chacun de ces courants constitutifs peut avoir son circuit distinct, de sorte que l'ensemble de la distribution comportera quatre conducteurs (fig. 294).

Dans ce cas la ligne se calculera comme deux lignes ordinaires à courants alternatifs simples, distribuant chacune par moitié la puissance totale $2 E I$.

Mais on voit que l'on peut réunir en un seul conducteur MN , les deux fils de retour C et D , car cette opération n'aura d'autre effet que de ramener les deux pôles C et D

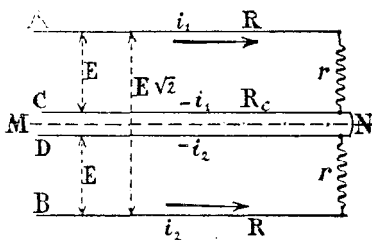


FIG. 294. — Distribution diphasée.

au même potentiel, sans changer en rien la différence de potentiel E , qui existait auparavant entre chaque fil d'aller et chacun des fils de retour à présent confondus.

Les récepteurs r qui doivent être placés entre l'un des fils extrêmes et le fil commun, seront toujours soumis à la même différence de potentiel et parcourus par des courants décalés entre eux d'un quart de période.

Rappelons qu'il existe entre les courants i_1 et i_2 , à chaque instant, les relations :

$$i_1 = I_m \times K = I \sqrt{2} \times K$$

et

$$i_2 = -I_m \times \sqrt{1 - K^2} = -I \sqrt{2} \times \sqrt{1 - K^2}$$

en désignant par I l'intensité efficace.

De même entre les différences de potentiel, on a :

$$e_1 = E \sqrt{2} \times K; e_2 = -E \sqrt{2} \times \sqrt{1 - K^2}$$

Toutefois, par suite de la réunion des deux fils de retour, les intensités ne sont pas en concordance de phases avec les tensions respectives, ce qui provient de l'influence de la résistance du conducteur commun.

Mais ce décalage est généralement faible et l'on peut admettre pratiquement que la concordance existe, comme avant la suppression du quatrième fil.

Le courant total ($i_1 + i_2$) qui passe dans le fil commun peut s'obtenir graphiquement, en faisant la somme des ordonnées des deux sinusôides représentant respectivement chacun de ces courants; il est évident qu'on obtiendra une courbe résultante symétrique par rapport à chacune des courbes composantes et dont la phase sera, par suite, intermédiaire entre celles de ces courbes, soit en retard d'un huitième de période sur e_1 et en avance de la même phase sur e_2 .

On pourra donc écrire, en appliquant la loi d'Ohm à chacun des circuits ANM, BNM et désignant par R_c la résistance du conducteur commun :

$$i_1 = \frac{E \times \sqrt{2}}{R + r + 2 R_c} \times K; i_2 = \frac{E \times \sqrt{2}}{R + r + 2 R_c} \times \sqrt{1 - K^2}$$

et :

$$j = i_1 + i_2 = \frac{E \times \sqrt{2}}{R + r + 2 R_c} \times (K \pm \sqrt{1 - K^2})$$

On prendra le signe moins ou plus, suivant que K correspondra à un angle plus petit ou plus grand que 90 degrés. Cette relation peut s'écrire sous la forme :

$$j = \frac{E \times \sqrt{2}}{R + r + 2 R_c} \times \sqrt{2} \times \frac{K + \sqrt{1 - K^2}}{\sqrt{2}}$$

Or, le dernier facteur est évidemment la valeur que prend le coefficient de phase afférent au courant j , quand celui correspondant à i_1 est K . Supposons, en effet, que K désigne le coefficient relatif à l'angle de $\frac{3}{4}\pi$, qui correspond au maximum de j , comme on peut d'ailleurs le voir matériellement en représentant les trois courbes d'intensité; dans ces conditions, K projection du vecteur faisant l'angle de $\frac{3}{4}\pi$ avec l'axe des temps, sur l'axe des ordonnées, n'est autre chose que le demi-côté du carré inscrit dans la circonférence, il est donc égal à $\frac{1}{\sqrt{2}}$; portant cette valeur de K dans l'expression du coefficient de j , il vient :

$$\frac{K + \sqrt{1 - K^2}}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 1$$

Or, la valeur 1 du vecteur correspond au maximum de l'intensité, donc le maximum de j est :

$$Jm = \frac{E \times \sqrt{2}}{R + r + 2 R_c} \times \sqrt{2} = \frac{2 E}{R + r + 2 R_c}$$

et la valeur efficace J , qui s'obtient en divisant par $\sqrt{2}$:

$$J = \frac{E \sqrt{2}}{R + r + 2 R_c} = I \times \sqrt{2} = 1,41 \times I$$

C'est-à-dire que la somme des courants traversant le fil commun est égale à 1,41 fois l'intensité de l'un des courants composants.

La différence de potentiel E_c entre les deux conducteurs

extrêmes ou plutôt distincts, est égale à la somme des tensions sur les deux ponts ; en les composant comme les intensités, nous trouverions de même pour cette tension efficace :

$$E_e = E \times \sqrt{2} = 1,41 \times E$$

Si donc la tension E de chacun des courants composants est égale à 100 volts, celle entre les conducteurs en discordance de phases sera de 141 volts.

Supposons que l'on donne la même section à chacun des trois fils, qui auront alors une égale résistance R ; la perte de puissance totale sera :

$$2 R \times I^2 + R \times (I \sqrt{2})^2 = 4 R \times I^2$$

La perte est la même que sur les quatre fils de résistance R d'une distribution à deux circuits distincts, mais comme on a supprimé un fil sur quatre, on réalise une économie de 25 pour 100 sur le poids du cuivre.

Dans le cas d'une distribution à haute tension, on sera amené à réduire la tension de chaque section à $\frac{E}{\sqrt{2}}$, si l'on ne veut pas que la tension entre les deux fils distincts soit supérieure à E ; sans cette précaution, les appareils générateurs et récepteurs seraient soumis à une tension que leur isolement pourrait être incapable de supporter. Il faudra alors, pour une même puissance, porter l'intensité des courants à la valeur $I \times \sqrt{2}$ et la perte deviendra :

$$2 R \times (I \sqrt{2})^2 + R \times 2 I^2 = 8 R \times I^2$$

Si l'on veut réduire la perte à égalité, on devra prendre des conducteurs de résistance moitié moindre, donc de section double $2 S$. Le rapport des sections totales dans les deux cas sera donc :

$$\frac{2 S \times 3}{4 S} = \frac{3}{2} = 1,5$$

C'est-à-dire que le poids de cuivre de la ligne à trois fils, pour une même tension maximum, est 1,5 fois celui de la ligne à quatre fils.

ENROULEMENT GRAMME DIPHASÉ. — Voyons maintenant comment on dispose en circuit les bobines génératrices des

dynamos diphasées et les lampes formant les appareils récepteurs.

La figure 295 indique le montage de l'enroulement des bobines sur un anneau Gramme; les deux circuits sont

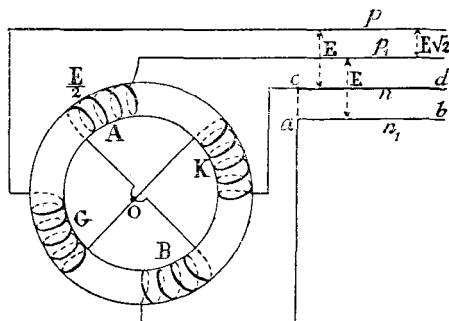


FIG. 295. — Enroulement Gramme de bobines diphasées.

indépendants et constitués par deux bobines en série disposées aux extrémités d'un même diamètre.

Ces bobines, au lieu d'être enroulées sur un anneau, pourraient être enfilées sur quatre expansions polaires intérieures, comme il arrive dans certains types de génératrices.

Si l'on désigne par $\frac{E}{2}$ la différence de potentiel engendrée aux extrémités de chacune des bobines, chaque couple appartenant au même circuit produira deux tensions égales et de phases concordantes, soit une tension totale égale à E . Il en résultera donc des tensions efficaces E égales, entre les pôles $p n$ d'une part et les pôles $p_1 n_1$ d'autre part.

Mais on peut supprimer le fil $a b$ et relier la quatrième bobine B par la connexion $a c$ au troisième fil $c d$ servant de retour commun; alors, comme nous l'avons vu, la différence de potentiel entre les deux fils de départ p et p_1 est égale à $E \sqrt{2}$.

On pourrait encore, en conservant les quatre fils distincts, relier l'une des deux extrémités de chaque bobine à un point commun o , de manière à former une sorte d'étoile dont les extrémités extérieures des bras se réunissent respectivement à chacun des quatre conducteurs du circuit. Cette connexion en un point ne peut changer en rien la force électro-motrice $\frac{E}{2}$ engendrée dans chaque bobine et la différence de potentiel entre ses extrémités telles que o et c , entre autres.

Pour déterminer la tension entre deux fils quelconques p_1 et n , par exemple, on remarquera que le circuit correspondant ne comprend que les deux bobines A et K en discordance de phases; dans le cas précédent des trois fils sans connexion commune en o , la différence de potentiel $E \times \sqrt{2}$ entre deux pôles en discordance, était le produit par $\sqrt{2}$ de la force électro-motrice correspondant aux deux bobines placées sur chaque pôle: ici, par analogie, remarquant qu'il n'y a qu'une seule bobine par pôle de force électro-motrice $\frac{E}{2}$, la différence de potentiel entre p_1 et n sera :

$$V = \frac{E}{2} \times \sqrt{2} = \frac{E}{\sqrt{2}}$$

Au lieu d'enrouler les bobines deux par deux, par groupes distincts, on peut, suivant la figure 296, réaliser un enroulement continu semblable à celui de Gramme; les quatre fils de ligne viennent alors se souder aux points de jonction des bobines. Si l'on trace un rectangle ayant ces points de jonction pour sommets, chacun des côtés correspondant aux bobines respectives pourra les représenter schématiquement. Par analogie avec la figure fermée que l'on obtiendrait pour trois bobines, dans le cas du courant triphasé, on qualifie ce système de *montage en triangle*.

La différence de potentiel entre p et q est égale à celle engendrée aux extrémités de la bobine A , soit $\frac{E}{2}$; celle

entre p et m correspondant aux deux bobines A et K en discordance sera, par analogie avec le cas précédent, égale à $\frac{E}{\sqrt{2}}$.

Notons encore que, dans tous les cas, les différences de potentiel entre les pôles correspondant à des bobines en

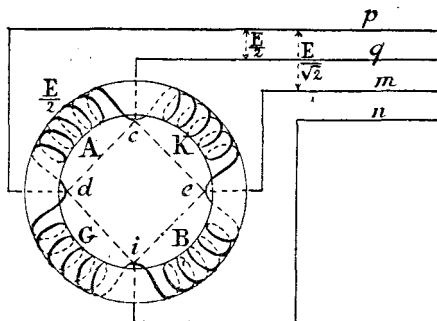


FIG. 296. — Enroulement diphasé sans fin.

discordance sont en phase intermédiaire avec ces bobines, leur phase en différant d'un huitième de période en avance ou en retard.

DISPOSITION DES LAMPES SUR LES CIRCUITS DIPHASÉS. — CIRCUITS DISTINCTS. — Considérons le premier cas, où les couples de bobines génératrices sont distincts et sont connectés respectivement sur chacun des groupes séparés du circuit à quatre fils (fig. 297).

Les lampes de chaque section sont soumises à la différence de potentiel des extrémités a, b et c, d des bobines génératrices.

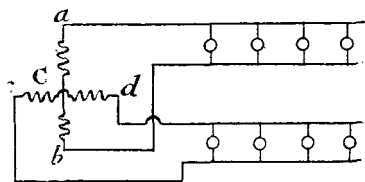


FIG. 297. — Circuit diphasé à quatre fils.

Tout se passe alors comme si chacun des groupes était alimenté par une machine distincte ab ou cd . Quant aux

conducteurs de distribution ils se calculent comme s'il s'agissait de deux circuits distincts à courant alternatif simple.

Dans la seconde disposition les bornes *b* et *d* des bobines génératrices sont réunies en un point commun *p* connecté au fil de retour commun (fig. 298). Les lampes sont

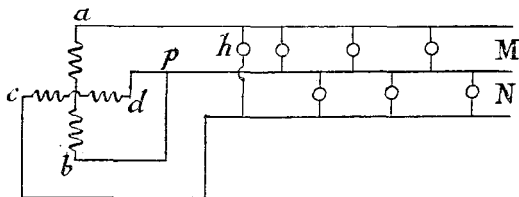


FIG. 298. — Circuit diphasé à trois fils.

placées en dérivation sur l'une ou l'autre des sections comprenant chacune le fil commun avec l'un des fils extrêmes.

La tension aux bornes des lampes est la même que précédemment, car elle est toujours déterminée par la différence de potentiel entre les extrémités *a* et *b* ou *c* et *d* des bobines. Le fil commun est traversé par un courant égal à 1,41 fois celui des autres fils dans le cas où les deux ponts comportent le même nombre de lampes; il est donc rationnel de lui donner une section sinon double, du moins égale à 1,41 fois celle des fils extrêmes.

On pourrait encore établir des lampes entre les deux fils extrêmes, comme la lampe *h*, mais il faudrait alors que ces lampes soient construites pour résister à une tension $\sqrt{2}$ fois plus grande que celles branchées sur les ponts *M* et *N*. Par exemple, si ces dernières étaient des lampes de 70 volts, les lampes *h* devraient être établies pour une tension :

$$e = 70 \times 1,41 = 100 \text{ volts environ}$$

DIPPOSITION EN TRIANGLE. — On peut aussi disposer les bobines génératrices et les lampes dans le système dit en

triangle (fig. 299). La borne a_2 de la lampe 4 peut être considérée comme étant reliée directement à la borne a_1 de la lampe 1. On reconstituerait effectivement le rectangle fermé en repliant la figure suivant la ligne $m p$. On voit que dans cette disposition le fil partant de l'un des sommets a doit se replier pour former une boucle $a M a^2$.

Si les lampes sont de 100 volts, les bobines génératrices devront produire chacune une tension de même valeur; la différence de potentiel entre deux fils consécutifs sera donc

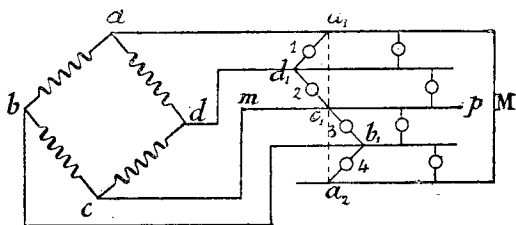


FIG. 299. — Circuit diphasé en triangle.

de 100 volts; elle sera de 141 volts aux bornes extrêmes de deux lampes consécutives telles que $a_1 c_1$ et $d_1 b_1$.

On remarquera que le groupe formé par deux bobines consécutives et les trois lignes aboutissant aux sommets correspondants est équivalent au système précédent à trois fils dont un conducteur commun. Chacun des quatre fils peut donc être considéré comme servant de retour commun aux deux autres fils de chaque groupe. On en déduit que, comme dans le cas précédent, l'intensité du courant dans chacun des fils est égale à 1,41 fois le courant nécessaire à l'alimentation des lampes réparties sur chaque pont, en admettant que le nombre des lampes est le même sur les quatre sections.

DISPOSITION EN ÉTOILE. — Une quatrième disposition est celle où les bobines génératrices et les lampes sont montées en étoile (fig. 300). Les quatre bobines sont reliées en un point commun o , et les quatre groupes de lampes dérivées, en un point o_1 ; il est bien entendu que les branches

a_1 a_1 b_1 c_1 d_1 peuvent être supprimées et remplacées par les connexions en pointillé.

Chaque couple de bobines ab et cd donnant 200 volts, les lampes seront soumises à la différence de potentiel qui leur convient si elles sont du type de 100 volts. En effet, les groupes 1 et 3 sont en série sur les bobines ab ; il en est de même des groupes 2 et 4 sur les bobines cd . D'autre part, la différence de potentiel entre les deux lignes en discordance de phases, telles que 1 et 2, sera égale à 141 volts.

Dans les distributions d'éclairage par courants polyphasés, les tensions ne peuvent rester égales sur les diverses

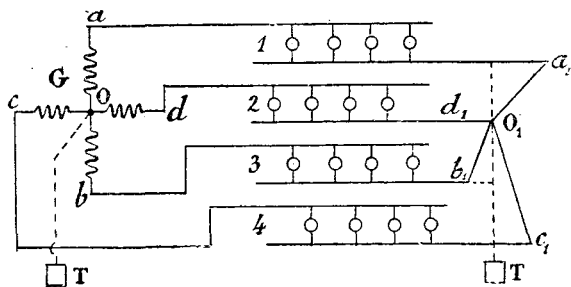


FIG. 300. — Circuit diphasé en étoile.

sections des lampes, que si chacune de ces sections est également chargée par un même nombre de lampes. Or, cette condition ne peut être pratiquement remplie et il en peut résulter des différences de tensions notables entre les lampes des diverses sections.

Ce défaut est surtout sensible dans les montages en étoile, et la distribution serait très défectueuse si l'on ne disposait pas d'un moyen commode pour équilibrer les tensions. Il consiste simplement à relier les centres des étoiles génératrices et réceptrices par un quatrième fil qui peut être remplacé par la terre ainsi qu'il est indiqué sur la figure 300. Nous retrouverons d'ailleurs cette disposition dans le système de distribution par courants triphasés.

196. **Distribution par courants triphasés.** — On obtiendra une distribution à courants triphasés, en employant trois circuits distincts à deux fils, traversés par des courants alternatifs présentant une différence de phase d'un tiers de période, l'un par rapport à l'autre.

On pourrait encore remplacer les trois fils de retour par un conducteur commun, ce qui réduirait à quatre le nombre des fils du circuit triphasé. Mais on peut faire mieux et supprimer le quatrième fil, de telle sorte que la distribution triphasée n'exige pas plus de conducteurs que le système diphasé. Cela tient à cette propriété remarquable du courant triphasé que *la somme des courants composants est constamment nulle*.

Les valeurs instantanées de ces courants sont en effet représentées par les expressions (tome I, § 162) :

$$\begin{aligned} i_1 &= I_m \times K \\ i_2 &= -\frac{I_m}{2} \times (K + \sqrt{3(1-K^2)}) \\ i_3 &= -\frac{I_m}{2} \times (K - \sqrt{3(1-K^2)}) \end{aligned}$$

En faisant la somme de ces quantités, on trouve effectivement, toutes réductions faites :

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

On en déduit que le courant total qui traverserait le fil commun étant nul, ce fil est lui-même inutile et peut être supprimé.

De la relation précédente on tire :

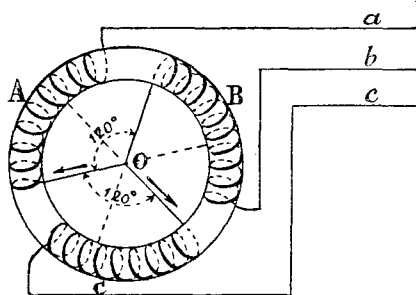
$$i_1 + i_2 = -i_3$$

c'est à-dire que l'un quelconque des trois courants est constamment égal et de signe contraire à la somme des deux autres; par conséquent, le nombre des conducteurs étant réduit à trois; chacun d'eux peut être considéré comme servant de retour aux deux autres; il n'y a donc pas besoin d'autre fil de retour.

Comme dans le système diphasé, les bobines généra-

trices et les récepteurs peuvent être montés en étoile ou en triangle.

MONTAGE EN ÉTOILE. — Le montage en étoile le plus simple de la génératrice comprendra trois bobines, occupant chacune le tiers de la circonférence et, par suite, ayant leurs



axes situés à des distances angulaires de 120° dans le champ magnétique (fig. 301). Ces bobines seront donc le siège de forces électro-motrices décalées d'un tiers de période, l'une par rapport à l'autre.

FIG. 301. — Montage triphasé en étoile.

La différence de potentiel efficace E entre le point commun o et les extrémités a, b, c des bobines sera celle engendrée dans chacune d'elles.

La différence de potentiel V entre les extrémités libres de deux bobines, c'est-à-dire entre deux lignes quelconques a et b par exemple est égale à :

$$V = E \sqrt{3}$$

En effet, prenant la différence des tensions instantanées des bobines A et B avec leurs signes, on a :

$$e_1 - e_2 = E_m \times K + \frac{E_m}{2} \times (K + \sqrt{3(1 - K^2)})$$

en effectuant les calculs indiqués, on trouve toute réduction faite :

$$e_1 - e_2 = E_m \times \sqrt{3} \times \frac{K\sqrt{3} + \sqrt{1 - K^2}}{2}$$

Il est facile de démontrer géométriquement que la valeur maximum de cette différence de potentiel résultante est justement exprimée par les termes $E_m \times \sqrt{3}$ de cette égalité,

Représentons les trois forces électro-motrices maxima par les vecteurs a, b, c décalés de 120 degrés (fig. 302), la force électro-motrice ($-e_2$) étant portée en sens inverse de b , en OB ; la résultante ($e_1 - e_2$) sera la diagonale OD du parallélogramme des forces construit sur les deux composantes. La figure montre que cette résultante a une avance de phase de 30 degrés sur la force électro-motrice e_1 .

D'autre part, la géométrie nous enseigne que l'apothème d'un hexagone régulier est égale à $\sqrt{3}$ multiplié par la moitié du rayon, on a donc ici :

$$om = \frac{a \times \sqrt{3}}{2} = \frac{e_1 \times \sqrt{3}}{2}$$

et par suite :

$$OD = 2 om = e_1 \times \sqrt{3} = E_m \times \sqrt{3}$$

OD représente donc la différence de potentiel maximum; celle efficace sera par suite :

$$\frac{OD}{\sqrt{2}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \times \sqrt{3} = E \times \sqrt{3} = V$$

Soit par exemple : $E_m = 141$ volts, la force électro-motrice efficace d'une bobine sera $\frac{E_m}{\sqrt{2}} = 100$ volts et celle aux extrémités libres de deux bobines : $V = 100 \times \sqrt{3} = 173$ volts.

On voit aussi que le courant dans chacun des fils de ligne a, b, c (fig. 301) est nécessairement le même que celui qui traverse les bobines génératrices correspondantes.

La puissance de la génératrice est évidemment la somme des puissances développées dans les trois bobines A, B, C :

$$W = 3 E \times I.$$

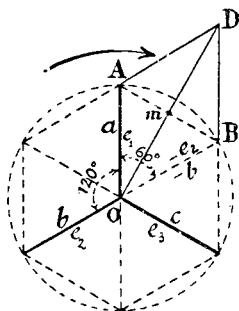


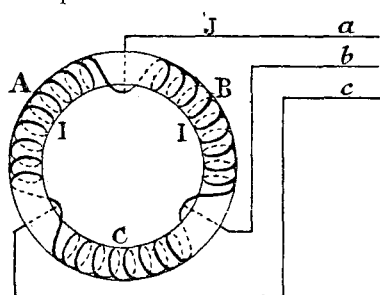
FIG. 302. — Détermination géométrique de la différence de potentiel.

Si l'on veut exprimer cette puissance en fonction de la différence de potentiel entre deux lignes, $V = E \sqrt{3}$, on aura :

$$W = 3 \frac{V}{\sqrt{3}} \times I = V \times I \times \sqrt{3}.$$

Nous remarquerons que dans cette expression V est la tension efficace et I le courant efficace aux bornes, tels qu'ils seraient relevés par les appareils de mesure du voltage et de l'intensité placés à l'origine du courant.

MONTAGE EN TRIANGLE. — Ce montage consiste toujours à disposer sur l'induit un enroulement continu dont les trois points de sectionnement répartis aux extrémités



d'arcs de 120° , sont reliés respectivement à chacun des fils de ligne (fig. 303).

La tension efficace entre deux conducteurs quelconques a et b est celle engendrée par la bobine correspondante B.

Mais le courant I dans une ligne a , par exemple, qui est la résultante des courants J des bobines adjacentes A et B décalés de 120° , sera par analogie avec la force électro-motrice V du cas précédent :

$$I = J \times \sqrt{3} = 1,73 \times J$$

En général, le nombre des bobines de chaque phase est multiple ; la disposition de la figure 304 montre l'enroulement de trois couples de bobines placées deux à deux en série, aux extrémités d'un même diamètre ; ce montage est analogue d'ailleurs à celui des couples de bobines des induits diphasés.

Un pareil système de bobines pourra être relié dans les

deux systèmes, soit en étoile par la réunion des trois extrémités libres a, b, c , comme il est indiqué par un arc en trait plein;

soit en triangle, en formant l'enroulement continu et sans fin tel qu'il est tracé en lignes pointillées.

Dans ce dernier cas, on voit que les points de connexion m, n, p des lignes sont bien placés à la

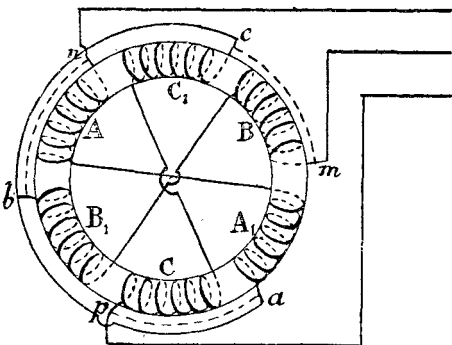


FIG. 304. — Enroulement à bobines multiples.

bobines de phases différentes; ainsi la connexion m est située entre la fin de la bobine c et l'origine de la bobine B .

DISPOSITION DES LAMPES SUR LES CIRCUITS TRIPHASÉS. —

MONTAGE EN TRIANGLE. — Les lampes seront disposées sur les trois fils, comme les bobines de la génératrice, soit en triangle, soit en étoile; en outre on peut combiner le

montage des bobines et des lampes simultanément dans le même système ou dans des systèmes différents.

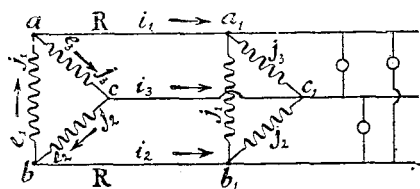


FIG. 305. — Distribution triphasée en triangle.

La figure 305 présente le montage des bobines

et des lampes également en triangle. Les lampes ou circuits récepteurs quelconques, tels que $b_1 a$, $a c_1$, $c_1 b_1$ sont reliés en dérivation sur les conducteurs, deux à deux.

Désignant par i les courants de ligne, par j les courants dans les bobines et dans les circuits récepteurs correspon-

dants, e les forces électro-motrices des bobines ou plutôt les différences de potentiel aux points a, b, c , on a les relations :

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

Et, par analogie, les forces électro-motrices ayant des expressions analogues à celles des courants i :

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0.$$

Cette somme est d'ailleurs la force électro-motrice résultante qui agirait sur le circuit fermé a, c, b, a , et déterminerait la production d'un courant circulaire $(j_1 + j_2 + j_3)$; la force électro-motrice qui doit mettre ce courant en mouvement étant nulle, ledit courant sera lui-même nul et l'on aura :

$$j_1 + j_2 + j_3 = 0.$$

En réalité, ces conditions ne sont remplies que lorsque les forces électro-motrices partielles des diverses bobines se font exactement équilibre dans le circuit fermé; il n'en est pas toujours ainsi. M. Rodet a trouvé en expérimentant l'induit enroulé en triangle d'une machine de 50 kilowatts, qu'il se produisait un courant circulaire dont l'intensité pouvait atteindre sensiblement 20 o/o du courant de travail, dans chaque section.

On trouve, en appliquant les lois de Kirchhoff aux divers circuits de la figure, que le courant dans chacune des sections réceptrices est égal au courant de la bobine génératrice correspondante. On a encore, entre les intensités efficaces des lignes et des sections génératrices ou réceptrices, la relation :

$$I = J \times \sqrt{3}$$

Le circuit $a a_1 b_1 b$ donne :

$$e_1 = R \times i_1 + r \times j_1 - R \times i_2$$

en désignant par r la résistance de la section réceptrice; réduisant et remarquant que

$$i_1 - i_2 = 3 j_1$$

ce qui se déduit facilement de l'application de la première loi de Kirchhoff aux points a et a_1 , il vient :

$$e_1 = 3 R \times j_1 + r \times j_1 = (3 R + r) \times j_1$$

Cette relation est vraie pour les valeurs efficaces, d'où l'on peut écrire :

$$E = (3 R + r) \times J = (3 R + r) \times \frac{I}{\sqrt{3}}$$

enfin :

$$I = \frac{E}{3 R + r} \times \sqrt{3}$$

On tire de cette relation :

$$E = \frac{3 R \times I}{\sqrt{3}} + \frac{r \times I}{\sqrt{3}}$$

Mais le terme $\frac{r \times I}{\sqrt{3}}$ n'est pas autre chose que la différence

de potentiel aux bornes d'une section réceptrice, donc le premier terme est la différence entre la tension totale et celle-ci, c'est-à-dire la perte e sur la ligne, soit :

$$e = \frac{3}{\sqrt{3}} \times R \times I = R \times I \times \sqrt{3}$$

Cette perte e étant donnée, on en déduira la valeur correspondante de R et, par suite, la section de chaque fil de ligne par la relation :

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

La puissance distribuée est :

$$W = 3 E \times J = E \times I \times \sqrt{3}$$

soit w la perte de puissance consentie dans la ligne, on aura :

$$w = R \times (I \times \sqrt{3})^2 = 3 R \times I^2$$

D'où :

$$R = \frac{w}{3 I^2}$$

Un courant alternatif simple de même puissance et de même tension à l'origine, aurait la même intensité $I \times \sqrt{3}$; la perte sur les deux fils de ligne de résistance $2 R_1$ serait :

$$2 R_1 \times I \times \sqrt{3} = R \times I \times \sqrt{3}$$

en égalant cette perte à celle afférente au système triphasé ;
on en déduit :

$$R_1 = \frac{R}{2}$$

Donc, pour une perte égale dans les deux cas, la résistance d'un fil dans le système simple serait la moitié de celle du fil du circuit triphasé et la section du premier serait double de celle du second.

Le volume total du cuivre dans le premier cas serait proportionnel à 4 S, et à 3 S seulement dans le second ; le circuit triphasé donnerait donc une économie d'un quart ou de 25 pour 100 en poids de cuivre.

MONTAGE EN ÉTOILE. — Les trois sections génératrices et chaque groupe de trois bobines ou lampes réceptrices,

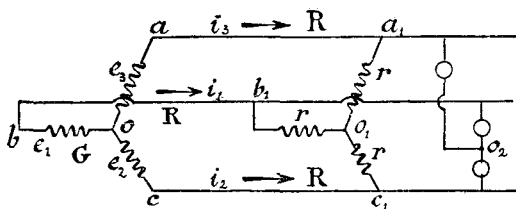


FIG. 306. — Distribution en étoile.

se relie par leurs extrémités libres respectivement à chacun des trois fils de ligne (fig. 306).

Désignons par e_1, e_2, e_3 , les différences de potentiel entre le point commun o des circuits de la génératrice et les bornes correspondantes, a, b, c ; par i_1, i_2, i_3 , les courants dans les fils de ligne. Nous aurons comme précédemment les relations :

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0$$

et :

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

Ici le courant est nécessairement le même dans l'en-

semble formé par un fil de ligne et les deux sections génératrices et réceptrices y aboutissant. Nous avons vu d'autre part que la différence de potentiel entre deux bornes, telles que a et b par exemple, a pour expression :

$$V = E \times \sqrt{3}$$

c'est-à-dire qu'elle s'obtient en multipliant par $\sqrt{3}$ la moyenne efficace de la tension engendrée dans une section génératrice.

Lorsque les trois sections du circuit sont également chargées, les centres des étoiles o et o_1 sont au même potentiel et peuvent être considérés, au point de vue électrique, comme étant confondus ensemble et ne formant qu'un seul et même point. Cela résulte des formules de Kirchhoff, mais on conçoit *a priori* qu'il doit en être ainsi, car si l'on donne au point o le potentiel zéro en mettant ce point à la terre, ce qui ne change rien à la différence de potentiel engendrée dans chaque bobine génératrice, les tensions efficaces en a , b et c seront absorbées également dans les trois circuits de transport et de réception et donneront en o_1 un potentiel nul, c'est-à-dire égal à celui de o .

On peut donc considérer le circuit $o b b_1 o_1$ comme un circuit fermé et écrire d'après la loi de Kirchhoff :

$$e_1 = (R + r) i_1$$

D'où l'on tire en prenant les valeurs efficaces :

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

On en déduit :

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

Le terme $r \times i$ est la tension aux extrémités de la section $b_1 o_1$; la tension aux bornes $b_1 c_1$ sera donc :

$$e = r \times I \times \sqrt{3}$$

De même la tension efficace aux bornes génératrices correspondantes $b c$ sera :

$$V = E \sqrt{3} = R \times I \times \sqrt{3} + r \times I \sqrt{3}$$

La perte de tension sur les lignes de transport est donnée par le premier terme du second membre.

La puissance développée dans les trois sections est :

$$W = 3 E \times I = V \times I \times \sqrt{3}$$

Pour une même puissance distribuée et une même tension initiale V , un courant continu ou un courant alternatif simple comporterait un courant d'intensité $I \times \sqrt{3}$ qui donnerait lieu sur la ligne à double fil de résistance $2 R_1$, à une perte de tension :

$$e_1 = 2 R_1 \times I \times \sqrt{3}$$

Pour une même perte de tension de part et d'autre, on aura :

$$2 R_1 \times I \sqrt{3} = R \times I \sqrt{3}$$

D'où :

$$R_1 = \frac{R}{2}; S_1 = 2 S$$

Le rapport des sections totales dans les deux cas serait donc :

$$\frac{2 S \times 2}{3 S} = \frac{4}{3}$$

D'où résulte, comme dans le cas précédent, une économie de 25 pour 100 de cuivre en faveur de la ligne à courant triphasé.

CIRCUITS DÉCALANT LE COURANT. — Dans le cas où l'inductance des récepteurs produit un décalage du courant, le courant I dans chaque fil de ligne est supérieur au courant I_1 qui produirait la puissance considérée si la tension et l'intensité étaient en concordance de phase, et l'on a :

$$I_1 = I \times \sqrt{1 - K^2}; I = \frac{I_1}{\sqrt{1 - K^2}}$$

La perte de puissance est alors :

$$w = 3 R \times I^2 = 3 R \times \frac{I_1^2}{1 - K^2}$$

La perte dans la ligne sans décalage serait :

$$w_1 = 3 R_1 I_1^2$$

Et à égalité de perte dans les deux cas, on a :

$$3 R_1 I_1^2 = 3 R \frac{I_1^2}{1 - K^2}$$

D'où :

$$R_1 = \frac{R}{1 - K^2} ; R = R_1 \times (1 - K^2)$$

C'est-à-dire que la résistance de la ligne à inductance est plus petite que celle de la ligne sans décalage. Supposons que le *facteur de puissance* $(1 - K^2)$ soit égal à $\frac{1}{2}$, on aura :

$$R = \frac{R_1}{2} ; S = 2 S_1$$

La section des conducteurs devra être deux fois plus grande ; le rapport de comparaison calculé précédemment deviendra donc :

$$\frac{2 S \times 2}{3 S \times 2} = \frac{2 S}{3 S} = \frac{2}{3}$$

Ou inversement, le rapport de la section totale des conducteurs de la ligne triphasée affectée de décalage, à celle de la ligne à courant continu sera $\frac{3}{2}$; c'est-à-dire que le poids de cuivre de la ligne triphasée sera de 50 pour 100 supérieur à celui de la seconde ligne.

On voit que, pour calculer la section des conducteurs de lignes triphasées comportant un facteur de puissance égal à 0,5, il suffit de faire le calcul pour une ligne à courant continu et de donner à chacun des trois fils la section S ainsi établie.

LIGNES INÉGALEMENT CHARGÉES. — Nous avons supposé dans l'étude qui précède que les diverses sections étaient également chargées ; il ne peut en être pratiquement ainsi que dans le cas de moteurs dont les sections sont branchées à la fois sur les trois fils. Quand il s'agit de lampes, au contraire, les diverses sections réceptrices peuvent être inégalement chargées ; il en résulte des tensions différentes aux bornes des diverses sections.

Dans le cas du montage en triangle, si l'on suppose que l'une ou même deux des trois sections sont complètement dépourvues de lampes, ce qui revient à admettre que les circuits récepteurs de ces deux sections ont une résistance infinie, on trouve que, la tension étant maintenue cons-

tante dans la section en charge, la tension dans les autres sections présentera une surélévation de 5 pour 100 environ sur la première.

Dans le montage en étoile, les tensions peuvent différer du simple au double sur les sections chargées et sur celles ne comportant que peu ou point de lampes. Pour rétablir l'équilibre des tensions entre les diverses sections, il faut relier par un quatrième fil le centre de l'étoile génératrice au centre commun des groupes étoilés des lampes. Ce conducteur auxiliaire est alors traversé par un courant qui dépend de la différence de tension aux deux centres, laquelle n'est plus nulle comme dans le cas de charges également réparties sur les trois sections.

Cette différence de potentiel est maximum lorsque l'une des sections réceptrices est complètement dépourvue de lampes, ce qui correspond à une résistance infinie du circuit de cette section; sa valeur est égale, dans ce cas, à la moitié de la différence de tension E à l'origine de ladite section, lorsque d'ailleurs le quatrième fil n'existe pas, et l'on a :

$$U = \frac{1}{2} E$$

La différence de potentiel entre les centres des étoiles génératrices et réceptrices vient modifier notablement les tensions aux bornes des sections receptrices : le fil com-

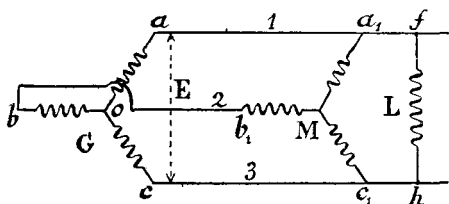


FIG. 307. — Distribution mixte de force motrice et d'éclairage.

pensateur a pour effet de réduire cette différence qui deviendrait nulle pour un conducteur de résistance négligeable.

Quand on distribue à la fois l'éclairage et la force motrice sur les lignes triphasées, ce qui d'ailleurs est le cas général, on peut, les moteurs M

étant toujours branchés nécessairement sur les trois sections, ne relier les lampes *L* qu'à deux conducteurs seulement (fig. 307). Cela permet de régler la tension dans la section d'éclairage, sans qu'il y ait lieu de se préoccuper d'ailleurs des variations de tension sur les autres sections occupées uniquement par les moteurs, peu sensibles à ces différences de tension. Dans ce cas, le courant des lampes se superpose à celui des moteurs dans le fil commun aux deux distributions et les chutes de tension sont notablement différentes sur les diverses sections.

Distributions indirectes. — Transformateurs.

197. **Classification des transformateurs.** — La distribution indirecte répond aux conditions économiques du transport de l'énergie électrique à grande distance. Le problème se pose notamment dans le cas de forces motrices hydrauliques situées dans les montagnes, en des régions généralement éloignées du lieu d'utilisation. Les turbines qui recueillent le travail de la chute d'eau font tourner des dynamos qui transforment ce travail en énergie électrique. On transporte celle-ci, sous la forme de courants à haute tension, par des conducteurs de faible diamètre, jusqu'au centre de distribution. Mais avant de distribuer cette énergie il faudra, par mesure de sécurité et pour les besoins de la pratique, modifier en sens inverse les deux éléments de la puissance, en abaissant la tension et augmentant l'intensité dans la même proportion.

Les câbles de distribution formeront alors un réseau de conducteurs secondaires qui, s'étendant sur un espace de rayon limité, pourront porter le courant sur tous les points d'utilisation sans exiger des sections de cuivre notables et par suite onéreuses.

On pourrait résoudre la même question au moyen d'un transport de forces hydrauliques. Une petite quantité d'eau sous haute pression serait amenée par des tuyaux de faible diamètre jusqu'au centre d'utilisation; en ce lieu,

la force hydraulique ne serait pas distribuée, mais serait employée à actionner des pompes qui emmagasinerait dans des réservoirs une quantité d'eau plus considérable sous une pression moins élevée. Ces pompes joueraient donc le rôle de transformateurs recueillant l'énergie hydraulique à haute pression et restituant une quantité d'énergie de même nature sous forme de force hydraulique à grand débit et à faible pression.

Il faut également des appareils dits *transformateurs* pour inverser les deux facteurs de l'énergie électrique.

Dans le domaine de l'hydraulique, la transformation pourrait se faire par l'intermédiaire d'un réservoir où s'emmagasine pour ainsi dire l'énergie transformée, ou par le moyen de canalisations sous pression pourvues d'accumulateurs. Pour le cas du réservoir, l'utilisation peut être différée et l'énergie emmagasinée n'être mise en œuvre qu'après un temps plus ou moins long ; dans la distribution par accumulateurs, au contraire, l'énergie hydraulique est utilisée instantanément, au fur et à mesure de la transformation.

De là les noms de *transformateurs différés* et *instantanés* qui ont été donnés aux appareils de transformation de l'énergie électrique, lesquels remplissent des fonctions analogues à celles des transformateurs hydrauliques. A la première classe appartiennent les *condensateurs* et les *accumulateurs*, à la seconde les *transformateurs fixes à courants alternatifs* et les *transformateurs mobiles à courants continus* et *alternatifs*.

On peut également classer les transformateurs au point de vue de la nature des courants mis en œuvre, courants continus d'une part, courants alternatifs d'autre part.

Bien que, pour suivre l'ordre généralement adopté, nous dussions aborder en premier lieu l'étude des transformateurs à courants continus, nous commencerons par celle des appareils à courants alternatifs qui forme le complément naturel de l'exposition développée ci-dessus, touchant les distributions directes par courants alternatifs et polyphasés.

198. **Transformateurs à courants alternatifs.** — Ces appareils sont basés sur le phénomène d'*induction mutuelle* de deux solénoïdes dont l'un, traversé par un *courant excitateur variable*, produit un flux magnétique de même nature qui traverse en tout ou en partie les spires du second solénoïde. Ce flux variable engendre à son tour, dans cette dernière bobine, une force électromotrice dite de *mutuelle induction*.

La bobine inductrice qui reçoit le courant excitateur ou *courant primaire* d'une source d'énergie extérieure s'appelle aussi *bobine primaire*; la bobine induite est la *bobine secondaire*; elle produit elle-même un courant dit *secondaire* lorsque son circuit est fermé.

Puisque l'énergie secondaire est due à la variation du flux de force qui traverse la bobine où se développe cette énergie, il faut faire pénétrer dans cette bobine le flux le plus grand possible et, pour cela, canaliser les lignes de force dans un circuit magnétique sur lequel seront enroulés les deux solénoïdes. Il s'ensuit donc que le système constituant un transformateur présentera en définitive trois circuits, dont deux électriques, la bobine inductrice et la bobine induite et un magnétique formé par la carcasse en fer de l'appareil.

On comprendra maintenant comment une pareille combinaison de circuits réalise les fonctions d'un transformateur, si l'on se reporte à la théorie générale de l'induction et à l'expression de la valeur du coefficient d'induction mutuelle (tome I, § 102). Celui-ci représente par définition le flux de force qui traverse la bobine secondaire et qui prend naissance dans la bobine primaire, pour un courant excitateur égal à l'unité. Ce coefficient, et par suite ce flux est, comme on sait, proportionnel au nombre des spires primaires et secondaires; il en est de même du flux total qui s'obtient en multipliant le coefficient par le courant excitateur, et enfin de la variation du flux par seconde, égale au flux total divisé par le temps de la période correspondante.

Or, la force électromotrice d'induction développée

dans la bobine secondaire est égale à la variation du flux par seconde, elle dépend donc directement aussi du nombre des spires primaires et secondaires.

Supposons maintenant que la différence de potentiel agissant aux bornes de la bobine primaire soit de 1000 volts, par exemple, et que le nombre de spires de la bobine secondaire étant de 300, il se développe dans cette bobine une force électro-motrice d'induction de 500 volts. Maintenant, sans toucher à la bobine primaire et conservant la même tension agissante, réduisons le nombre des spires secondaires à 30, il est évident que la tension secondaire sera également réduite au dixième de sa valeur primitive, c'est-à-dire à 50 volts.

Nous verrons plus loin quel doit être le rapport entre les nombres des spires primaires et secondaires, mais ce simple raisonnement nous montre la possibilité de passer d'une tension primaire déterminée de 1000 volts, par exemple, à une autre aussi réduite que l'on veut et présentant avec la première un rapport donné tel que celui de 1000 à 50 ou de $\frac{1}{20}$.

En réalité, les phénomènes qui se produisent dans un transformateur sont beaucoup plus complexes ; il faut considérer, en effet, outre l'induction de la première bobine sur la seconde, l'induction de chacune des bobines sur elle-même, c'est-à-dire la self-induction des deux circuits.

Il est évident que le flux issu de la bobine primaire traverse nécessairement celle-ci, engendre dans son circuit une force électro-motrice d'induction analogue à celle qu'il développe dans la bobine secondaire qu'il peut même ne traverser qu'en partie.

Si le circuit secondaire est ouvert, celui-ci n'est parcouru par aucun courant et le flux ne dépend que du courant de la bobine primaire, qui d'ailleurs est réduit dans une certaine mesure par la self-induction de cette bobine. Mais si l'on ferme le circuit secondaire, celui-ci sera traversé par un courant qui produira lui-même un flux antagoniste du premier.

Ainsi, quand le transformateur est *en charge*, c'est-à-dire lorsque le circuit secondaire débite du courant pour l'utilisation, le flux magnétique effectif est la résultante de deux flux composants, l'un dû à la bobine primaire affaiblie déjà par la self-induction de ce circuit, l'autre dû à la bobine secondaire. Ces deux flux composants étant antagonistes, il s'ensuit que leur résultante est plus faible que dans le cas de la marche à vide, c'est-à-dire le circuit secondaire étant ouvert.

En vertu du principe universel de la conservation de l'énergie, la puissance électrique dépensée dans le circuit inducteur se retrouve, après transformation, aux bornes de la bobine secondaire. On ne la recueille pas toutefois en totalité, car une partie est absorbée par les résistances ohmiques des deux bobines, suivant la loi de Joule, d'une part, et par le travail d'aimantation ou d'hystérésis et les courants de Foucault dans le noyau magnétique, d'autre part.

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT A VIDE. — On remarquera que lorsque le transformateur fonctionne à vide, l'énergie que reçoit le circuit primaire est consacrée uniquement à créer l'aimantation du noyau et se dépense exclusivement dans les travaux d'hystérésis et ceux consommés par la résistance ohmique du seul circuit primaire et enfin par les courants de Foucault ; la source d'électricité n'a pas, en effet, à fournir dans ce cas d'énergie disponible aux bornes du circuit secondaire. Dans la marche à vide, il n'y a donc aucune utilisation de l'énergie dépensée et le rendement est nul.

Il faut entendre évidemment que la bobine primaire reste toujours en circuit, même pendant la marche à vide ; on ne peut, en effet, pratiquement s'assujettir à interrompre le circuit primaire pour le fermer au moment de l'utilisation ; d'ailleurs, la rupture d'un courant à haute tension ne se fait pas sans difficulté et sans exposer l'opérateur à quelque danger.

Il convient donc, pour diminuer la dépense d'énergie à vide qui est faite en pure perte, de réduire autant que

possible l'intensité du courant dans ce cas. Cette intensité est d'ailleurs limitée par la self-induction de la bobine qui augmente avec le flux toujours plus considérable à vide, comme nous l'avons vu ci-dessus.

La puissance développée dans le circuit primaire a pour expression :

$$W = E \times I \times \sqrt{1 - k^2} = E \times I \times K_1$$

en désignant par E la différence de potentiel agissant aux bornes primaires et provenant de l'usine génératrice. L'intensité I est minimum pour la marche à vide.

On sait que le courant I , décalé d'un angle φ par rapport à la force électro-motrice, doit être considéré comme la

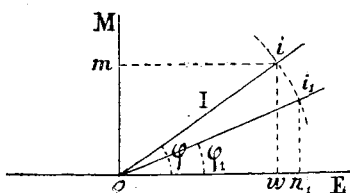


FIG. 308. — Décomposition du courant primaire en deux courants composants.

résultante des deux courants ow et om obtenus en projetant le courant total $oi = I$ sur les axes rectangulaires oE et oM (fig. 308).

Le courant $ow = I \times K_1$ qui est la projection du courant total sur la direction de la force électromotrice E ,

est celui qui figure dans l'expression de la puissance, et qui, par suite, fournit le travail réel du courant; la composante om est le *courant déwatté*, qui produit sans dépense de travail l'aimantation du noyau, le travail d'aimantation étant restitué à chaque cycle pendant la période de désaimantation, abstraction faite de l'énergie absorbée par l'hystérésis. Cette énergie est comprise dans la valeur de W , ainsi que celle correspondant à la résistance du circuit primaire et aux courants de Foucault.

Avec un fer dépourvu complètement de force coercitive et par suite d'hystérésis, un circuit primaire de résistance nulle et l'absence complète de courants parasites dans la masse de la carcasse magnétique, l'énergie absorbée dans la marche à vide serait nulle et l'intensité ow se

réduirait à zéro. L'intensité totale oi se confondrait donc avec om et serait entièrement employée à produire l'aimantation, sans dépense de travail.

On voit ainsi qu'avec un transformateur idéal remplissant les conditions ci-dessus, le courant à vide présenterait un décalage de 90 degrés sur la différence de potentiel agissant aux bornes du circuit primaire; si donc l'angle φ est toujours inférieur en pratique au quart de la circonférence, cela tient aux pertes de travail produites par des causes comparables aux résistances passives dans le fonctionnement des appareils mécaniques. Plus ces résistances seront grandes par rapport à l'intensité d'aimantation du noyau, plus l'intensité totale oi s'inclinera sur la direction de E , en oi_1 par exemple, de manière à augmenter la valeur de sa projection ow_1 correspondant au travail réel absorbé.

Pour fixer les idées par un exemple numérique, supposons que le courant absorbé par les pertes dans le fonctionnement à vide soit de 2 ampères et le courant d'aimantation de 3 ampères, le courant à pleine charge étant de 100 ampères par exemple; cette proportion de 2 et 3 pour 100 du courant total correspond d'ailleurs aux conditions d'un transformateur de puissance moyenne. On aura donc :

$$ow = 2; om = 3;$$

le triangle rectangle oiw donne :

$$oi = \sqrt{2^2 + 3^2} = 3,66 \text{ ampères.}$$

Ainsi l'alternateur de l'usine génératrice devra débiter effectivement un courant de 3,66 ampères, tandis que la composante de travail dirigée suivant E ne sera que de 2 ampères. On voit donc que la puissance absorbée à vide est moins élevée que celle qui correspond au débit total du courant de 3,66 ampères, mais la génératrice n'en doit pas moins fournir le courant tout entier et s'en trouve surchargée d'autant.

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT EN CHARGE.— Pour se rendre compte des diverses particularités du fonctionnement

d'un transformateur, il ne faut pas perdre de vue le but et les résultats poursuivis dans l'emploi de ces appareils.

En nous plaçant dans le cas le plus usuel, nous admettrons d'abord que le système de distribution mis en œuvre étant celui à potentiel constant, on maintient aux bornes de la bobine primaire une tension invariable, en principe du moins. Cette tension est déterminée d'avance, suivant les nécessités économiques du transport; elle sera de 2000 volts par exemple. Supposons que la tension doive être réduite au vingtième dans le circuit secondaire, il conviendra que la différence de potentiel aux bornes de la bobine correspondante soit par conséquent maintenue à 100 volts.

D'autre part, l'induction, c'est-à-dire le nombre de lignes de force par centimètre carré de section dans le fer, ne doit pas être quelconque; on s'impose une densité de flux déterminée, soit 10.000 unités, l'induction devant rester comprise entre ce chiffre considéré comme un maximum et 5 à 6000 unités. Une induction trop élevée en effet augmenterait les pertes consommées par l'hystérésis et réduirait en conséquence le rendement du transformateur.

Les forces électro-motrices efficaces, primaire et secondaire, l'intensité efficace secondaire à pleine charge et l'induction magnétique du noyau de fer, sont les données qui déterminent les conditions de fonctionnement général du transformateur; on en déduit immédiatement la puissance utile ou puissance secondaire maximum, qui est égale au produit de la différence de potentiel par le courant de pleine charge aux bornes de la bobine correspondante.

Nous avons donc à montrer comment, dans les conditions précitées, les diverses quantités magnétiques et électriques variables se modifient automatiquement dans le transformateur, pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil à toutes les charges, et maintenir la tension constante aux bornes du courant secondaire, dans le cas de la distribution à potentiel constant.

Dans cette étude il ne faut pas perdre de vue ce que

nous savons déjà sur le fonctionnement à vide. Le courant fait alors un angle φ avec la différence de potentiel agissant aux bornes, par suite de la self-induction de la bobine primaire, qui est constituée d'un grand nombre de spires de fil fin. Le flux magnétique est dû uniquement à l'excitation du courant primaire, le secondaire étant nul, et il est proportionnel à $n_1 \times i_1$, en désignant par n_1 le nombre des spires de la bobine correspondante.

Enfin le courant magnétisant, qui est l'une des composantes du courant total à vide, est perpendiculaire sur la différence de potentiel aux bornes, dans l'hypothèse implicitement admise où la perte due à la résistance ohmique de la bobine serait négligeable, vu la faible intensité du courant à vide.

Dès que le circuit secondaire est fermé, il s'y établit un courant qui, par suite du petit nombre des spires de la bobine à gros fil, peut être considéré comme étant en concordance de phase avec la force électro-motrice d'induction développée dans ce circuit. Le courant secondaire produit lui-même un nouveau flux antagoniste du premier et le flux effectif est par suite la résultante des deux flux primaire et secondaire.

Reprenons la figure précédente en la faisant tourner de 90 degrés pour la rendre plus claire et soient oi , et oM le courant total à vide et la composante déwattée magnétisante (fig. 309).

Représentons à une échelle quelconque, par une longueur oa portée sur oi , les ampères-tours d'excitation $n_1 \times i$ de la marche à vide. La force électro-motrice d'induction secondaire due aux variations du flux dirigé suivant le courant magnétisant oM est en retard de 90 degrés sur ce flux, puisque d'après les lois de l'induction la force électro-motrice est nulle quand l'induction est

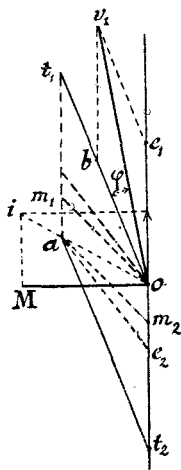


FIG. 309. — Représentation graphique du fonctionnement du transformateur.

maximum, et inversement. Cette force électro-motrice sera donc dirigée suivant oe_2 ; il en sera de même de l'intensité i_2 et de l'excitation $n_2 i_2$ relative à ce circuit, que nous porterons en ot_2 .

L'induction devant rester constante, les deux excitations $n_2 i_2$ et $n_1 i_1$ doivent avoir pour résultante l'excitation primitive oa ; si donc joignant a à t_2 je termine ensuite le parallélogramme $ot_1 a t_2$, la ligne ot_1 donnera en grandeur et en direction l'excitation $n_1 i_1$ et, par suite, le courant primaire i_1 lui-même.

Ce courant donne lieu à une chute de tension $r_1 \times i_1$ dans la résistance r_1 de la bobine primaire, soit ob cette tension perdue. La différence de potentiel établie aux bornes du circuit primaire se dépense donc en partie suivant ob , pour vaincre la résistance du circuit, en même temps qu'elle doit faire équilibre à la force électro-motrice de self-induction. Celle-ci doit être dirigée perpendiculairement à oM , comme la force électro-motrice secondaire induite par le même flux.

La chute ou différence de potentiel ob est la force électro-motrice effective qui lance le courant à travers la résistance ohmique du circuit. La différence de potentiel agissante V_1 aux bornes, sera donc la résultante de la force électro-motrice effective et de la force électro-motrice de self-induction e_1 représentée par oe_1 et l'on obtiendra $or_1 = V_1$ en construisant sur ob et oe_1 le parallélogramme des forces $ob r_1 e_1$.

En résumé on trouve, par cette construction graphique due à Gisbert Kapp, que l'on doit appliquer une tension or_1 aux bornes de la bobine primaire pour que la bobine secondaire soit capable de débiter un courant i_2 sous la tension oe_2 . L'angle φ de décalage du courant primaire par rapport à la différence de potentiel aux bornes est notablement réduit, par suite de l'inclinaison plus grande du vecteur ot_1 sur la verticale et de l'inclinaison en sens inverse de or_1 qui n'est plus perpendiculairement à oM par suite de l'influence de la perte ohmique ob dont il a été tenu compte dans ce diagramme.

Pratiquement, dans les transformateurs à circuit magnétique fermé, présentant une faible réluctance, le vecteur or_1 se confond presque avec la direction verticale oe_1 ; il en est de même du vecteur ot_1 et par suite du courant i_1 qui tend d'autant plus à se rapprocher de la verticale que le courant à vide et la quantité proportionnelle oa est toujours très petite, ne représentant que quelques centièmes du courant normal.

On peut donc admettre que la différence de potentiel agissante $or_1 = V_1$, le courant i_1 et la force électro-motrice de self-induction oe_1 sont dirigés suivant la même verticale et opposés directement au courant secondaire i_2 .

On se rend ainsi compte du mécanisme physique du transformateur. A vide, le courant faible est dirigé suivant oi et les ampères-tours d'excitation provenant uniquement du courant primaire sont représentés par oa .

Une légère charge dans le secondaire donne lieu à une excitation om_2 par exemple de ce circuit; il en résulte immédiatement une excitation nouvelle om_1 du primaire correspondant à un courant plus intense i_1 que le courant à vide. Ce courant i_1 doit satisfaire, en effet, à l'aimantation du noyau, donnée primitivement par oM , aux diverses pertes et à l'énergie disponible sur le circuit secondaire d'utilisation.

On voit donc qu'au fur et à mesure que le courant de charge augmente sur le secondaire, il se développe un courant croissant dans le primaire, tel qu'il puisse satisfaire à l'augmentation progressive de la charge.

Il faut encore remarquer que dans la marche à vide, la perte de tension dans la résistance ohmique étant négligeable, la différence de potentiel agissant aux bornes V n'a plus à équilibrer que la force électro-motrice antagoniste de self-induction E_1 qui lui est alors à très peu près égale; de telle sorte que ces deux tensions pouvant être considérées comme directement opposées, la composante wattée du courant à vide $i \times K_1$ est donnée par la relation :

$$i \times K_1 = \frac{E - E_1}{r}$$

d'où le courant total à vide :

$$i = \frac{E - E_1}{r_1 \times K_1}$$

est produit par la différence de tension très petite $E - E_1$ qui s'approche d'autant plus de zéro que la valeur de E_1 est plus voisine de celle de E .

Ainsi lorsque le circuit secondaire est ouvert et n'intervient pas, en conséquence, dans le fonctionnement du transformateur, le circuit primaire joue uniquement le rôle de bobine de self ou d'impédance pour réduire la tension et limiter l'intensité du courant primaire à la valeur correspondant à l'induction admise.

Lorsque le circuit secondaire est fermé et débite un certain courant d'utilisation, celui-ci tend à développer dans le noyau un champ magnétique opposé au champ principal du circuit primaire; le champ résultant se trouve donc affaibli, ce qui tend à réduire la force électromotrice antagoniste de self-induction dans le circuit primaire; la différence de tension $E - E_1$ génératrice du courant primaire augmente et détermine un accroissement correspondant de ce courant; le champ magnétisant résultant se trouve par suite relevé à sa valeur normale.

Il résulte du jeu pour ainsi dire automatique des diverses quantités électrique et magnétique, qu'il s'établit pour chaque régime de charge une sorte d'équilibre entre les effets antagonistes qui se développent dans les deux circuits. A un accroissement du courant de charge secondaire correspond une augmentation convenable du courant primaire; la réduction de flux produite par le champ antagoniste secondaire est compensée par l'augmentation des ampères-tours du champ principal primaire; enfin le champ résultant étant maintenu invariable à toute charge, doit toujours développer dans les deux bobines des forces électromotrices E_1 et E_2 constantes.

En réalité cette constance n'est pas aussi parfaite qu'il semblerait résulter de cet exposé, car nous n'avons pas tenu compte des chutes de tension dans les enroulements

primaire et secondaire que nous avons considérées comme négligeables; de la décroissance progressive de la perméabilité du noyau qui tend à réduire l'accroissement du flux, lequel ne reste plus proportionnel à l'augmentation de l'excitation; enfin du phénomène de *dispersion magnétique* dont nous parlerons tout à l'heure.

Ne quittons pas la figure 309, sans remarquer que le vecteur de l'excitation et du courant secondaire allant en s'allongeant progressivement de zéro à $o t_2$ sur la verticale, le vecteur de l'excitation et du courant primaire $o t_1$ s'allonge à mesure, en tournant de gauche à droite depuis la position d'origine $o i$ correspondant à la marche à vide, jusqu'à la position verticale $o e_1$ qu'il peut atteindre théoriquement à la limite. Le vecteur $o t_1$ se relève ainsi comme pour se mettre en opposition plus directe avec le courant i_2 dirigé suivant $o t_2$, au fur et à mesure que l'intensité de celui-ci augmente. La construction graphique indique ainsi, par une véritable représentation mécanique, le fonctionnement physique du transformateur.

FORMULES APPLICABLES AU TRANSFORMATEUR. — En vertu de la loi de la conservation de l'énergie, on retrouverait aux bornes du circuit secondaire, pour l'utilisation, toute l'énergie fournie à la bobine primaire par la source d'électricité; on aurait alors la relation :

$$V_2 \times I_2 = V \times I_1$$

dans laquelle V_2 est la différence de potentiel disponible aux bornes du secondaire, et V celle agissant aux bornes du primaire. Soit maintenant E_1 la fraction de V qui fait équilibre à la force électro-motrice de self-induction et qui est, par suite, utilisée pour la transformation; $r_1 \times I_1$ la seconde partie de V qui est absorbée par la résistance ohmique de la bobine; E_2 la force électro-motrice induite dans la bobine secondaire et $r_2 \times I_2$ la chute de tension dans la résistance r_2 ; on aura évidemment :

$$V = E_1 + r_1 \times I_1$$

$$V_2 = E_2 - r_2 \times I_2$$

relations qui supposent d'ailleurs que les courants ont même phase que les forces électro-motrices correspondantes.

Il résulte de ces relations que la puissance réellement transmise par le primaire est seulement $E_1 \times I_1$ et l'on peut poser alors plus exactement l'égalité des puissances :

$$E_2 \times I_2 = E_1 \times I_1$$

Ce qui peut encore s'écrire :

$$I_1 = \frac{E_2}{E_1} \times I_2$$

Cette égalité que l'on peut admettre pour la pratique courante n'est encore vraie qu'abstraction faite des pertes occasionnées par l'hystérésis et les courants de Foucault dont nous n'avons pas fait état.

Le flux d'induction effectif développé dans le noyau de fer, induit dans les bobines primaire et secondaire des forces électro-motrices E_1 et E_2 qui sont respectivement proportionnelles au nombre de spires n_1 et n_2 de chaque bobine; d'où la relation :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Ce qui peut s'énoncer en disant que le rapport des forces électro-motrices induites, primaire et secondaire, est égal à celui du nombre des spires des bobines correspondantes. Ce rapport commun est ce qu'on appelle le *rapport de transformation* de l'appareil. On peut encore écrire cette relation sous la forme :

$$E_1 = \frac{n_1}{n_2} \times E_2$$

Dans le cas de la charge normale, nous avons vu que l'on peut considérer les intensités primaire et secondaire, comme directement opposées ou différant d'une demi-phase, et en même temps les trois quantités primaires, intensité, différence de potentiel agissant aux bornes et force électro-motrice de self, comme étant sensiblement en concordance de phases; on peut donc écrire dans ce cas :

$$V = r_1 \times I_1 + E_1$$

mais on a d'après les relations précédentes :

$$I_1 = \frac{E_2}{E_1} \times I_2 = \frac{n_2}{n_1} \times I_2$$

Remplaçant I_1 et E_1 par leurs valeurs en fonction de I_1 et E_2 dans l'expression de V , il vient :

$$V = r_1 \times \frac{n_2}{n_1} \times I_2 + \frac{n_1}{n_2} \times E_2$$

et comme encore :

$$E_2 = r_2 \times I_2$$

cette expression devient :

$$V = r_1 \times \frac{n_2}{n_1} \times I_2 + \frac{n_1}{n_2} \times r_2 \times I_2$$

D'où l'on tire aisément, en mettant I_2 en facteur commun :

$$I_2 = \frac{V}{r_1 \times \frac{n_2}{n_1} + r_2 \times \frac{n_1}{n_2}}$$

Mais comme le rapport $\frac{n_2}{n_1}$ est très petit vis-à-vis du rapport inverse $\frac{n_1}{n_2}$, le premier terme du dénominateur est négligeable à côté du second terme et la relation se réduit à :

$$I_2 = \frac{V}{r_2 \times \frac{n_1}{n_2}} = \frac{V \times \frac{n_2}{n_1}}{r_2}$$

en multipliant haut et bas par le facteur $\frac{n_2}{n_1}$.

On peut encore écrire cette relation sous la forme :

$$I_2 \times r_2 \text{ ou } E_2 = V \times \frac{n_2}{n_1}$$

et encore :

$$\frac{E_2}{V} = \frac{n_2}{n_1}$$

C'est-à-dire que le rapport de la force électro-motrice secondaire à la différence de potentiel agissant aux bornes primaires, est égal au rapport de transformation. Cette relation n'est évidemment qu'approximative, puisqu'elle suppose que $V = E_1$ et que, par suite, la composante due à la chute de tension $r_1 \times I_1$ est négligeable.

L'expression ci-dessus de E_2 montre que, si la différence de potentiel est maintenue constante aux bornes primaires, la

force électro-motrice secondaire E_2 le sera également. On a d'autre part la relation donnée plus haut :

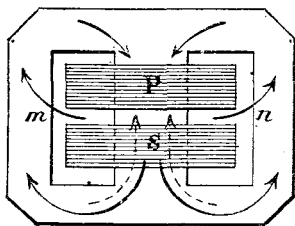
$$V_2 = E_2 - r_2 \times I_2$$

et comme le terme $r_2 \times I_2$ est toujours très petit et peut être négligé, il s'ensuit que E_2 étant maintenu constant, il en sera de même de V_2 qui est la différence de potentiel aux bornes du circuit secondaire.

Ainsi pour maintenir invariable la différence de potentiel aux bornes du circuit d'utilisation, il suffira pratiquement d'appliquer aux bornes du circuit primaire une différence de potentiel constante.

DISPERSION MAGNÉTIQUE. — Nous avons supposé dans tout ce qui précède que les spires des bobines primaire et secondaire étaient traversées par le même nombre de lignes de force et que, par suite, l'induction dans les deux circuits était produite par le même flux.

Il n'y a aucune raison pour qu'il n'en soit pas ainsi pendant la marche à vide, mais la situation est modifiée



dès que le circuit secondaire est en charge. A ce moment, en effet, au flux principal produit par le courant primaire vient se superposer, mais en sens inverse, le flux antagoniste créé par le courant secondaire.

Dans la figure 310 les deux bobines primaire et secondaire sont enroulées l'une au-dessus de l'autre, sur la branche moyenne de la carcasse magnétique. Les flèches pointillées indiquent le sens du champ antagoniste que la bobine S tend à créer dans le noyau de fer. Ce flux n'existe qu'à l'état latent pour ainsi dire ; car on n'observe évidemment qu'un seul champ suivant la direction des flèches pleines qui est celle du flux créé par la bobine primaire dont l'action magnétique est prédominante.

Quoi qu'il en soit, ce flux antagoniste refoule en partie les lignes de force dans les intervalles $m n$ laissés libres pour l'isolation entre les deux bobines, et le flux de force qui traverse le circuit S n'est plus que la différence entre le flux total résultant venant de P et le flux dispersé latéralement en m et n .

L'induction dans la bobine secondaire sera donc moindre et la force électro-motrice induite sera d'autant plus diminuée que le courant de charge sera plus grand ; si donc on maintient constante la différence de potentiel agissant aux bornes primaires, il se produira une baisse de tension progressive, depuis la marche à vide jusqu'à la charge maximum, dans le secondaire. Par suite, pour avoir aux bornes de celui-ci une différence de potentiel constante, il faudra faire varier en plus ou en moins, dans une mesure convenable, la tension agissant aux bornes primaires.

CAS DE RÉCEPTEURS POURVUS D'INDUCTANCE. — Il arrive fréquemment qu'un circuit contient simultanément des moteurs ou des lampes à arc qui développent, comme on sait, une force électro-motrice antagoniste de self-induction dans le circuit d'utilisation. Le courant présente alors un certain retard de phase sur la force électro-motrice secondaire.

Dans le cas où il existe simultanément des récepteurs inductifs et sans inductance, tels que des lampes à arc et des lampes à incandescence, le courant des lampes à arc est seul décalé. Le courant total, mesuré avant la bifurcation, est la résultante des deux courants partiels décalés l'un par rapport à l'autre et sa valeur est inférieure à la somme des courants composants ; de plus, son décalage par rapport à la tension est moindre que celui du courant partiel des lampes à arc.

Ce décalage des appareils récepteurs à inductance, provoque une nouvelle chute de tension dans le circuit secondaire. Si les appareils récepteurs sont pourvus de capacité au lieu de self-induction, le courant secondaire est en avance sur la tension. Dans un circuit mixte d'appareils doués de capacitance et d'inductance, le courant avance

ou retarde suivant que la première ou la seconde de ces quantités est prédominante.

L'influence de ce décalage se traduit par des chutes de tension dans le cas où la self-induction prédomine ; la tension augmente au contraire lorsque c'est la capacité qui l'emporte sur l'inductance, et elle dépasse même la tension de la marche à vide, à partir d'une certaine valeur de l'angle de décalage.

En résumé, les chutes de tension aux bornes du circuit secondaire sont dues à deux causes générales : 1° la résistance ohmique des deux bobines primaire et secondaire ; 2° la dispersion magnétique. Il faut y ajouter, comme nous venons de le voir, l'influence du décalage produit par les récepteurs pourvus d'inductance.

On peut compter que la chute de tension à pleine charge varie d'environ 3 pour 100 pour les petits transformateurs à 1,5 pour 100 pour les appareils de grande puissance, soit une moyenne de 2 pour 100. La dispersion magnétique augmente notablement la chute totale, qui peut atteindre aisément 5 et 6 pour 100, et ce chiffre s'élève encore jusqu'au double et même au delà, sur des circuits alimentant des récepteurs à inductance.

199. Transformateurs pour courants polyphasés.— La transformation des courants polyphasés consiste, en principe, à obtenir dans un circuit secondaire un courant de même ordre, généralement di ou triphasé et de tension différente soit supérieure, soit inférieure à celle du courant polyphasé primaire. Pour obtenir ce résultat, il suffirait évidemment de transformer séparément chacun des courants composants dans autant d'appareils à courants alternatifs ordinaires ; on aurait ainsi des groupes de deux transformateurs pour les courants biphasés et de trois appareils pour les triphasés.

Cette disposition, qui peut être commode et avantageuse lorsqu'il s'agit de transformer de grandes puissances, serait onéreuse et d'une installation compliquée pour des puissances de quelques kilowatts. Il est d'ailleurs logique de réunir dans une même carcasse magnétique les divers flux

engendrés par chacun des courants composants, de même que l'on réunit par des connexions communes les divers circuits électriques du courant polyphasé.

On peut considérer, en effet, que les deux sections du courant diphasé sont réunies par leurs fils de retour confondus en un fil commun ; quant aux sections du circuit triphasé, elles sont reliées entre elles soit en un point unique dans le système en étoile, soit en trois points, deux à deux, dans la disposition triangulaire.

On supprime ainsi un fil sur quatre d'une part, trois fils sur six d'autre part. Un transformateur unique diphasé ou triphasé permettra de réaliser sur le circuit de fer une économie correspondant à celle que l'on fait sur le cuivre dans les circuits électriques.

TRANSFORMATEURS DIPHASÉS. — Un transformateur diphasé sera constitué par une carcasse magnétique de tôles estampées,

formant un cadre à trois branches (fig. 311) ; les bobines primaire et secondaire de la première section seront enroulées sur la branche A ; celles de la seconde section dont la phase diffère de 90° par rapport au premier groupe, sur la branche C.

Les flux engendrés dans chacun des noyaux A et C présenteront les mêmes variations d'intensité

et les mêmes différences de phases l'un par rapport à l'autre que les courants primaires générateurs ; les circuits magnétiques se fermeront par les culasses P et Q et la branche commune B.

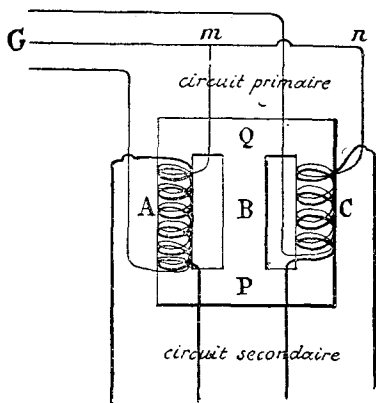


FIG. 311. — Transformateur diphasé.

Cette branche joue évidemment dans la carcasse de fer le même rôle que le fil commun $m n$ dans le circuit électrique. Or, nous savons que le courant résultant J qui traverse ce fil, égale 1,41 fois l'intensité de l'un quelconque des courants composants; par conséquent, le flux dans le noyau B s'obtiendra également en multipliant par $\sqrt{2}$ ou 1,41 le flux de chacun des noyaux A et C . Il en résulte que si l'on veut conserver la même induction ou une densité égale du flux dans le tronc commun, il faudra donner à celui-ci une section $\sqrt{2}$ fois plus grande que celle des noyaux des bobines.

Quand l'induit de la dynamo génératrice porte un enroulement continu, disposé suivant le système triangulaire, on ne peut supprimer le

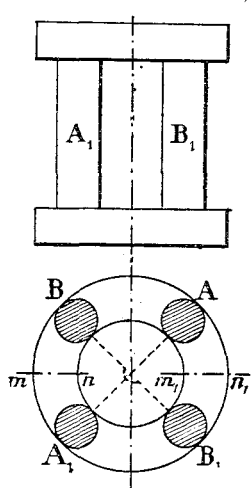


FIG. 312. — Transformateur diphasé à quatre noyaux.

quatrième fil de ligne, car si dans la figure 296 on reliait les deux fils q et m , correspondant à deux phases différentes, en un tronçon commun, on mettrait la section k de la génératrice en court circuit. On peut toutefois conserver la ligne de transport à trois fils, même dans le cas dont il s'agit, en interposant un transformateur au départ, entre la génératrice et la ligne. On relie alors les extrémités des bobines primaires respectivement aux quatre points de l'enroulement induit correspondant aux différences de phases d'une demi-période, tandis que les bobines secondaires peuvent être connectées sans inconvénient sur le circuit de transport réduit à trois fils.

On peut encore employer la disposition de la figure 312 dans laquelle la carcasse magnétique est formée de quatre noyaux, réunis en haut et en bas par deux culasses circu-

lares. Les groupes de noyaux diamétralement opposés A, A_1 et B, B_1 portent respectivement les deux moitiés des enroulements primaire et secondaire de chacune des sections diphasées. Il ne se produit alors dans chaque colonne que la moitié du flux total $\frac{N}{2}$, et le flux résultant qui traverse une section quelconque mn de la culasse est égal à $\frac{N}{2} \times \sqrt{2} = 0,705 N$.

TRANSFORMATEURS TRIPHASÉS. — La carcasse se compose de trois noyaux reliés par des culasses circulaires à la base et au sommet; chacun des noyaux porte la bobine primaire et la bobine secondaire d'une section (fig. 313). Les bobines de chaque circuit peuvent être montées en même temps dans le système en étoile ou dans le système en triangle, ou bien le primaire en étoile et le secondaire en triangle et inversement.

Les flux se propagent et se combinent dans les circuits magnétiques, comme les courants dans les circuits électriques. Les phases des divers flux dans les trois noyaux diffèrent entre elles d'un tiers de période. Comme pour les courants, la somme des flux est constamment nulle et chacun des noyaux sert de circuit de retour aux flux magnétiques produits par les deux autres noyaux.

On peut comparer les trois colonnes de la carcasse magnétique aux fils de ligne et les segments m, m_1, m_2 de la culasse aux sections en triangle de la génératrice; dans le circuit électrique, le courant de ligne est, comme nous l'avons vu :

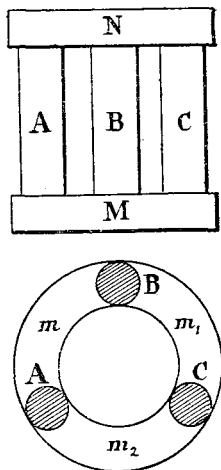


FIG. 313. — Transformateur triphasé.

$$I = J \times \sqrt{3};$$

inversement, le courant J d'une section du triangle est égale à $\frac{I}{\sqrt{3}}$; on trouvera donc, par analogie, que le flux maximum ou efficace M dans les segments de la culasse est, en désignant par N le flux de même ordre engendré dans chaque noyau :

$$M = \frac{N}{\sqrt{3}} = 0.577 N.$$

Il faudra donc, pour conserver la même densité de flux dans les culasses, que la section transversale s des couronnes et celle S des noyaux, soient dans le rapport des flux précités et que l'on ait :

$$s = 0.577 S.$$

Le schéma de la figure 314 montre la disposition d'ensemble des bobines primaires et secondaires du transformateur montées en étoile. Il faut assimiler les bobines primaires à des sections réceptrices et les secondaires à des

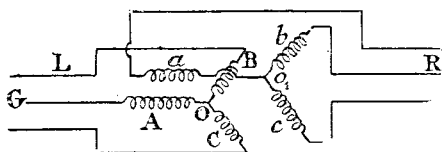


FIG. 314. — Connexions des bobines primaires et secondaires, en étoile.

sections génératrices qui alimentent le circuit d'utilisation.

Lorsque la tension primaire ne dépasse pas 5000 volts,

la dynamo génératrice produit directement le courant à cette tension, il suffit alors d'une seule transformation, et celle-ci est effectuée à l'aide d'un transformateur réducteur de tension, établi à l'extrémité de la ligne de transport, sur le lieu d'utilisation.

Mais on utilise aujourd'hui couramment des tensions de 10 et 15.000 volts et l'on a même abordé les tensions de 20 et 30.000 volts; dans ces conditions, on ne peut prati-

quement réaliser des dynamos capables d'engendrer des courants à un tel voltage et l'on doit recourir aux transformateurs éleveurs de tension. L'ensemble de la distribution comprend alors une double transformation; un premier transformateur, établi dans l'usine génératrice même, élève la tension du courant engendré par les dynamos, à 10.000 volts par exemple; ce courant, à l'extrémité de la ligne de transport, traverse un second transformateur réducteur qui ramène la tension à 100 volts, si cette valeur est admise pour le courant d'utilisation.

L'ensemble de la double transformation est représenté dans le schéma de la figure 315, où G représente la géné-

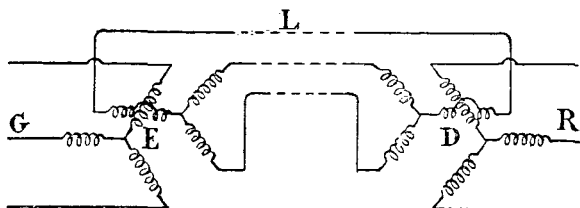


FIG. 315. — Double transformation.

ratrice, E le *transformateur élévateur*, L la ligne de transport, D le *transformateur réducteur*, R les récepteurs, lampes ou moteurs.

Les fameuses expériences de transport d'énergie électrique de Lauffen à l'Exposition de Francfort, en 1891, comportaient une installation semblable. Les générateurs triphasés produisaient trois courants de 1400 ampères à la tension de 55 volts; le transformateur élévateur, au départ de l'usine, portait la tension à 8500 volts; le second transformateur réduisait le potentiel à 65 volts, à l'arrivée à Francfort. Malgré les pertes dues à la double transformation, on est arrivé ainsi à transporter à la distance de 177 kilomètres la puissance électrique de 100 chevaux, par trois fils de 4 millimètres de diamètre, avec un rendement de 75 pour 100 environ.

La construction des génératrices se trouve considérable-

ment simplifiée par l'emploi des transformateurs élévateurs de tension; on évite ainsi les grandes difficultés d'isolation que comporte l'établissement des enroulements à haute tension et le danger que présente la conduite de machines de plusieurs milliers de volts. Le haut voltage est alors relégué, pour ainsi dire, dans le transformateur élévateur, qui ne possédant aucun organe mobile, peut être facilement isolé et soustrait à l'accès d'un personnel imprudent.

TRANSFORMATION DE PHASES. — Les appareils dont nous venons de parler sont des transformateurs de tension, mais on connaît aussi des procédés pour transformer des courants d'une phase donnée en courants de phase d'un ordre quelconque.

On peut profiter de la propriété des *champs tournants* dont nous exposerons la théorie à propos des moteurs. Nous verrons qu'un système de bobines parcourues par un courant polyphasé donne lieu à un flux résultant d'in-

tensité constante, animé d'un mouvement de rotation uniforme autour d'un axe perpendiculaire au champ magnétique.

Un pareil flux tournant se produit dans la jante d'un transformateur dont la carcasse serait telle que celle représentée par la figure 316. Les trois bobines primaires enroulées sur les rayons de la carcasse qui affecte la forme générale d'une roue, produisent des champs décalés d'un tiers de

FIG. 316. — Champ tournant pour transformation de phases.

période, dont la résultante change nécessairement de place à chaque instant, suivant les valeurs respectives de chacun des flux composants, aux divers temps de la période.

Si donc on enroule sur la jante quatre bobines, par exemple, distantes d'un quart de circonférence, elles seront traversées successivement par le flux tournant, et

les forces électro-motrices qui y seront induites seront retardées d'un quart de phase d'une bobine à l'autre ; un courant diphasé sera donc engendré dans ces bobines secondaires.

En multipliant le nombre des divisions de la jante et garnissant celle-ci d'autant de bobines, on obtiendra un courant composé du nombre de phases que l'on voudra.

On peut arriver au même résultat avec une seule série de bobines formant un enroulement fermé sur lui-même comme celui de l'anneau Gramme. Les trois fils d'un courant triphasé sont connectés aux points A, B et C de l'enroulement, distants de 120 degrés (fig. 317). Les points A et C, par exemple, sont à des potentiels différant d'un tiers de phase ; les tensions des spires consécutives de A à C doivent donc présenter au même instant toutes les phases intermédiaires. En passant ensuite de C en B, on

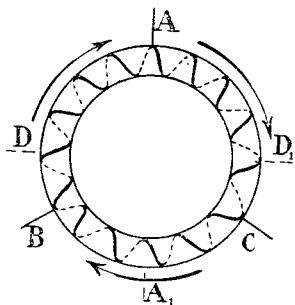


FIG. 317. — Transformateur à enroulement Gramme.

trouvera la bobine A_1 qui correspond à la demi-période dont la phase est directement opposée à celle de A. Les points A et A_1 seront donc analogues aux pôles positif et négatif d'un alternateur, et un circuit branché en ces points donnera un courant alternatif simple.

On recueillera de même aux points D, D_1 situés sur un diamètre perpendiculaire au diamètre AA_1 un courant de même tension, mais décalé d'un quart de phase par rapport au premier.

Il y aura donc, dans ce cas, une simple transmutation du courant du circuit triphasé au circuit diphasé, par l'intermédiaire des diverses bobines de l'enroulement, qui créent, pour ainsi dire, entre les points de jonction du circuit triphasé, des chutes de phases consécutives, offrant sur le pourtour de l'enroulement toute la gamme des phases d'une période.

En multipliant le nombre des fils reliés à l'enroulement, en des points équidistants, entre les bornes du circuit triphasé, on obtiendra un courant polyphasé de tel ordre que l'on voudra.

TRANSFORMATION DU SYSTÈME SCOTT. — Nous avons exposé ailleurs (tome I, § 184) comment, dans l'un des types d'alternateur construits par la maison Ganz, on arrive, en appliquant aux enroulements de l'induit le système de montage imaginé par l'ingénieur F. Scott, à transformer un courant diphasé en courant triphasé. Cet alternateur est donc un transformateur de phase rotatif.

Il est évident, d'autre part, que ce que nous avons dit des enroulements de l'alternateur Ganz s'applique également à des enroulements montés sur la carcasse d'un transformateur. Nous nous contenterons donc de reproduire ici l'exposé que fait l'inventeur lui-même de son procédé appliqué à l'emploi des transformateurs fixes.

On relie les primaires P_1 , P_2 de deux transformateurs à un générateur diphasé G (fig. 318). Les deux forces

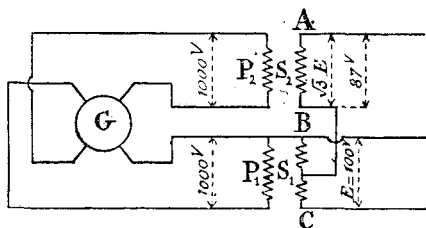


FIG. 318. — Transformation Scott de di en triphasé.

électro-motrices secondaires sont, par suite, décalées d'un quart de période. On donne 100 spires à l'un des secondaires S_1 et on le boucle au milieu, ce qui laisse 50 spires de part et d'autre. L'autre secondaire S_2 comporte 87 spires, nombre à peu près égal à $50 \times \sqrt{3}$.

L'une des extrémités de ce circuit secondaire est reliée au milieu du secondaire du second transformateur, comme l'indique la figure 318, et les trois bornes libres, A, B, C

sont alors le point de départ de forces électro-motrices différant en phases d'un tiers de période. Si l'on suppose la force électro-motrice sur chaque primaire de 1000 volts, sur le secondaire S_1 de 100 volts, et sur l'autre secondaire de 87 volts, la différence de potentiel triphasée mesurée entre deux bornes secondaires quelconques, sera de 100 volts.

TRANSFORMATION AU MOYEN DE DEUX MACHINES. — Par les moyens indiqués précédemment, on peut réaliser la transformation d'un courant diphasé en courant triphasé et réciproquement, mais l'on ne saurait obtenir un courant continu secondaire d'un courant alternatif primaire simple ou polyphasé.

Pour cette transformation on peut recourir au procédé mis en œuvre dans le cas des courants continus dont on veut transformer simplement la tension, comme nous le verrons plus tard. Il consiste dans l'emploi simultané de deux machines électriques, l'une servant de moteur, l'autre de génératrice.

Le courant à transformer, soit dans sa tension, soit dans ses phases, soit dans sa nature, est reçu dans la première machine où il se transforme d'abord en énergie mécanique; celle-ci est transmise à la génératrice qui, au rendement près, transforme cette énergie en électricité de l'espèce voulue. Le procédé est donc absolument général.

L'inconvénient du système est la double transformation, qui comporte la transformation intermédiaire en énergie mécanique. D'autre part, ce procédé peut revendiquer l'avantage de permettre le réglage indépendant du courant primaire et du courant secondaire, qui se régleront évidemment comme celui d'une dynamo actionnée par un moteur.

TRANSFORMATEURS ROTATIFS A DOUBLE ENROULEMENT. — Au lieu d'employer deux machines distinctes, on peut imaginer que l'induit d'une seule machine soit pourvu de deux enroulements superposés, l'un recevant le courant primaire entraîne l'armature dans son mouvement de rotation, l'autre tournant dans le champ magnétique commun

aux deux enroulements engendre le courant voulu. L'induit peut être formé d'un anneau recevant les deux enroulements bobinés dans le système Gramme.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de transformer un courant triphasé en courant continu. On reliera trois points de l'enroulement primaire correspondant à des différences de phases d'un tiers de période, à trois bagues isolées sur l'axe et mises en contact avec autant de balais reliés respectivement aux extrémités du circuit triphasé; quant aux bobines du second enroulement, elles seront reliées à un collecteur de dynamo à courant continu. S'il s'agissait, au contraire de transformer le courant triphasé en diphasé, on relierait quatre points à 90 degrés l'un de l'autre de l'enroulement secondaire à autant de bagues fixées sur l'axe.

Ici les courants ne sont plus indépendants, puisque les enroulements primaire et secondaire tournent dans le même champ inducteur; on ne pourra effectuer le réglage du courant continu secondaire en agissant sur l'excitation des électros; il faudra faire varier la tension du courant primaire, et la tension secondaire suivra les mêmes variations, puisque le rapport des tensions primaire et secondaire restera constant comme dans le cas du champ magnétique développé dans un transformateur ordinaire, abstraction faite toutefois des effets de la dispersion magnétique.

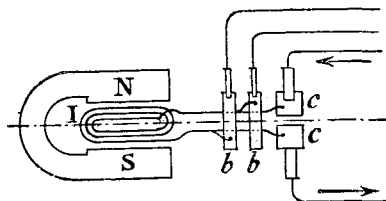
L'excitation des électros s'obtient au moyen d'une dérivation prise sur les balais du collecteur de l'enroulement secondaire.

On peut également établir les enroulements primaire et secondaire dans le système à tambour; le transformateur rotatif Lahmeyer est construit dans ce type et on en a fait des applications comportant des machines de 30 kilowatts.

TRANSFORMATEURS POLYMORPHIQUES. — On peut encore aller plus loin et obtenir d'un seul enroulement telle transformation que l'on désirera; le schéma de la figure 319 montre le principe mis en œuvre dans ce système.

Soit un induit I réduit à une seule bobine et tournant

entre les deux pôles inducteurs N et S. Cet enroulement étant relié en même temps à deux bagues isolées *b b* et à un commutateur à deux coquilles *c c*, si nous y lançons par les bagues *b b* un courant alternatif, l'organe mobile se mettra à tourner et développera une tension continue entre les balais du collecteur *c c*. On recueillera donc sur ce collecteur un courant continu, comme s'il s'agissait de l'induit d'une dynamo ordinaire actionnée par un moteur extérieur.



Dans la pratique on se servira d'un anneau Gramme et l'on reliera à deux,

FIG. 319. — Transformateur polymorphique élémentaire.

trois ou quatre bagues les points de l'anneau distants de 180, 120 ou 90 degrés, suivant qu'il s'agira de transformer des courants alternatifs simples, triphasés ou diphasés en courant continu ; celui-ci sera recueilli sur un commutateur à touches multiples, mis en relation avec l'enroulement, comme dans les dynamos à courant continu ordinaires.

Le rapport de la transformation des tensions, des courants alternatifs au courant continu, telle qu'elle est réalisée dans ce système, est de 0,70 environ pour le courant alternatif simple et le courant diphasé ; il est de 0,61 pour le courant triphasé.

Les transformateurs rotatifs à enroulement unique, qu'on a également qualifiés de *convertisseurs* et auxquels M. Hospitalier a donné le nom de *machines polymorphiques* sont tels qu'ils peuvent remplir indifféremment des rôles très variés :

- 1° De générateur ou de moteur, à courant continu ;
- 2° De générateur ou de moteur, à courant alternatif ou polyphasé ;
- 3° De transformateur de courant polyphasé en courant continu et inversement.

Ces appareils ont reçu un certain nombre d'applications notamment en Amérique, et en particulier sur le réseau de distribution de la Compagnie d'énergie électrique des chutes du Niagara.

Description de divers types de transformateurs fixes de tension.

Les transformateurs fixes de tension sont les plus employés, nous en décrirons donc les types les plus usuels, en commençant par la bobine de Ruhmkorff qui n'est pas à proprement parler un appareil industriel, mais qui fut le premier en date de tous les transformateurs.

200. Bobine de Ruhmkorff. — Cette bobine doit être considérée comme un transformateur élévateur de tension. Elle se distingue des appareils industriels en ce qu'elle ne met généralement en action que la faible puissance d'une pile hydroélectrique et surtout par le mode d'excitation du champ magnétique d'induction.

On n'emploie exclusivement dans l'industrie comme courant primaire ou excitateur que le courant alternatif. Ici la force électro-motrice agissant aux bornes de la bobine primaire est celle d'une source d'électricité continue telle qu'une pile, et les variations d'intensité sont obtenues par le moyen d'un interrupteur automatique, qui produit une suite de fermetures et d'ouvertures successives très rapides du circuit excitateur. C'est donc un courant continu, c'est-à-dire toujours de même sens, mais intermittent qui détermine les phénomènes d'induction dans le circuit secondaire de la bobine de Ruhmkorff.

Celle-ci se compose en principe d'un noyau magnétique M (fig. 320), constitué par un faisceau de fils de fer vernis à la gomme laque, afin d'éviter dans sa masse la production des courants de Foucault. On enroule sur ce noyau une première bobine de gros fil comprenant un petit nombre de spires, et par-dessus, le circuit secondaire parfaitement

isolé du premier et formé d'un grand nombre de spires de fil fin.

Dans le circuit primaire est intercalée une pile P et la tige d'une armature A placée en regard du noyau M ; cette tige, quand l'appareil est en attente, ferme le circuit par la barre conductrice $a b$. Cette armature constitue un trembleur analogue à celui des sonneries électriques. Dès que le courant de la pile est lancé dans le circuit primaire, le noyau est aimanté et attire l'armature A ; le circuit est interrompu en a , mais il se produit un extra-courant de rupture de même sens que le courant principal issu de la pile et qui prolonge ce courant par une étincelle, dans l'intervalle a .

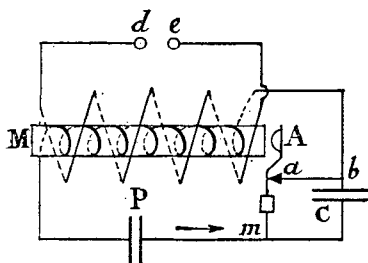


FIG. 320. — Schéma de la bobine de Ruhmkorff.

Le courant primaire partant de zéro à l'origine, va donc en croissant jusqu'au moment de la rupture, à partir duquel il décroît pour revenir à zéro. Or pendant la période croissante, l'induction détermine dans la bobine secondaire un courant de sens contraire au courant primaire inducteur et un courant de même sens pendant la période décroissante; il s'ensuit que pour un cycle complet du courant primaire inducteur, partant de zéro pour y revenir, le courant secondaire change deux fois de sens, il y aura donc deux pulsations du secondaire pour une du primaire, autrement dit la fréquence du courant induit sera double de celle du courant inducteur.

L'étincelle qui se produit au point de rupture correspond à une certaine quantité d'énergie dissipée en pure perte, de plus, elle a pour effet de détériorer l'interrupteur. Le courant interrompu plus ou moins brusquement ne peut pas s'arrêter instantanément, pas plus qu'un courant d'eau

n'est immobilisé par la fermeture rapide d'un robinet. Dans ce dernier cas, il se produit un coup de bélier, un choc, qui constitue une perte d'énergie.

Mais si au moment de la fermeture du robinet, qui correspond ici à la rupture du circuit électrique, on offre à l'eau une dérivation dans un cylindre pourvu d'un piston élastique, l'énergie de mouvement dont elle est animée s'emmagasiné dans le travail de compression du piston; il est évident alors qu'à l'ouverture du robinet, cette énergie sera restituée dans la canalisation, par la détente du piston.

Le rôle du piston élastique est parfaitement rempli par le condensateur *G* que Fizeau a eu l'idée d'interposer en dérivation, entre les deux points *m* et *b* où se fait l'interruption.

À la rupture en *a*, l'extra-courant ne trouvant pas d'issue par ce point, s'emmagasiné dans le condensateur; il n'y a donc pas d'étincelle au contact. Puis, lors du rétablissement du circuit primaire, le courant de décharge du condensateur est utilisé en partie; une légère étincelle ferme le circuit en *a* avant que le trembleur ait touché le contact et facilite le passage du courant inducteur. On obtient ainsi dans le circuit secondaire des forces électromotrices très élevées, qui permettent au courant de franchir des *distances explosibles* plus ou moins considérables, sous forme d'étincelles, entre les boules *d*, *e* qui terminent le circuit induit.

201. Transformateurs industriels. — Ces transformateurs comportent, comme la bobine de Ruhmkorff, deux circuits électriques, l'un primaire, l'autre secondaire et un circuit magnétique. Ce dernier prend une grande importance et se présente sous l'aspect d'une carcasse en fer dont la forme varie suivant les types, actuellement très nombreux. Quelle que soit d'ailleurs la variété des formes adoptées, les appareils peuvent être classés en deux catégories, celle des transformateurs à noyaux et celle des transformateurs cuirassés.

Dans tous les cas, les carcasses magnétiques doivent être

formées de fil de fer ou de tôles minces, c'est-à-dire d'une masse magnétique divisée, de manière à éviter la production des courants parasites.

Le type à noyau (fig. 321) est caractérisé par le fait que les bobines sont enroulées extérieurement sur les longs côtés d'un cadre généralement rectangulaire qui forment ainsi des noyaux intérieurs aux bobines: par suite de cette disposition, la surface extérieure des bobines est exposée à l'action refroidissante de l'air ambiant.

Dans ce type, pour lequel la carcasse magnétique est réduite à un cadre en partie logé à l'intérieur des bobines, le poids du fer est relativement faible, mais le circuit magnétique qui doit parcourir tout le pourtour du cadre présente un développement toujours assez considérable, ce qui exige un grand nombre d'ampères-tours et un poids de cuivre notable. Par contre, ce système a l'avantage de faciliter le refroidissement de l'appareil et de laisser le libre accès des bobines, dont la surveillance et l'entretien sont ainsi beaucoup plus aisés.

Dans le type cuirassé (fig. 322), les bobines sont presque entièrement noyées dans le fer qui forme autour d'elles comme une cuirasse extérieure protectrice.

Les bobines allongées P et S s'enroulent autour d'un noyau intérieur où se développe le flux d'induction; le faisceau des lignes de force se divise ensuite en deux flux

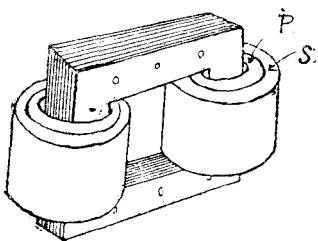


FIG. 321. — Transformateur type à noyau.

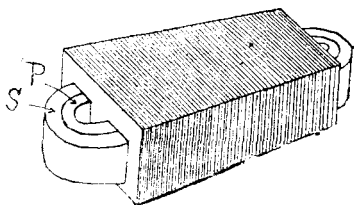


FIG. 322. — Transformateur type cuirassé.

se répandant à droite et à gauche, dans les branches latérales formant cuirasse.

On réalise ainsi un circuit magnétique très court et de grande section, par suite de faible réluctance; ce type exige donc très peu d'ampères-tours et un faible poids de cuivre. D'autre part, la masse du fer augmente considérablement, les bobines sont difficilement abordables et ne peuvent se refroidir aisément à l'intérieur de la cuirasse. Nous avons déjà indiqué la forme des carcasses magnétiques des transformateurs à courants polyphasés.

Les types précédents, qui sont d'ailleurs presque exclusivement employés, sont des circuits magnétiques fermés.

Le premier transformateur industriel, imaginé par Gaulard et Gibbs, comportait un noyau droit et, par suite, un circuit magnétique ouvert, analogue à celui de la bobine Ruhmkorff. Un pareil circuit présente une force coercitive plus faible et réduit par suite les pertes de travail par hystérésis; il est obligatoire dans la bobine de Ruhmkorff, car il facilite la rapidité de la désaimantation qui serait retardée dans un circuit magnétique complètement fermé.

Mais cette considération n'a plus de raison d'être quand il s'agit de transformateurs industriels où l'aimentation et la

désaimantation sont produites par des courants alternatifs, tandis que le noyau ouvert laissant les lignes de force se fermer dans l'air, exige un nombre d'ampères-tours d'excitation beaucoup plus considérable pour la même induction.

C'est en vue de remédier à cet inconvénient, tout en cherchant à réduire les pertes par hystérésis, que M. Swinburne a imaginé son type de transformateur hérisson.

Le noyau (fig. 323) est formé de fils de fer, dont les extrémités recourbées viennent s'épanouir sur une surface hémisphérique, de manière à figurer plus ou moins le dos d'un hérisson. Les lignes de force se trouvent

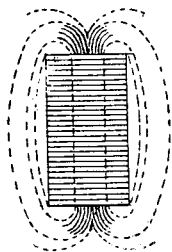


FIG. 323. — Transformateur hérisson.

ainsi orientées suivant des circuits fermés à travers l'air et la longueur du circuit aérien ainsi que la dispersion magnétique en sont ainsi réduites.

Ce système ne paraît pas avoir répondu aux vues de son auteur, car la perte par hystérésis et la réluctance ne sont pas sensiblement diminuées, à conditions égales, et de plus, ce transformateur absorbe un courant notable dans la marche à vide.

TRANSFORMATEUR GAULARD ET GIBBS. — Le nom du français Gaulard est attaché à l'invention du transformateur industriel dont il fut le promoteur incontesté. Son appareil se présente sous l'aspect de colonnes qui rappellent la forme générale des premières piles de Volta.

Sur un noyau magnétique de fils de fer doux, sont enroulés les circuits, constitués chacun par des rondelles de cuivre mince (fig. 324) reliées entre elles par deux oreilles A et B dont l'une est soudée à l'oreille correspondante de la rondelle supérieure, l'autre à la rondelle inférieure, de manière à former une spirale continue de ruban de cuivre. Les circuits primaire et secondaire sont semblables et leurs spires entrelacées sont isolées par un vernis à la gomme laque et séparées par des feuilles de papier parcheminé.

L'appareil représenté (fig. 325) est composé de deux colonnes dont les noyaux ont été reliés de manière à constituer un circuit magnétique fermé; ces piles sont établies sur un socle de bois et recouvertes d'une tablette de même substance qui porte les bornes des circuits primaire et secondaire.

En général, le transformateur est constitué par un certain nombre de colonnes réunies sur le même socle et portant chacune la double pile des circuits primaire et secondaire. Les primaires des diverses colonnes sont tous réunis en série; quant aux spirales secondaires, elles peuvent être

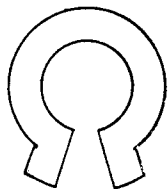


FIG. 324. — Élément de l'enroulement Gaulard.

reliées soit en tension, soit en quantité, suivant le taux de transformation que l'on veut réaliser.

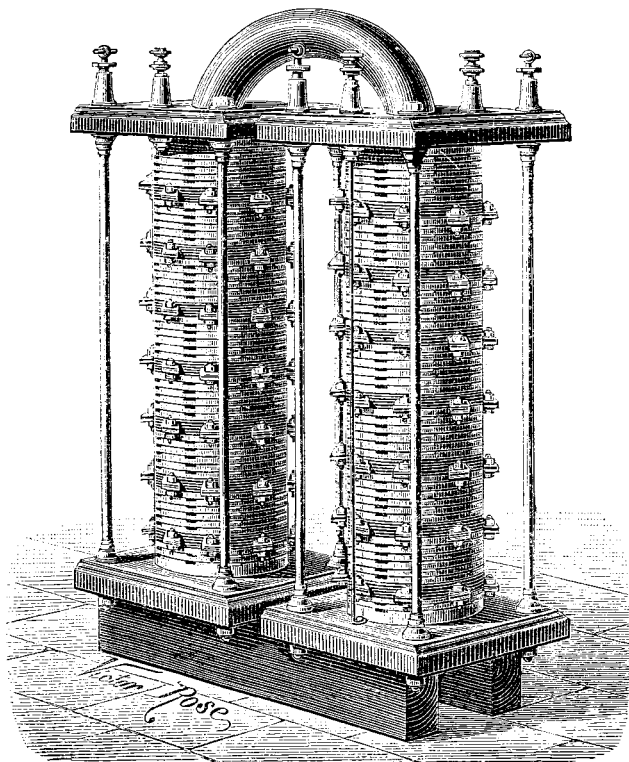


FIG. 325. — Transformateur Gaulard et Gibbs.

TRANSFORMATEUR ZIPERNOWSKI, DERI ET BLATHY. — Ce transformateur est à circuit fermé annulaire. Il est construit en effet comme un anneau Gramme (fig. 326). Sur un anneau de fil de fer gomme-laqué, on enroule les fils primaires et secondaires en sections alternées ; les extrémités des deux enroulements émergent de la couche

extérieure de l'anneau d'où se détachent quatre brins I, I' et II, II' correspondant respectivement aux circuits primaire et secondaire.

Au lieu d'alterner ainsi les bobines des deux circuits, on peut enrouler séparément le circuit primaire et le circuit secondaire, en couches superposées.

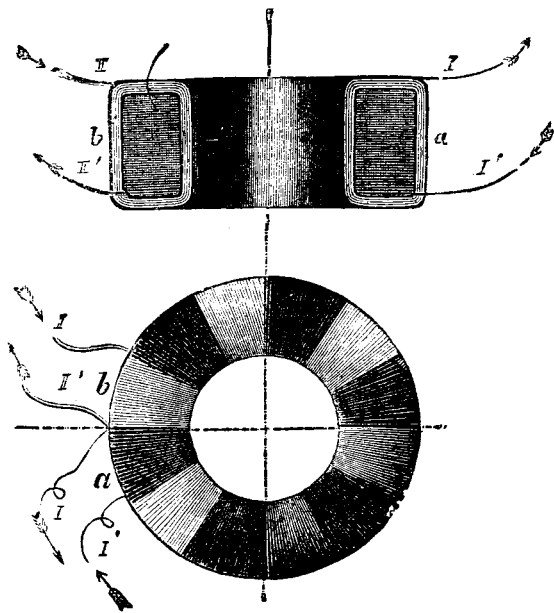
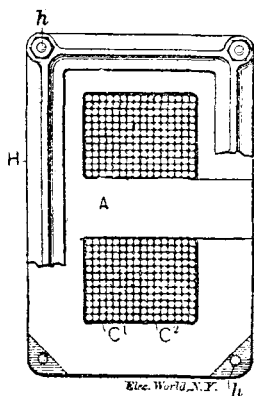


FIG. 326. — Noyau du transformateur Zipernowsky.

On peut employer aussi la disposition inverse, dans laquelle le noyau intérieur est formé par les deux bobines primaire et secondaire enroulées en couronne; l'ensemble constitue un anneau sur lequel on enroule l'enveloppe magnétique faite de fil de fer isolé; cette enveloppe forme ainsi une sorte de cuirasse extérieure d'où émergent les extrémités des deux circuits électriques.

Ces anneaux sont montés sur des bâtis en bois, ou en fer et surmontés de plateaux isolés portant les bornes où aboutissent les extrémités des circuits primaire et secondaire.



TRANSFORMATEUR WESTINGHOUSE. — C'est un transformateur du type cuirassé (fig. 327). Les circuits primaire et secondaire forment deux couronnes aplaties placées à côté l'une de l'autre et embrassant la branche intérieure A de la carcasse magnétique. Celle-ci est constituée par des feuilles de tôle mince, découpées en forme de E dont les branches

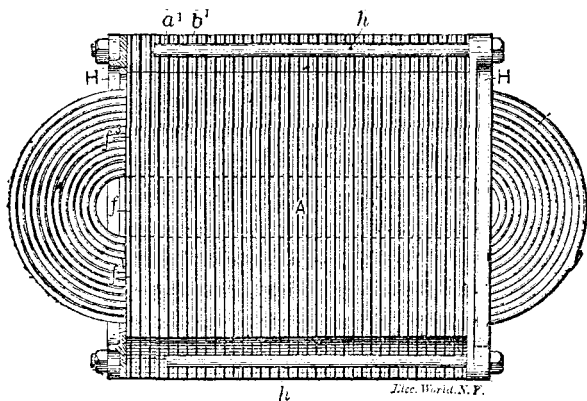


FIG. 327. — Transformateur Westinghouse.

fendues peuvent être relevées pour laisser passer les enroulements.

On empile ces tôles en ayant soin de les appliquer alternativement sur l'une ou l'autre face, de manière à cou-

vrir les joints des branches fendues, pour assurer la continuité du circuit magnétique.

L'ensemble de ces feuilles, juxtaposées et isolées entre elles par des feuilles de papier verni, est maintenu invariablement par des cadres en fonte H, disposés sur les faces extrêmes du transformateur et sur lesquels s'effectue le serrage à bloc de l'ensemble par quatre boulons *h*. Tout le système est enfermé dans une boîte en fonte pourvue des bornes et coupe-circuits nécessaires.

TRANSFORMATEUR GANZ — La carcasse magnétique de cet appareil (fig. 328) est constituée par des tôles découpées

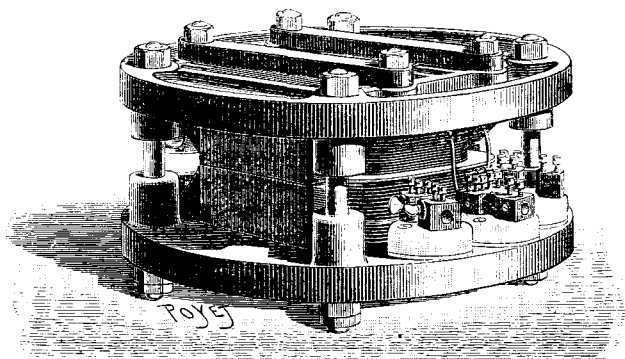


FIG. 328. — Transformateur Ganz.

dont chaque couple affecte dans son ensemble, la forme de deux $\square$ qui sont rapprochés de sorte que les extrémités des trois branches viennent se juxtaposer pour constituer un cadre fermé; les plans de séparation des tôles se distinguent nettement sur la face latérale du dessin.

Les paquets de tôle sont fortement serrés par les plaques de fonte supérieure et inférieure, au moyen de quatre gros boulons; ces plateaux, de forme circulaire, permettent de rouler l'appareil sur le sol, sans risque de le détériorer.

Les fils enroulés sur des douilles de carton à fort isolement forment des disques aplatis. L'enroulement du cir-

cuit secondaire est subdivisé en deux bobines, entre lesquelles se place la bobine primaire unique. Les extrémités des fils des bobines aboutissent à des bornes en porcelaine, fixées sur le plateau inférieur.

Grâce aux dispositions indiquées, le montage de l'appareil se fait sans difficulté, et le démontage, en cas de réparation, est aussi des plus faciles.

Pour placer les bobines, il suffit de les enfiler sur le paquet de tôles en ω formant le demi-cadre inférieur; on superpose ensuite le paquet des tôles en ω dont les branches viennent s'enchevêtrer comme il convient dans celles du paquet inférieur; on met ensuite le plateau supérieur et l'on effectue un serrage énergique, à l'aide des boulons.

L'appareil (fig. 328) est d'une construction très simple, et le bon refroidissement est assuré par les espaces laissés

libres entre les bobines et les branches extérieures du cadre, ainsi que par les vides ménagés dans les deux plateaux.

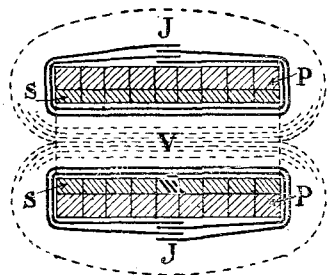


FIG. 329. — Disposition du transformateur Ferranti.

TRANSFORMATEUR FERRANTI. — Le noyau de cet appareil est construit d'une manière toute spéciale (fig. 329). Les bobines primaire et secondaire comportent des

groupes de couronnes concentriques P et S juxtaposées et formant par leur ensemble un cylindre creux. A l'intérieur de celui-ci, on introduit des paquets de lames de tôle que l'on retrousse moitié en dessus, moitié en dessous du cylindre et de telle sorte que les bords se recouvrent sur une certaine largeur, comme il est indiqué en J.

On constitue ainsi une cuirasse de tôles qui enveloppe presque entièrement le cylindre des bobines (fig. 330). Tout le système est maintenu dans un bâti en fonte qui comprend deux parties formant le socle et le couvercle;

ce dernier est boulonné sur les montants du socle et est pourvu d'un anneau qui permet de le soulever en cas de réparation exigeant le démontage de l'appareil.

On voit sur la figure les diverses séries de lames de tôle

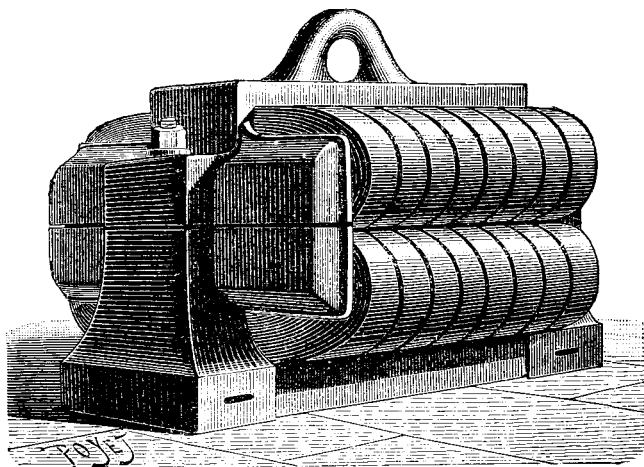


FIG. 330. — Transformateur Ferranti.

juxtaposés qui constituent, par leur ensemble, la cuirasse magnétique de l'appareil.

TRANSFORMATEUR LABOUR. — Cet appareil est un transformateur du type à Noyau (fig. 331).

Les tôles constituant la carcasse magnétique sont découpées en forme de fer à cheval et les extrémités des branches sont alésées suivant une surface cylindrique, ainsi qu'il est indiqué en pointillé sur le dessin en élévation.

L'entrefer est fermé par un cylindre de tôles, remplissant exactement l'intervalle cylindrique laissé libre entre les extrémités des branches du fer à cheval.

Les deux circuits sont enroulés sur des manchons concentriques parfaitement isolés; le circuit primaire est subdivisé en un nombre plus ou moins grand de bobines qui peuvent être couplées, soit en série, soit en quantité,

de manière à obtenir le rapport de transformation que l'on veut.

Les tôles ne sont pas d'égale dimension et forment des paquets de différentes largeurs, déterminant des cannelures latérales qui constituent des canaux d'aération, à l'intérieur des bobines. L'ensemble des tôles est maintenu à la partie supérieure et à la base de l'appareil par des flasques en fonte, serrées par deux boulons.

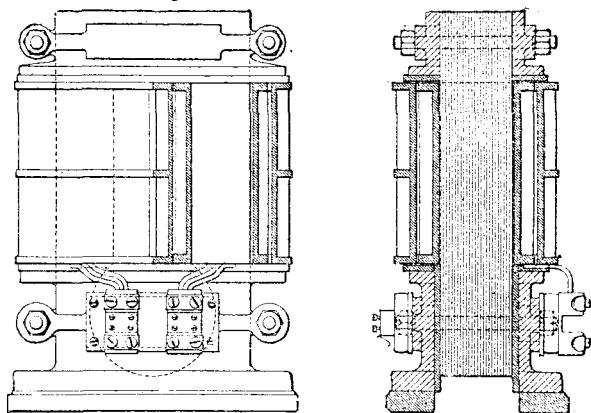


FIG. 33r. — Coupe et élévation du transformateur Labour.

L'appareil est bien aéré, facilement démontable, et donne un rendement à pleine charge de 97 pour 100.

TRANSFORMATEUR D'OERLIKON. — Le circuit magnétique de ce transformateur, du type cuirassé, comporte une carcasse formée de tôles découpées à l'emporte-pièce, suivant le gabarit d'un rectangle évidé (fig. 332).

Le bras intérieur ou noyau, sur lequel s'enfilent les bobines, est formé de lames de tôle dont les largeurs vont en diminuant de part et d'autre de l'axe longitudinal, de manière à réaliser une section sensiblement circulaire. Ces lames viennent buter par leurs extrémités sur la face intérieure des culasses et elles sont maintenues par des plaques en laiton fixées sur les petits côtés du cadre et

entre lesquelles elles sont serrées par des boulons qui les traversent de distance en distance.

Les bobines primaires, en deux sections, sont enroulées

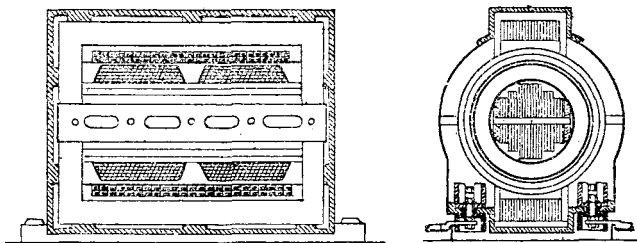


FIG. 332. — Transformateur d'Oerlikon, coupes longitudinale et transversale.

sur des cylindres de papier; la bobine secondaire montée de même enveloppe les précédentes.

L'ensemble est placé dans un châssis en fonte, en deux parties évidées latéralement pour l'aération de l'appareil. La coupe transversale du dessin montre la section en forme d'U de cette enveloppe dans laquelle est encastrée et serrée la carcasse magnétique. Les bobines qui font saillie à l'intérieur du châssis, sont protégées par des tôles perforées, fixées de chaque côté de l'appareil.

La figure 333 représente un type de transformateur pour courants triphasés. Les trois noyaux sont disposés symétriquement entre les deux plateaux circulaires formant culasses.

Chacun des noyaux porte la bobine primaire et la bobine secondaire correspondant à l'une des trois phases des circuits. L'ensemble est maintenu par des boulons

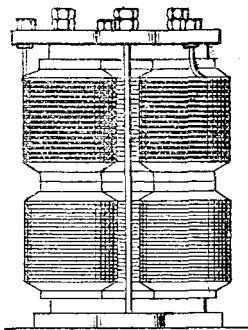


FIG. 333. — Transformateur triphasé d'Oerlikon.

qui effectuent le serrage des noyaux et culasses, par l'intermédiaire de deux plaques de fonte dont la supérieure porte les bornes de connexion.

TRANSFORMATEUR SWINBURNE. — Nous reproduisons ici le dessin du transformateur hérisson dont nous avons exposé plus haut le but et les qualités (fig. 334). Le noyau

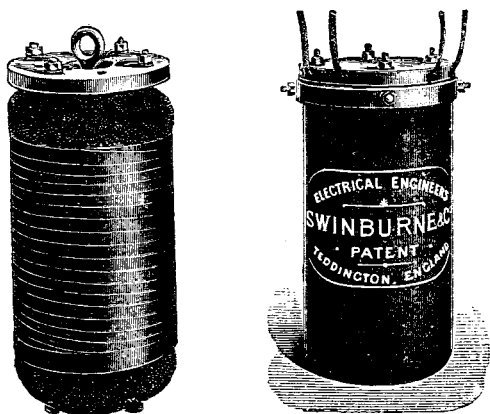


FIG. 334. — Transformateur Swinburne.

en fil de fer est maintenu dans les angles d'une carcasse en bronze à section en $+$, disposée verticalement suivant l'axe de l'appareil. Cette pièce formant l'ossature du transformateur porte aux angles quatre tiges qui supportent le plateau en bois surmontant le tout : ce plateau porte les bornes où aboutissent les extrémités des circuits.

Les extrémités des fils de fer formant le noyau sont taillées, après avoir été épanouies, suivant une surface convexe, qui rappelle ainsi l'aspect du hérisson.

L'illustration de droite montre le vase en terre vernie dans lequel on place le transformateur tel qu'il est représenté dans le second dessin de la même figure.

Distributions indirectes par courants alternatifs

202. **Disposition générale.** — Nous avons vu qu'une distribution indirecte comporte deux canalisations distinctes :

1^o Une canalisation à haute tension qui reçoit le courant à voltage élevé, produit par les alternateurs de la station génératrice :

2^o Un réseau de conducteurs à basse tension sur lequel sont distribués les récepteurs.

Le transformateur sert, pour ainsi dire, de trait d'union entre les deux canalisations; mais la communication, ou plutôt la transmission de l'énergie primaire au réseau secondaire, se fait par induction et non par conduction, car les deux circuits des transformateurs reliés respectivement à chacune des canalisations sont et doivent rester absolument isolés l'un de l'autre.

Les appareils d'utilisation se placent sur les conducteurs secondaires, comme s'il s'agissait d'une distribution directe; quant aux bobines primaires des transformateurs, on les dispose sur la canalisation à haute tension, soit d'après le système en série, soit d'après celui en dérivation.

DISTRIBUTION EN SÉRIE. — Toutes les bobines primaires P

sont montées en série sur un circuit unique alimenté directement par l'alternateur à haute tension (fig. 335). Celui-ci doit fournir un courant d'intensité constante. Dans ces conditions, l'intensité dans le courant secondaire

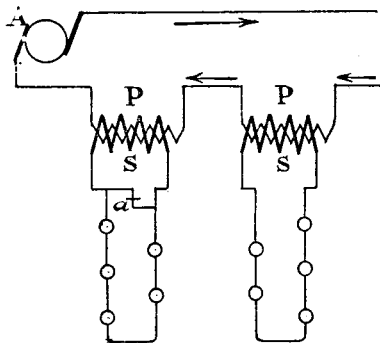


FIG. 335. — Distribution en série.

sera sensiblement constante (§ 198). On devra donc monter les lampes en série dans le circuit d'utilisation.

Ce système permet de réaliser une économie notable sur le cuivre des circuits secondaires, qui utilisent le courant à une tension relativement élevée, quoique généralement inférieure à celle du circuit primaire.

On peut même se demander s'il ne serait pas plus simple de placer les lampes en série directement sur le circuit primaire, sans l'intermédiaire des transformateurs. Mais on remarquera que le circuit primaire doit posséder un isolement correspondant à la tension totale et que chaque lampe introduite dans ce circuit devrait se trouver dans les mêmes conditions d'isolement, ce qu'il n'est pas possible de réaliser pratiquement, surtout sur des réseaux très étendus.

Ce système, comme tous ceux en série, a l'inconvénient de rendre les appareils, transformateurs et lampes, solidaires les uns des autres. D'autre part, si l'un des circuits secondaires vient à s'interrompre, soit par la rupture du charbon de la lampe, soit par tout autre accident, le transformateur correspondant fonctionne à vide, la force contre-électro-motrice de self-induction augmente et réduit l'intensité du courant primaire. L'intensité secondaire diminuerait donc proportionnellement dans les autres transformateurs, si l'on ne faisait pas croître la tension de la génératrice, pour ramener l'intensité primaire à sa valeur normale.

Pour éviter cet inconvénient, on dispose entre les bornes de la bobine secondaire un court circuit automatique, composé d'une feuille mince de mica *a* (fig. 335) qui se laisse traverser par le courant lorsque, ensuite de la rupture du circuit secondaire, la tension aux bornes de la bobine primaire s'est suffisamment élevée de ce fait. On met ainsi en court circuit la bobine secondaire qui, par son flux antagoniste, maintient l'induction à son taux normal et permet ainsi d'éviter un échauffement exagéré de la masse du transformateur, tout en maintenant automatiquement l'intensité constante.

DISTRIBUTION EN DÉRIVATION. — Dans cette disposition qui est presque exclusivement employée aujourd'hui, les bobines primaires du transformateur sont reliées en dérivation sur les conducteurs du circuit à haute tension, alimentés par la génératrice; les récepteurs sont également dérivés sur les courants d'utilisation rattachés aux bobines secondaires (fig. 336).

Comme nous le savons, il suffit de maintenir la tension constante aux bornes de la bobine primaire, pour que la

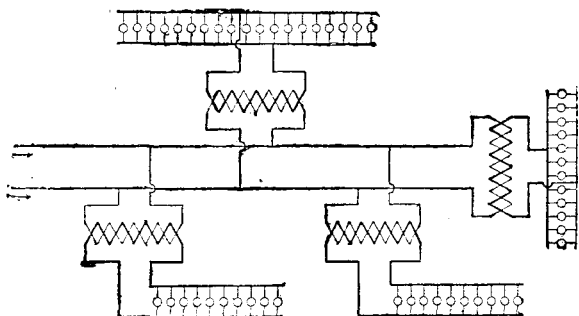


FIG. 336. — Distribution en dérivation.

différence du potentiel aux lampes reste constante, abstraction faite de la perte de tension sur les conducteurs du circuit d'utilisation.

Le schéma représente les circuits secondaires correspondant aux divers transformateurs, isolés les uns des autres, mais on peut les réunir en un seul réseau, de manière à ce que la charge se répartisse plus uniformément dans l'ensemble de la distribution.

L'inconvénient de ces connexions est de reporter sur tout le réseau les effets d'un défaut survenu sur l'une des sections. Il conviendra donc de placer aux points de jonction, des coupe-circuit fusibles de sécurité.

On applique également à ces distributions le système des feeders qui établissent, en différents centres plus ou moins éloignés, des pôles à potentiel constant, d'où par-

tent les distributeurs du circuit primaire sur lesquels sont dérivées les bobines correspondantes du transformateur.

On a représenté dans le diagramme (fig. 336) un certain nombre de transformateurs, qui constituent comme autant de sous-stations alimentant les lampes d'un périmètre donné. On peut au contraire multiplier le nombre des transformateurs jusqu'à placer un appareil isolé pour chaque installation particulière. Dans le premier cas, on emploie donc un petit nombre de transformateurs puissants, placés dans des locaux spéciaux et plus souvent dans des édicules établis sur la voie publique; dans le second cas on met en œuvre un très grand nombre de transformateurs de petit calibre qui sont placés à l'intérieur des habitations.

Le système des grands *transformateurs de sous-stations* présente l'avantage d'un rendement supérieur à celui des petits transformateurs isolés. Il faut remarquer aussi que la puissance totale des premiers appareils peut être notablement plus faible que celle correspondant à l'ensemble des petits transformateurs, dont chacun doit représenter individuellement la puissance maximum qu'il est appelé à desservir dans chaque installation particulière isolée; les grands transformateurs doivent satisfaire seulement à la consommation générale qui ne dépasse jamais 60 pour 100 du nombre des lampes existant sur le réseau.

Par ces raisons, l'exploitation par gros transformateurs est plus économique que celle par petits transformateurs isolés; mais en revanche, les frais de premier établissement sont plus élevés que dans le second cas. En effet, bien que le prix d'achat des gros transformateurs soit moindre que celui des petits, pour une même puissance d'un kilowatt, la dépense relative aux câbles présente un excédent notable, dans le système des sous-stations qui exige une canalisation secondaire de gros diamètre, tandis que ce réseau n'existe pas dans le second cas où les conducteurs à haute tension sont prolongés jusque dans l'intérieur des habitations.

En tenant compte de ces diverses considérations, Gisbert Kapp formule les conclusions suivantes :

Une distribution au moyen de transformateurs isolés est préférable lorsque la force motrice peut s'obtenir à bas prix; lorsque l'installation est petite; lorsque les lampes sont très espacées; quand les câbles sont chers et les frais d'amortissement élevés.

On doit préférer une distribution au moyen de sous-stations, lorsque le prix de la force motrice est élevé; quand l'installation est grande; lorsque les lampes sont agglomérées; que les câbles sont bon marché et que les frais d'amortissement des transformateurs et des canalisations sont minimes.

DISTRIBUTION MIXTE. — On peut réaliser une distribution mixte à la

fois directe et indirecte comme il est indiqué (fig. 337). Dans cette disposition, l'alternateur *A* alimente deux circuits distincts, l'un *m p n* où sont échelonnés les récepteurs en série, sans transformateurs; l'autre *m n q* sur lequel sont dérivés les primaires des transformateurs.

Cette disposition peut être avantageuse pour une petite station qui devrait fournir l'éclairage public de la ville aussi bien que l'éclairage particulier. Si nous admettons, en effet, comme c'est le cas habituel, que toutes les lampes s'allument et s'éteignent en même temps, les deux systèmes série et dérivation fonctionneront également dans de bonnes conditions; car si l'on maintient une différence de potentiel constante en *m n*, comme il convient pour le

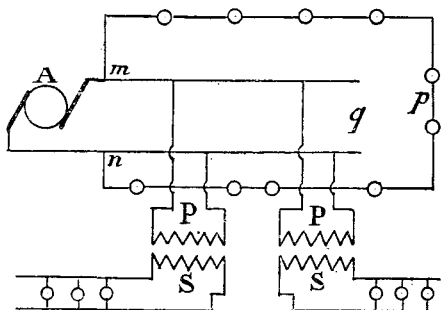


FIG. 337. — Distribution mixte.

système dérivé, l'intensité sera constante dans le circuit série dont la résistance est invariable par hypothèse.

Quant à l'éclairage particulier, essentiellement variable à chaque instant de la soirée, il sera desservi par les transformateurs en dérivation, sans être gêné par le fonctionnement de l'éclairage en tension.

DISTRIBUTION A TROIS FILS. — On peut considérer les bobines des transformateurs et même les spires de ces bobines, comme des éléments de piles qui, par leur connexion en série, peuvent donner telle force électromotrice que l'on veut.

On réalisera donc une distribution à trois fils, comme dans le cas des courants continus, en couplant en série les

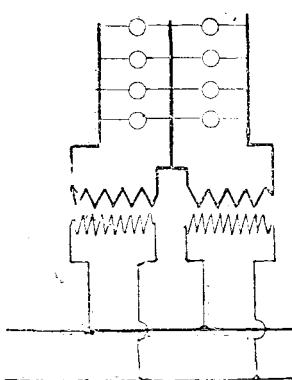


FIG. 338. — Distribution indirecte à trois fils.

bobines secondaires de deux transformateurs et soudant au point de connexion le fil neutre ou conducteur d'équilibre (fig. 338).

On obtiendra ainsi entre les bornes extrêmes du couple secondaire une différence de potentiel double de celle engendrée par chaque bobine; les lampes réparties uniformément sur chaque pont, seront alors soumises à la tension correspondante à chacune des bobines prises séparément. On arriverait au même résultat

avec un seul transformateur qui développerait une force électromotrice double; il suffirait alors de monter le fil neutre sur le milieu du circuit secondaire.

En reliant en série les secondaires de deux transformateurs ainsi disposés pour la distribution à trois fils, on réalisera la distribution à cinq fils, deux des conducteurs extrêmes venant se confondre à partir du point de jonction. Nous laissons au lecteur le soin de tracer le schéma de cette disposition,

203. **Distribution indirecte par courants polyphasés.** — Les lampes se placent sur les circuits secondaires des transformateurs polyphasés, suivant la même disposition que dans le cas des distributions directes par courants diphasés ou triphasés.

Nous avons fait l'étude complète de ces diverses dispositions (§ 195), et nous avons expliqué également, dans l'exposé des transformateurs polyphasés, les relations existant entre les circuits primaire et secondaire.

Nous avons donc étudié tous les éléments de la distribution indirecte par courants polyphasés. Nous ajouterons seulement que ce genre de distribution comporte, comme les distributions directes, des feeders ou conducteurs d'alimentation. Dans ce cas, les trois conducteurs du circuit triphasé, par exemple, qui partent des bornes secondaires de chaque transformateur, sont amenés, sans qu'il soit pris aucune dérivation sur leur parcours, jusqu'aux bornes de boîtes de distribution où viennent se brancher les câbles distributeurs du courant d'utilisation.

C'est aux bornes précitées que l'on maintient une tension constante, comme s'il s'agissait d'une distribution directe par le système des feeders.

204. **Élévateurs, régulateurs de tension.** — Dans les distributions en dérivation, qui sont du reste les plus généralement employées, il faut maintenir, comme nous le savons, une différence de potentiel constante, soit aux bornes des lampes, soit au moins aux extrémités des feeders, d'où rayonnent, dans un périmètre limité, les câbles distributeurs alimentant les appareils récepteurs.

Or, dans le cas qui nous occupe, ce potentiel a des tendances à varier par suite des chutes de tension qui se produisent, non seulement dans les résistances ohmiques des circuits primaires et secondaires, mais encore du fait des variations de charge qui influent, comme nous l'avons expliqué, sur le potentiel du transformateur.

On pourrait compenser les variations de tension aux bornes de la bobine primaire, en introduisant dans le circuit à haute tension les diverses sections d'un rhéostat, ce

qui a d'ailleurs pour effet de dissiper sous forme de chaleur dans les résistances intercalées, une fraction plus ou moins grande du potentiel du courant.

On peut éviter très aisément cette perte, quand on a affaire aux courants alternatifs, en utilisant des appareils d'induction tels que *les élévateurs régulateurs de tension, ou les bobines de réaction*.

Les élévateurs de tension ou *Booster* consistent en un transformateur dont le circuit secondaire S est sectionné

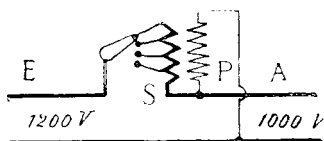


FIG. 339.— Élévateur de tension.

en plusieurs bobines (fig. 339). Les diverses sections de cet enroulement sont reliées à des plots, sur lesquels peut se déplacer un commutateur, dont l'axe de rotation est rattaché à l'un

des câbles de départ de l'usine. Le circuit primaire P est relié directement en dérivation sur les barres collectrices du tableau.

Les choses étant ainsi disposées, les diverses sections de la bobine secondaire viendront ajouter leur force électromotrice en série dans le circuit principal, au fur et à mesure de leur introduction successive dans ce circuit, par la manœuvre du commutateur.

Lorsque celui-ci occupe la position du dessin, toutes les sections sont en circuit et le transformateur est calculé pour qu'à ce moment, la chute de tension maximum de la distribution soit exactement compensée.

Il est indiqué dans le schéma que, pour la position supérieur du commutateur, la tension passe brusquement de 100 volts à 1200 volts, de part et d'autre du survolteur en A et E. Si le commutateur était placé sur la borne inférieure de l'enroulement, celui-ci serait mis entièrement hors circuit et la tension entre les deux conducteurs, au départ de la ligne, serait la même que celle aux bornes des alternateurs de la station.

On voit qu'ici l'énergie absorbée par l'enroulement primaire P, est restituée par le secondaire au circuit princi-

pal, sous forme de potentiel supplémentaire ; il y a donc transformation et non absorption de l'énergie. Les pertes se résument à celles toujours très faibles d'hystérésis et d'effet Joule, dans le transformateur élévateur de tension.

205. Bobines de réaction. — Cet appareil consiste en une bobine présentant un coefficient de self-induction, capable de provoquer une force contre-électro-motrice d'une valeur déterminée.

Soit un circuit alternatif présentant entre les deux conducteurs *a*, *b* une différence de potentiel de 100 volts, par exemple, et supposons que l'on y place en dérivation une lampe à arc *L*, qui n'exige pour son fonctionnement qu'une tension de 35 volts (fig. 340).

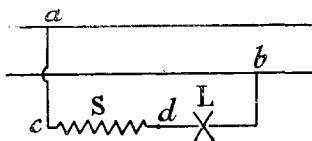


FIG. 340. — Bobine de self-induction en circuit.

On pourrait résoudre le problème en utilisant un petit transformateur réduisant à ce chiffre la tension primaire de 100 volts, mais on obtiendra le même résultat avec la bobine de self *S*, intercalée en série dans le circuit dérivé de la lampe.

Par suite de la présence de la force électro-motrice de self-induction, la tension agissante, entre les points *a* et *b*, doit être plus grande qu'elle ne serait si le circuit était dépourvu d'inductance, puisqu'elle doit faire équilibre à cette force électro-motrice de self-induction, tout en surmontant la résistance du circuit ; la tension agissante serait donc égale à la somme des force électro-motrice de self et chute de potentiel dans la résistance ohmique, si ces diverses tensions étaient dans la même direction, mais elles sont, au contraire, orientées dans des angles différents, car la force électro-motrice de self est en retard de 90 degrés sur le courant, tandis que la perte de tension ohmique est en concordance de phase avec lui.

La lampe elle-même est douée d'inductance, puisqu'il s'agit d'une lampe à arc, et la différence de potentiel à ses bornes est décalée par rapport au courant.

En définitive, la tension agissante, en a et b , doit être la résultante de la force contre-électro-motrice de la bobine de self, de la chute de tension correspondant aux pertes intérieures dans cette bobine, de la force contre-électro-motrice de la lampe et de la chute provenant des résistances de son circuit.

Ainsi la bobine de réaction vient pour ainsi dire amortir la tension supplémentaire, qui est compensée par la différence de potentiel créée aux extrémités c et d de cette bobine; il ne reste plus alors que la tension utile à la lampe, entre les bornes b et d .

Comme, d'autre part, la différence de potentiel aux extrémités de la bobine est la résultante de la force électro-motrice de self et de la chute de tension relativement faible, cette résultante est presque perpendiculaire sur le courant, de sorte que son facteur de puissance est très petit et l'énergie absorbée par cet appareil est des plus faibles.

206. Bobines égalisatrices. — Sur un noyau de fer on superpose deux enroulements P, S formés du même fil et comprenant le même nombre de spires (fig. 341); ces bobines sont connectées en D et ne forment dès lors qu'une seule bobine, pour ainsi dire. Toutefois les enroulements sont bobinés de telle sorte que, lorsqu'un courant venant de la canalisation traverse P suivant la flèche, une force électro-motrice dirigée en sens opposé est induite dans la

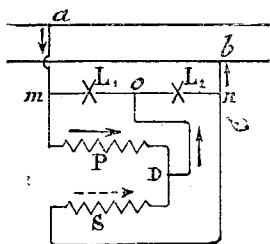


FIG. 341. — Emploi des bobines égalisatrices.

bobine S . Ce système est donc analogue à un transformateur dont les bobines primaire et secondaire seraient semblables et donneraient un rapport de transformation égal à 1.

Supposons maintenant qu'on dispose d'une différence de potentiel de 70 volts entre les points a et b ; on pourra

placer deux lampes à arc en série L_1 et L_2 et ces lampes recevront ainsi le courant de 10 ampères, par exemple, qui leur convient. Si l'on veut n'allumer qu'une seule lampe à la fois, il faudra amortir la tension en excédent de 35 volts, et l'on y parviendra par le moyen des bobines égalisatrices, disposées comme l'indique notre schéma.

S'il s'agit d'allumer la lampe L_2 seule, la seconde lampe L_1 étant supprimée, le courant venant du point a de la ligne passera par P et induira dans S une force électro-motrice égale et opposée qui produira elle-même un courant égal, venant s'ajouter en D au courant de P ; comme la lampe dépense 10 ampères par hypothèse, il passera donc 5 ampères dans P , venant de la canalisation et 5 ampères induits dans S .

En définitive, l'enroulement P joue le rôle d'une bobine de self-induction qui amortit environ la moitié de la différence de potentiel agissant en $a b$, de sorte que la lampe L_2 n'est plus soumise qu'à la tension voulue de 35 volts. Mais l'énergie disponible absorbée par P se transmet par induction à la bobine S qui la restitue sous forme d'un courant de 5 ampères venant compléter l'intensité de 10 ampères nécessaire au fonctionnement de la lampe L_2 .

Ces bobines égalisatrices peuvent encore être utilisées pour équilibrer les tensions sur les deux ponts d'une distribution à trois fils inégalement chargés, ce qui permet de supprimer le prolongement du fil d'équilibre entre les lampes et le transformateur de la sous-station.

RÉGULATEUR GANZ ET C^{ie}. — Ce système particulier de réglage a pour but de maintenir le voltage constant aux points de raccordement des feeders avec le réseau de distribution. Il comprend (fig. 342) un transformateur dit égalisateur T , un transformateur réducteur T_1 et un système R de régulation automatique du champ exciteur de la dynamo A .

Le circuit primaire P du transformateur T est intercalé dans l'un des feeders F , à la sortie de la station; il est donc parcouru par le courant total I_1 de la distribution sur ce circuit.

Le courant I_2 , du secondaire S, proportionnel au courant primaire, traverse une résistance artificielle R_2 reliée aux bornes N, M de cette bobine. La différence de potentiel aux extrémités de la résistance, se confond nécessai-

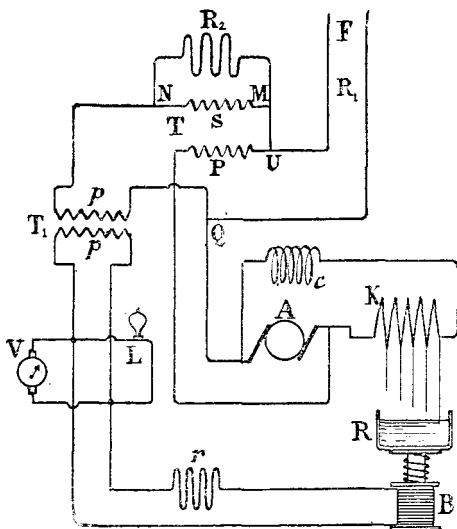


FIG. 342. — Régulateur Ganz.

rement avec celle qui se développe aux extrémités communes de la bobine S, elle dépendra donc uniquement de la résistance R_2 que l'on réglera de telle sorte que la tension secondaire soit précisément égale à la chute de potentiel qui se produit dans le couple de feeders considéré :

On aura donc, en désignant par R_2 la résistance des feeders, la relation,

$$R \times I_2 = R_1 \times I_1$$

ou :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Comme les courants secondaire et primaire de l'égalisateur restent en rapport constant et que la résistance des feeders est d'ailleurs constante, on voit que R_2 est lui-même invariable et qu'on n'aura à régler cette résistance qu'une fois pour toutes. Dans ces conditions, la différence de tension aux bornes M, N sera bien égale à la chute de tension sur les feeders, et cela pour toutes les valeurs de I_1 puisque l'on aura dans tous les cas l'égalité ci-dessus entre ces deux tensions.

Si l'on réunit la borne N à la borne Q du feeder de droite, il suffira d'opposer la force électro-motrice secondaire de l'égalisateur à celle de la dynamo, pour que la différence de potentiel entre les points Q et N corresponde exactement à celle qui existe dans la boîte de raccord des feeders avec le réseau. On voit en effet que la tension entre Q et U, aux bornes des feeders, est sensiblement égale à la tension de la dynamo, mais que la tension opposée de S se retranche au point N.

Les points N et Q sont donc identiques aux bornes des boîtes d'extrémité des feeders, au point de vue électrique ; on en profite pour insérer entre ces points le primaire du transformateur réducteur T qui doit alimenter à tension réduite, un voltmètre V et une lampe L témoin de la constance de la tension sur le réseau.

Le courant secondaire du réducteur traverse un solénoïde B qui attire un noyau portant une cuvette à mercure dont le poids est équilibré par un ressort ; ce courant dérivé de la bobine secondaire est réglé par un rhéostat r . Dans le mercure plongent des fils de longueurs différentes, permettant de mettre en court circuit une fraction plus ou moins grande des résistances K, insérées dans le circuit excitateur c de la dynamo.

Si la chute de tension dans les feeders augmente, la tension aux bornes N, Q du réducteur diminue, il en est de même de la tension et du courant dans le circuit du secondaire comprenant le solénoïde B ; l'attraction exercée sur le noyau de fer doux devient plus faible, la cuve remonte sous l'action du ressort et immerge une ou plu-

sieurs tiges du rhéostat K; un certain nombre de sections de la résistance sont ainsi mises hors circuit et le courant d'excitation augmentant, détermine un accroissement de la force électro-motrice de la dynamo, qui compense l'excès de chute de tension.

Le système maintient donc ainsi, d'une manière automatique, la différence de potentiel constante aux extrémités des feeders, comme il convient.

La figure schématique suppose que la dynamo est auto-excitatrice; il faut donc imaginer que le courant excitateur a été préalablement redressé, avant d'être lancé dans les enroulements inducteurs.

DISPOSITIF DE KAPP. — Nous avons déjà expliqué le rôle des transformateurs éleveurs de tension, destinés à

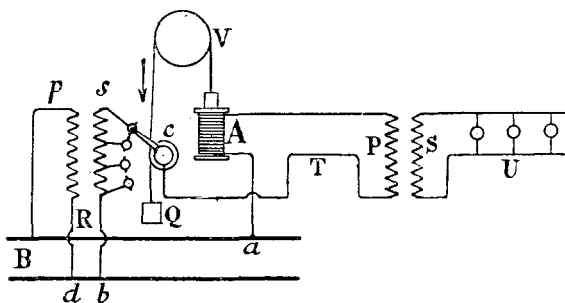


FIG. 343. — Élévateur de tension à régulateur automatique.

compenser les chutes de tension dans les circuits primaire et secondaire. La disposition indiquée peut être complétée par un système opérant le réglage automatiquement (fig. 343).

À cet effet, le commutateur c, qui doit introduire successivement dans le circuit primaire principal les diverses sections du secondaire du transformateur régulateur R, porte sur son axe une poulie, sur laquelle s'enroule l'un des brins du fil de suspension du noyau pénétrant dans le solénoïde A; ce fil passe d'ailleurs sur la poulie V.

Le solénoïde A est en série sur le circuit primaire prin-

cipal T, il reçoit donc le courant total qui traverse également les diverses sections du secondaire de R.

Lorsque la charge diminue sur le circuit secondaire d'utilisation, la tension tend à s'élever dans les circuits; en même temps un courant moins intense passe dans le solénoïde A et le contre-poids Q l'emporte sur l'attraction qui s'exerce sur le noyau; la poulie c est alors entraînée dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et le commutateur se déplace de haut en bas en éliminant un certain nombre des sections secondaires du circuit T; la tension se trouve ainsi ramenée au taux normal dans ce circuit.

207. **Mesures de sécurité.** — La raison d'être de la transformation est avant tout de soustraire les personnes qui utilisent le courant secondaire aux dangers résultant de l'approche et du contact des circuits primaires à haut potentiel.

Il faut donc, en premier lieu, isoler ces deux circuits par un diélectrique d'une épaisseur convenable, 8 à 10 millimètres au moins, afin de prévenir dans la mesure du possible une communication électrique accidentelle entre les circuits primaire et secondaire.

Malgré ces précautions il faut toujours prévoir un contact fortuit entre ces circuits. Si l'enroulement de la bobine secondaire vient, par suite d'un défaut d'isolement, se mettre en relation conductrice avec la bobine primaire, il prendra à l'endroit du défaut le potentiel primaire du point de contact; il en résultera qu'une personne venant toucher le circuit secondaire, se trouvera soumise à ce potentiel plus ou moins atténué, suivant que le défaut sera plus ou moins accentué. En d'autres termes, si le contact était parfait, entre les deux circuits, tout se passerait comme si la personne avait touché directement le circuit primaire.

Or, ce circuit ne peut pas être pratiquement isolé de la terre sur toute son étendue, d'une manière absolue; un circuit se fermera donc par l'intermédiaire de la personne placée entre le secondaire et la terre générale du primaire.

Le dispositif le plus simple qui peut être mis en œuvre pour prévenir ce danger consiste à interposer entre les enroulements primaire et secondaire une feuille métallique, sectionnée pour éviter le courant de Foucault et mise en communication avec la terre. Si l'isolement du primaire est accidentellement détérioré, le point défectueux est ainsi réduit au potentiel de la terre et la tension ne peut s'élever, par conséquent, dans le circuit secondaire.

Il est évident que ce moyen ne peut remédier aux contacts se produisant sur les conducteurs, en dehors des enroulements du transformateur. Pour réduire, dans

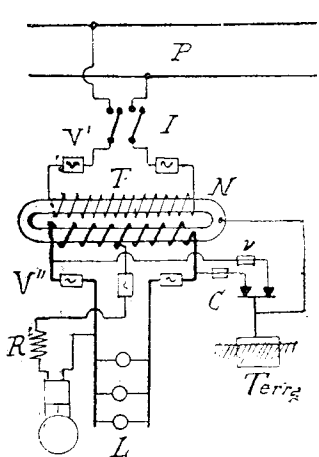


FIG. 344. — Dispositif de sécurité dans l'installation d'un transformateur.

tous les cas, au potentiel du sol, l'état électrique du point de contact, il suffit de relier d'une manière permanente à la terre, un point quelconque du circuit secondaire. Cette disposition a toutefois l'inconvénient de doubler les chances de court-circuit sur le secondaire, car il suffit d'une terre accidentelle en un autre point de l'enroulement pour que le circuit se complète par la terre et donne lieu à un courant de court-circuit plus ou moins intense.

On voit que ce défaut tient à la permanence de la terre établie sur le secondaire ; on remédiera donc à cet inconvénient, en adoptant un dispositif qui puisse établir la terre protectrice au moment seulement où se produira le contact accidentel redouté.

Pour remplir ce but, la Société Thomson-Houston a imaginé la disposition suivante (fig. 344). Des bornes du

circuit secondaire partent deux fils qui se terminent par des boutons métalliques C, lesquels s'appuient sur une plaque conductrice en communication permanente avec la terre, mais cette plaque est néanmoins isolée des boutons C par une feuille de papier paraffiné, très mince.

Tant que la tension secondaire est normale, la tension entre les boutons et la terre n'est pas suffisante pour perforer le papier, mais lorsque la tension s'élève par suite d'un défaut d'isolement, le courant se fait jour à travers la feuille isolante pour se fermer par la plaque C et la terre, et le secondaire est mis en court-circuit par l'intermédiaire de la plaque conductrice ; au courant en résultant dans la bobine de basse tension, correspond un courant intense dans l'enroulement primaire qui provoque la fusion des fils fusibles de sécurité V' et met ainsi le transformateur hors circuit.

Dans la disposition indiquée, on a mis également à la terre le noyau N du transformateur ; c'est un moyen analogue à celui qui consiste à séparer les enroulements par une cloison métallique reliée à la terre.

La figure représente d'ailleurs l'installation générale d'un transformateur ; l'interrupteur bipolaire qui opère la jonction du circuit de haute tension avec la bobine primaire ; les coupe-circuit de sécurité V' et V'' qu'il ne faut jamais manquer d'installer sur les deux pôles du primaire et du secondaire ; enfin les lampes à incandescence L en dérivation sur les conducteurs partant des bornes secondaires, et une lampe à arc munie de sa résistance supplémentaire R, branchée en dérivation sur l'un des conducteurs d'une part et sur le milieu de l'enroulement secondaire d'autre part.

Les coupe-circuit destinés à être placés sur les circuits à haute tension doivent présenter des fils assez longs, tendus entre des bornes suffisamment écartées pour éviter, après la fusion du fil, la production d'arcs permanents qui maintiendraient le courant que l'on veut supprimer. Généralement, pour plus de sécurité, ces fils sont enfermés dans des tubes ou, comme dans le système Ferranti,

passent dans des blocs de faïence qui interrompent et éteignent l'arc voltaïque de rupture.

Il convient de ne pas relier entre eux les groupes de conducteurs distributeurs alimentés par des feeders distincts, afin d'éviter qu'un contact accidentel sur l'une des sections ne fasse sentir son effet sur tout le réseau. D'autre

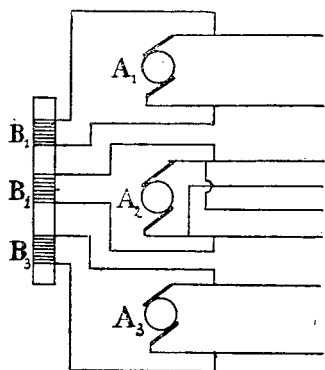


FIG. 345. — Alternateurs en dérivation sur un noyau inducteur.

part, cette mesure a pour résultat de laisser sans alimentation les couples de distributeurs desservis par des machines qui viendraient accidentellement à manquer.

Pour remédier à cet inconvénient, Swinburne a proposé de relier les alternateurs A (fig. 345) en dérivation, à autant de bobines B enroulées sur un noyau magnétique, formant une sorte de transformateur.

Si l'alternateur A_1 , par exemple, ne fournit plus de courant, la bobine B_1 qui lui correspond joue le rôle de circuit secondaire par rapport aux autres bobines et les feeders correspondant à l'alternateur hors service sont alimentés par induction mutuelle, jusqu'à ce qu'on ait pu remplacer la machine.

Transformateurs à courants continus.

208. **Transformateurs rotatifs.** — Ce que nous avons dit précédemment, au sujet des transformateurs rotatifs à courants alternatifs, s'applique également aux courants continus. On peut donc employer, pour effectuer la transformation, deux machines distinctes, l'une récep-

trice reliée au circuit à haute tension, et jouant le rôle de moteur, l'autre actionnée par la première et engendrant le courant d'utilisation à basse tension.

Au lieu d'employer deux machines séparées, on peut établir les deux armatures sur le même arbre et même réunir les deux enroulements induits sur une seule armature pourvue de deux collecteurs: le nombre des spires de chaque enroulement doit être proportionnel aux voltages et les sections des fils au nombre d'ampères afférent à chacun des circuits.

Les bobines de l'enroulement primaire à fil fin alternent sur l'induit avec celles de l'enroulement secondaire à gros fil; les premières sont reliées au collecteur de droite, par exemple, le second groupe au collecteur de gauche.

L'induit portant les deux enroulements tourne à l'intérieur d'un inducteur unique, qui est excité soit par le courant primaire, soit par une dérivation prise sur l'enroulement à basse tension.

Un pareil système ne présente pas de réaction d'induit sensible, les deux enroulements produisant des inductions opposées qui s'équilibrent dans le noyau de fer de l'armature; il en résulte que le calage des balais n'a pas besoin d'être modifié.

Le rendement d'un pareil système est notablement inférieur à celui des transformateurs fixes pour courants alternatifs. Alors que ceux-ci donnent facilement une utilisation de 96 pour 100, les transformateurs à courants continus ne dépassent guère un rendement de 80 pour 100 à pleine charge et de 75 à demi-charge.

Il convient de remarquer également que la juxtaposition d'enroulements primaire et secondaire sur une armature mobile est un élément d'insécurité que l'on ne rencontre pas dans les transformateurs fixes; aussi ces appareils doivent-ils faire l'objet d'une surveillance attentive, en vue d'éviter un contact accidentel entre les deux enroulements, ce qui porterait le circuit secondaire à la tension dangereuse du circuit primaire.

209. Accumulateurs. — Le véritable appareil de transfor-

mation des courants continus est l'accumulateur, qui porte aussi le nom de *pile secondaire*. Dans cet appareil, l'énergie électrique ne s'emmagasine pas, à proprement parler, comme dans le condensateur, sous forme d'électricité statique, mais bien sous forme d'énergie chimique qui se développe à l'intérieur du transformateur, pendant le passage du courant primaire de charge. Cette énergie chimique est susceptible de se transformer, par des réactions inverses, en énergie électrique restituée pendant la décharge au circuit secondaire d'utilisation.

La force électro-motrice du courant de décharge d'un accumulateur est le résultat de phénomènes de polarisation analogues à ceux qui se produisent dans les piles hydro-électriques.

On sait que le courant de ces piles est dû aux réactions chimiques qui s'effectuent dans ce milieu et qui consistent en des décompositions et combinaisons des corps composés entre eux. Ainsi dans la pile Daniell, l'eau est décomposée en oxygène et hydrogène; l'oxygène se combine avec le zinc pour former du sulfate d'oxyde de zinc et l'hydrogène se porte sur le cuivre qu'il recouvre d'une légère gaine gazeuse.

On constate alors le phénomène de polarisation qui est dû à la tendance que montre l'hydrogène à se recombier avec l'oxygène, par une réaction inverse de la première, d'où résulte une force contre-électro-motrice, qui serait capable de produire un courant de sens contraire, si la force électro-motrice principale n'était pas prépondérante.

Les phénomènes de réversibilité dus à la polarisation sont mis clairement en évidence dans l'expérience du voltamètre à électrodes de platine. On constitue un circuit (fig. 346) comprenant en série avec le voltamètre V, un galvanomètre G et une pile P; un commutateur C permet de fermer le circuit du voltamètre, soit sur la pile, soit sur un fil de dérivation n b , suivant que C est porté sur le plot a ou sur le plot b .

Dans la première position du commutateur, le courant

de la pile traverse le voltamètre dans le sens de la flèche en trait plein et décompose l'eau acidulée en oxygène et hydrogène que l'on recueille respectivement dans deux éprouvettes O et H. Après quelques instants de fonctionnement, on porte le commutateur en *b*, ce qui met la pile hors circuit et l'on constate, à l'aide du galvanomètre, qu'il se produit un courant de sens inverse de celui qui venait de la pile et avait produit la décomposition de l'eau,

Ce courant, dirigé dans le sens de la flèche en pointillé, ne peut provenir évidemment que du voltamètre, il est le

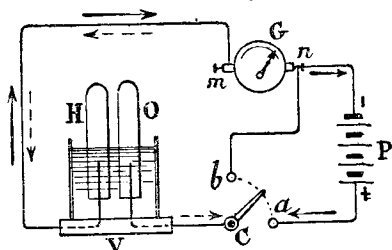


FIG. 346. — Décomposition de l'eau dans le voltamètre.

fait d'une force électro-motrice développée par la reconstitution des éléments de l'eau, qui se combinent de nouveau, ainsi qu'on le constate par la disparition progressive des gaz emplissant les éprouvettes.

Le voltamètre est donc un véritable accumulateur, capable de fournir, après un temps plus ou moins long, un courant électrique développé par la force électro-motrice de polarisation ; mais un semblable appareil ne serait susceptible d'aucun emploi réellement pratique.

Les accumulateurs industriels sont généralement constitués par des électrodes, formées de lames de plomb immergées dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique.

210. Accumulateur Planté. — C'est à Gaston Planté que l'on doit le premier accumulateur pratique, qui fut construit par l'inventeur en 1860. Cet appareil est constitué par deux feuilles de plomb séparées par des bandes de caoutchouc et roulées ensemble en spirales concentriques, puis plongées dans un vase cylindrique contenant de l'eau acidulée à 10 pour 100 d'acide sulfurique.

On voit sur la figure 347 les bandes de caoutchouc C C'

en saillie sur les bords des feuilles de plomb. Celles-ci sont soudées respectivement aux lames de cuivre M, M' auxquelles sont rattachés les deux éléments de pile Bunsen représentés à gauche du dessin. La lame M est

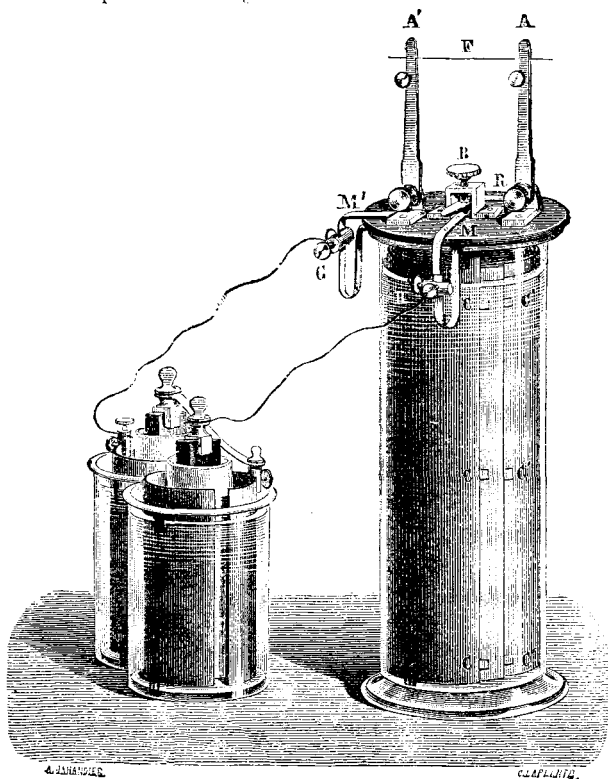


FIG. 347. — Pile secondaire de Planté.

surmontée d'un ressort R qui, sous la pression d'une vis B, vient se mettre en contact avec elle et ferme ainsi le circuit par les pinces A et A' et le fil F, destiné à rougir et même à fondre par le passage du courant.

FORMATION. — Quand il vient ainsi d'être construit, l'accumulateur ne peut être utilisé et il doit d'abord être soumis à l'opération de la *formation*.

Voyons d'abord ce qui se passe au sein de l'appareil quand il est traversé par le courant de charge. A ce moment, l'eau acidulée est décomposée en oxygène qui se porte sur le pôle positif, celui en relation avec le pôle positif de la source, et s'unit au plomb, pour former à la surface une couche de peroxyde à teinte brune caractéristique, tandis que l'hydrogène se porte sur l'électrode négative et se dégage.

Quand, après une charge plus ou moins prolongée, la couche de peroxyde atteint une certaine épaisseur, la partie profonde du métal est protégée et n'est plus attaquée, l'oxygène ne peut plus se combiner et se dégage également sur la lame positive.

On arrête alors le courant de charge et si l'on réunit les électrodes par un conducteur tel que le fil F, il se produit un courant de sens opposé au premier, accompagné d'une réaction inverse. En effet, il se dégage au pôle positif de l'hydrogène qui réduit le peroxyde et le transforme en protoxyde de plomb, lequel peut alors se combiner avec l'acide sulfurique pour former du sulfate de plomb. Il se produit au contraire de l'oxygène au contact de la plaque négative, qui oxyde cette plaque et la rend propre à être également sulfatée.

Après la charge, la plaque positive est donc à l'état de peroxyde de plomb brun, la négative à l'état de plomb métallique ; tandis qu'après la décharge les deux plaques sont sulfatées, c'est-à-dire recouvertes de sulfate de plomb à la surface.

Ensuite d'une première opération, la couche de peroxyde formée pendant la charge est très peu profonde ; il en est de même des couches de sulfate, après la décharge. Si l'on fait passer une nouvelle charge à travers les plaques sulfatées, c'est-à-dire après une première décharge, le sulfate de plomb se retransforme sur la plaque positive en peroxyde de plomb, en libérant l'acide

sulfurique qui vient augmenter la densité du liquide ; le sulfate de plomb de la plaque négative se réduit à l'état de plomb métallique, de telle sorte que les deux plaques reprennent finalement l'état de la première charge.

Toutefois, la couche de peroxyde est plus profonde à la fin de cette seconde charge, car l'oxygène qui l'a formée a agi sur le sulfate de plomb provenant de la réduction de la première couche de peroxyde qui est par conséquent poreuse et se laisse pénétrer plus aisément par l'action chimique. Il en est de même de la plaque négative qui est le siège d'une réduction de sulfate de plomb et qui donne lieu à un dépôt pulvérulent de plomb, plus sensible que la surface métallique primitive aux nouvelles réactions chimiques.

Il en résulte que la charge aura un effet plus prolongé et pénétrera plus avant dans les plaques, sous forme de combinaisons ou de réductions chimiques ; la décharge donnera lieu par suite à un courant plus abondant ou de plus longue durée.

En reproduisant un grand nombre de fois des charges et décharges consécutives, on arrive à former des couches de peroxyde ou de plomb spongieux de plus en plus épaisses et par suite à obtenir des plaques présentant une *capacité électrique* de plus en plus grande, parce qu'elles contiennent des matières actives propres à subir les réactions nécessaires, en quantité plus notable. On dit alors que l'accumulateur est *formé*. A l'état neuf, l'accumulateur n'emmagasinerait qu'une faible charge et il ne restituerait qu'un faible courant et qu'une fraction minime de l'énergie emmagasinée.

Cette formation exige beaucoup de temps et de dépenses d'énergie pour les charges et décharges successives, faites ainsi en pure perte. On peut rendre l'opération plus rapide, en chauffant le liquide de l'accumulateur ou en décapant au préalable, pendant vingt-quatre heures, les lames de plomb, dans un bain d'acide nitrique étendu de son volume d'eau ; dans ces conditions, une petite quantité de plomb se dissout et le métal acquiert ainsi

la porosité qui favorise les actions chimiques ultérieures.

ACCUMULATEUR FAURE-SELLON-WOLCKMAR. — Nous avons vu que la formation des accumulateurs avait pour effet de recouvrir la plaque positive d'une couche plus ou moins profonde de peroxyde de plomb. En 1881, Faure eut l'idée de diminuer la durée de la période de formation, en recouvrant d'avance les lames positives de minium et les lames négatives de litharge. Ces oxydes de plomb sont appliqués sur les plaques, à l'état de pâte malaxée avec une solution sulfurique qui transforme partiellement l'oxyde en sulfate.

Il suffit alors d'une seule charge prolongée pour amener le sulfate à l'état de peroxyde, sur l'électrode positive et de plomb réduit spongieux, sur l'électrode négative.

Les plaques de cet accumulateur sont planes et ajourées : elles se présentent sous forme de grille, constituée par une carcasse de plomb renfermant 6 à 7 pour 100 d'antimoine. Les vides des grilles sont remplis avec la pâte de bioxyde de plomb et de litharge.

Chaque accumulateur est composé d'un certain nombre de plaques parallèles, alternativement positives et négatives, formant deux groupes dont les éléments sont réunis par des barres, soudées avec soin aux appendices qui surmontent les plaques et formant les pôles de la pile secondaire.

CHARGE ET DÉCHARGE DES ACCUMULATEURS. — Les éléments d'une batterie d'accumulateurs, soit pour la charge, soit pour la décharge, sont accouplés de la même manière que les éléments d'une batterie de piles. L'ensemble présente donc deux pôles extrêmes que l'on réunit pour la charge, respectivement aux pôles de la source d'électricité ; chacun des pôles de l'accumulateur prend le nom de celui de la source auquel il est réuni.

On ne doit pas charger avec un courant trop intense, les réactions seraient trop vives, et, dans ce cas, le peroxyde de plomb formé adhère mal sur la plaque ; il se détache, tombe au fond du vase où il forme des boues

qui, reliant les plaques de polarité différente, les mettent en court-circuit et déterminent des courants intérieurs qui amènent rapidement la destruction de l'accumulateur.

Le courant limite de charge est généralement indiqué par le constructeur; faute d'instruction à cet égard, on ne dépassera pas 0,75 ampère par kilogramme du poids des plaques composant un élément; une batterie composée par exemple d'éléments de 40 kilogrammes devra être chargée au régime de 30 ampères.

Pour décharger la batterie, on la sépare de la source et l'on rattache ses deux pôles aux extrémités de la ligne sur laquelle on veut utiliser le courant et qui traverse les différents appareils d'utilisation, lampes, moteurs, électrolytes.

Il ne faut pas décharger trop vite les accumulateurs par les mêmes raisons que pour la charge; les couches de sulfate non adhérentes se détacheraient et les plaques détériorées seraient mises rapidement hors de service; le régime maximum de décharge est aussi indiqué par le constructeur, sinon on ne dépassera pas 1 ampère par kilogramme de plaques constituant un élément.

Pour se rendre compte des particularités de la charge, il ne faut pas perdre de vue que l'accumulateur est un récepteur à réaction, qui oppose à la force électro-motrice extérieure de charge une force électro-motrice antagoniste qui va en croissant de zéro à un maximum de 2,5 volts environ par élément, de l'origine à la fin de la charge.

Il faut donc que la dynamo, montée par le fait en opposition de tension sur le circuit des accumulateurs, ait un voltage toujours supérieur à celui de la batterie et, pour cela, que sa tension augmente au fur et à mesure de la charge. S'il en était autrement, la batterie se déchargerait dans la dynamo, dont les enroulements pourraient être brûlés, surtout s'il s'agissait d'une dynamo à excitation série ou compound. Dans ce cas, en effet, les enroulements série de l'excitation étant traversés par le courant des accumulateurs de sens inverse au courant normal, la polarité des inducteurs est renversée et la force électro-motrice de la dynamo changeant de sens, s'ajoute en ten-

sion dans le circuit, à celle de la batterie : le courant de décharge prend alors une intensité telle que les enroulements de la dynamo sont infailliblement détruits.

Il faudra donc employer pour la charge des accumulateurs des dynamos schunt, dont l'inducteur en dérivation est toujours traversé par un courant de même sens, que celui-ci sorte de la dynamo auto-excitatrice ou qu'il provienne d'une source extérieure, soit notamment des accumulateurs. S'il se produit alors une diminution fortuite de la force électro-motrice de la dynamo, par suite par exemple d'une réduction de vitesse, au moment du démarrage plus particulièrement, le courant de décharge pourra pénétrer dans la dynamo, mais il aura toujours à lutter contre la force antagoniste de celle-ci et ne pourra pas généralement prendre une intensité dangereuse ; il suffira d'ailleurs, dès que l'on s'en apercevra, d'augmenter la vitesse de rotation ou l'excitation du champ magnétique, pour que le régime de charge normal de la dynamo soit rétabli.

Il résulte de ces considérations, que le courant de charge éprouvant de la part de l'accumulateur une opposition croissante avec sa force électro-motrice antagoniste, tend à diminuer de plus en plus. Si donc l'on veut, en vue de réduire le temps de l'opération notamment, effectuer la charge à intensité constante, on devra faire varier la force électro-motrice de la dynamo, suivant la même progression croissante.

La force électro-motrice de la dynamo doit vaincre non seulement la force contre-électro-motrice de l'accumulateur, mais encore la résistance intérieure des éléments de la batterie ; celle-ci occasionne une chute de tension proportionnelle à l'intensité du courant de charge.

Soit, par exemple, à charger au régime de 50 ampères, une batterie d'éléments ayant chacun une résistance intérieure de 0,003 ohm, la tension que la dynamo devra atteindre pour chaque élément en série, sera au moins :

$$e = 2^v, 5 + 0,003 \times 50 = 2,65.$$

Il convient même que la tension totale de la dynamo

soit toujours supérieure de quelques volts à celle de la batterie, pour n'avoir pas à craindre le renversement de l'équilibre des tensions et pour surmonter également la résistance des conducteurs de connexion.

Généralement les dynamos employées à la charge des accumulateurs doivent aussi servir, dans la soirée, à l'alimentation directe de l'éclairage ; il faut donc qu'elles soient capables de fonctionner convenablement aux tensions différentes de 110 à 150 volts, par exemple, qui conviennent soit au circuit d'éclairage, soit au circuit de charge des accumulateurs.

Des dynamos qui ne seraient pas appropriées à cette destination particulière, donneraient des étincelles aux balais à pleine charge, si l'induction était trop faible à la tension réduite de 110 volts, car la réaction d'induit deviendrait alors prépondérante ; elles se désamorceraient aussi à ce régime, pour la moindre variation de vitesse ou de charge, si la tension de 110 volts correspondait à une induction trop voisine du point critique (tome I, § 137).

SURVOLTEUR. — On peut remédier dans tous les cas à l'insuffisance de voltage de la dynamo ou du circuit de dis-

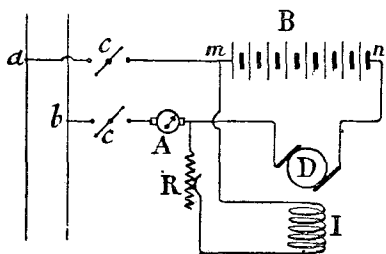


FIG. 348. — Charge au moyen d'une dynamo auxiliaire.

tribution utilisé pour la charge, en employant une dynamo auxiliaire *D* de faible puissance, dont l'induit est inséré en série sur le circuit des accumulateurs *B* (fig. 348).

La dynamo est actionnée par la transmission générale

de l'usine ; l'inducteur est en dérivation sur les conducteurs de distribution et l'excitation est par suite indépendante des variations de tension de la dynamo. Si la différence de potentiel est de 100 volts par exemple en *a* et *b* et si la dynamo auxiliaire doit fournir 40 volts, ces deux

tensions s'ajouteront dans le circuit de charge et produiront la différence de potentiel voulue de 140 volts aux bornes *m* et *n* de la batterie.

L'enroulement induit doit être suffisant pour livrer passage au courant de charge total qui le traverse, mais la puissance de cette machine auxiliaire est relativement faible puisqu'elle a seulement pour valeur le produit du courant de charge par la tension supplémentaire de 40 volts.

L'installation comporte en outre un interrupteur *C* sur chaque pôle, un ampèremètre *A* pour constater l'intensité du courant de charge et un rhéostat *R* servant à régler l'excitation et, par suite, le voltage supplémentaire de la dynamo auxiliaire.

SECTIONNEMENT DE LA BATTERIE. — On peut effectuer la charge d'une batterie avec une dynamo de force électro-

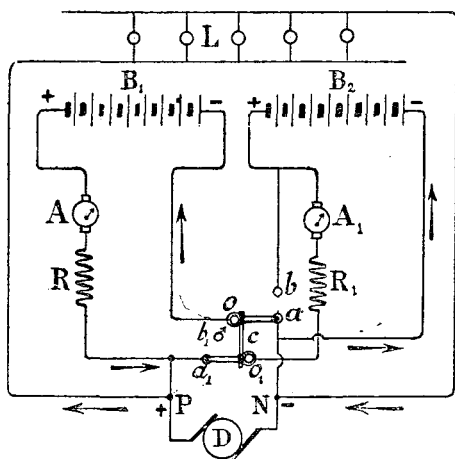


FIG. 349. — Charge d'une batterie divisée en deux sections.

motrice notablement inférieure à la tension qui serait opposée par l'ensemble des éléments en série; en adoptant la disposition indiquée par la figure 349.

La batterie est divisée en deux sections égales B_1, B_2 qui sont couplées en quantité sur les bornes P, N de la dynamo génératrice, pendant la période de charge. La force contre-électro-motrice des accumulateurs est ainsi réduite de moitié, mais la tension de la dynamo est alors généralement trop forte; il faut donc insérer des rhéostats R réglables sur les dérivations de chacune des deux batteries, pour absorber la tension en excès; ces résistances permettent en même temps de régler l'intensité du courant de charge de manière à répartir celui-ci également dans chaque section.

Pour la décharge il faut découpler les batteries et les relier en série pour obtenir la tension nécessaire à l'alimentation des lampes L. On peut opérer facilement cette manœuvre à l'aide d'un commutateur c à deux directions; en faisant jouer cet appareil à l'aide de la barre articulée qui réunit les deux bras $oa, o_1 a_1$ mobiles autour des axes o et o_1 , on sépare d'abord les deux pôles positifs des demi-batteries en a_1 , et l'on relie en b les pôles intermédiaires de nom contraire. Les flèches indiquent le sens des courants de la dynamo et de la batterie, pendant la décharge où ces deux courants viennent concourir et se déverser sur le circuit extérieur d'utilisation des lampes.

CHARGE A POTENTIEL CONSTANT. — A la fin de la charge, c'est-à-dire lorsque l'action chimique ne peut pas attaquer la plaque plus profondément, l'oxygène et l'hydrogène résultant de la décomposition de l'eau se dégagent au sein du liquide, sous forme de petites bulles très nombreuses qui donnent à la masse une apparence laiteuse; si la charge se prolonge, ces bulles augmentent de grosseur et viennent crever à la surface. Si l'on approche une allumette enflammée à la surface du liquide, les bulles contenant un mélange détonant d'oxygène et d'hydrogène éclatent avec bruit.

Il vaut mieux d'ailleurs s'abstenir de cet essai et surtout se garder d'enflammer les mélanges gazeux qui s'accumulent dans les vases clos à la partie supérieure, il pourrait en résulter de graves accidents.

Bien que l'apparition des bulles soit un indice de la fin de la charge, il faut, pour que l'opération soit complète, prolonger encore l'opération pendant une demi-heure environ : on peut craindre alors que l'intensité constante du courant de charge, soit trop élevée à ce moment et risque de détériorer les plaques.

On n'a pas à redouter cette éventualité avec le système de charge à potentiel constant. Il consiste à effectuer la charge à une tension invariable, soit par exemple de 2,3 volts par élément. Dans ces conditions, le courant prend au début une grande intensité, de 8 à 10 ampères par kilogramme, qui se réduit de plus en plus, à mesure que la force contre-électro-motrice des accumulateurs s'accroît, du fait de la charge.

Il est à remarquer que cette grande intensité du courant de charge, au début de l'opération, n'est pas nuisible à la conservation des accumulateurs, car elle trouve à ce moment les plaques dans un état moléculaire qui favorise tout spécialement les réactions chimiques. Vers la fin de la charge au contraire, les plaques ne pourraient supporter sans dommage un pareil régime, mais nous savons qu'à ce moment le courant est notablement réduit. Il s'annule même totalement lorsque la tension de chaque élément à atteint 2,5 volts et cette circonstance définit clairement la fin de la charge.

La charge à potentiel constant présente certains avantages qu'il convient d'énumérer brièvement.

En premier lieu, grâce à la grande intensité du courant de charge à l'origine, la batterie peut emmagasiner 85 pour 100 de la charge totale en quatre heures, et 50 pour 100 dès la première heure, alors que la charge complète, qui demande toujours à peu près le même temps dans les deux systèmes de charge, exige environ huit heures. Cette considération a sa valeur quand, pour une application déterminée, on n'a pas besoin de pousser la charge jusqu'au bout.

En second lieu, d'après les considérations précédentes, on évite le dégagement des produits gazeux qui se manifeste

à la fin de la charge, dans le cas d'un courant d'intensité constante ; le courant tendant au contraire de plus en plus vers zéro, on évite la perte d'énergie résultant du travail d'électrolyse et l'on n'a pas à craindre de surcharger les accumulateurs, par une opération trop prolongée qui pourrait amener leur détérioration.

RENDEMENT ET CAPACITÉ DES ACCUMULATEURS. — Pratiquement on ne peut utiliser toute l'électricité emmagasinée dans les accumulateurs. En effet, au commencement de la décharge, la force électro-motrice est de 2,2 volts environ, puis elle baisse très rapidement à 2 volts où elle se maintient pendant une grande partie de la période de décharge, pour tomber ensuite avec plus ou moins de rapidité à 1,8.

A ce moment il convient d'arrêter la décharge, car le réglage de la tension sur le circuit d'utilisation n'est plus praticable et l'on arriverait vite à mettre les accumulateurs hors d'usage, si l'on poussait la décharge au delà de cette limite.

Mais le fait de ne pas épuiser totalement la provision emmagasinée dans le compteur ne constitue pas à proprement parler une perte, car cela revient à constituer une première mise de fonds, pour ainsi dire, qui sert indéfiniment et l'on n'a jamais qu'à restituer à la batterie, après chaque décharge, la différence entre la charge totale et le résidu non utilisé.

La perte réside en ce que l'on ne recueille pas en totalité la charge restituée à chaque opération, car les ampères-heure fournis à la batterie ne sont pas tous fixés ou rendus dans une quantité d'action chimique équivalente, soit par suite de la rapidité trop grande de la charge et de la décharge, soit par suite d'électricité dissipée dans l'électrolyse de l'eau et les dégagements gazeux, à la fin de la charge ; et, d'autre part, le débit à la décharge, sur le circuit d'utilisation, se fait à une tension inférieure à celle de la charge.

Il faut remarquer, en effet, que la tension dépensée pour la charge est la somme de la force électro-motrice antagoniste de la batterie et de la chute de tension intérieure

de celle-ci; tandis que la différence de potentiel utilisable aux bornes des accumulateurs, à la décharge, est égale à la force électro-motrice desdits, diminuée de la chute de potentiel intérieure.

On obtient donc finalement sur le circuit d'utilisation moins d'ampères-heures et moins de volts qu'on n'en a dépensé sur le circuit de charge.

Ainsi l'on appelle *rendement en quantité* d'un accumulateur, le rapport de la quantité d'électricité débitée par l'accumulateur à celle qui lui a été fournie; ce rendement est d'environ 85 à 90 pour 100.

Le *rendement en énergie* ou en watts est le rapport de l'énergie utilisée pendant la décharge, à celle qui a été dépensée pendant la charge, aux bornes de la batterie. Ce rendement dépend principalement du régime de charge et de décharge. Par des courants très faibles, il peut s'élever à 90 pour 100; mais à des régimes exagérés, il descendra facilement au-dessous de 50 pour 100; au régime normal indiqué par le constructeur, le rendement en énergie est de 80 à 85 pour 100.

La valeur industrielle des accumulateurs s'exprime le plus généralement par ce qu'on désigne sous le nom de *capacité utile*; c'est la quantité d'électricité exprimée en ampères-heures, qu'il peut fournir à débit constant, c'est-à-dire, pratiquement, jusqu'à ce que la différence de potentiel aux bornes soit descendue à 1,8 volt par élément.

On appelle de même *puissance utile* d'un accumulateur la quantité d'énergie électrique ou de watts-heures qu'il peut restituer durant la décharge utile, limitée à la tension de 1,8 volt aux bornes.

On peut admettre, comme chiffre moyen, que la capacité d'un accumulateur, par kilogramme de plaque de plomb, est de 10 ampères-heure et sa puissance utile de 20 watts-heure, aux régimes normaux de charge et de décharge.

211. Installation des accumulateurs à la station. — Les batteries d'accumulateurs doivent être établies en dehors

de la salle des dynamos, dans un local suffisamment aéré, afin que l'atmosphère ne soit pas chargée de vapeurs acides dangereuses à respirer et très corrosives pour les métaux qui s'y trouveraient exposés.

Chaque élément de la batterie doit être soigneusement isolé ; à cet effet les accumulateurs sont disposés sur des madriers en bois recouverts d'un vernis isolant de goudron et d'essence de térébenthine ; ils reposent d'ailleurs sur ces cadres par l'intermédiaire d'isolateurs en porcelaine. Il convient d'employer pour cela des isolateurs en deux parties formées, l'une d'un godet rempli d'huile lourde, l'autre d'un chapeau à gorge placé directement sous les bacs des accumulateurs.

Les plaques et le liquide excitateur ou électrolyte sont contenus dans des bacs de grès, d'ébonite ou de verre ; on en fait aussi souvent de bois doublé de plomb qui, lorsque le bois est bien sec, ont le double avantage d'être étanches et peu fragiles.

Les différentes plaques positives et négatives d'un élément sont respectivement reliées en quantité, par des barres de plomb soudées ou par des boulons ; les pôles des divers éléments sont reliés également par soudure ou par serrage à l'aide de boulons. La soudure est faite généralement de plomb pur chauffé au chalumeau oxyhydrique ; c'est ce qu'on appelle la *soudure autogène* de plomb sur plomb.

Le liquide excitateur est généralement composé d'un mélange de 8 à 9 parties en volume d'eau distillée et de 1 à 2 parties d'acide sulfurique pur, à 50 ou 66 degrés Baumé. Pour effectuer le mélange, on verse d'abord l'eau dans un vase de grès, de verre ou de porcelaine, puis on fait couler peu à peu l'acide, en brassant continuellement avec une baguette de verre.

On laisse refroidir le mélange qui s'échauffe pendant l'opération, puis on le verse avec précaution dans les bacs jusqu'à ce qu'il recouvre de 3 centimètres environ le bord supérieur des électrodes. La première charge doit suivre immédiatement l'immersion, si l'on veut éviter la sulfata-

tion des plaques, qui augmente la résistance intérieure des éléments et réduit notablement la capacité de la batterie.

L'installation est complétée par le circuit de charge constitué soit par des barres de cuivre fixées sur des supports isolants en porcelaine, soit par des fils ou câbles isolés.

L'emploi des accumulateurs comporte des opérations multiples, savoir : la charge, l'alimentation du circuit d'utilisation par les piles secondaires seules, l'alimentation simultanée de ce circuit par la batterie et la dynamo ; enfin, les choses doivent être disposées de manière à ce que le circuit d'utilisation puisse être également alimenté par la dynamo seule.

Pour arriver à ces fins, on doit employer divers appareils de sécurité et de manœuvre qui sont généralement groupés sur un tableau dit *de distribution*, placé dans la salle des dynamos.

L'ensemble de la disposition des circuits et des appareils est représenté dans la figure 350. La dynamo schunt, munie de son régulateur de champ, est reliée directement au tableau par le conducteur positif en trait plein et le conducteur négatif en pointillé ; les conducteurs positif et négatif de la batterie A sont indiqués de la même manière.

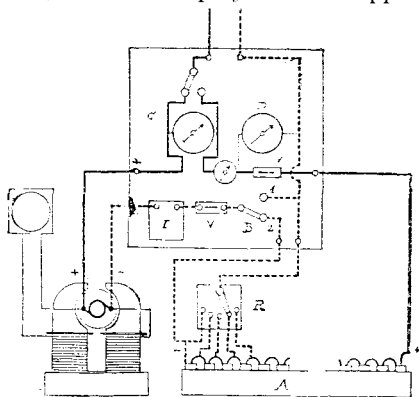


FIG. 350. — Installation du tableau des accumulateurs.

L'installation comprend : un ampèremètre *c* surmonté d'un commutateur qui, dans la position du dessin, déterminerait le passage du courant de décharge de la batterie à travers cet appareil de mesure : en portant la manette

du même commutateur sur la borne de droite de l'ampère-mètre, c'est le courant de la dynamo qui se trouve mesuré ;

Des coupe-circuit fusibles V, calculés pour interrompre le circuit dès que le courant tend à atteindre une intensité dangereuse :

Un disjoncteur automatique placé en I, qui a pour fonction de couper le circuit de charge, dès que la tension de la dynamo ayant baissé pour une cause quelconque, la différence de potentiel aux bornes de la batterie devient prépondérante et fait refluer le courant des accumulateurs vers la dynamo ;

Un réducteur R, destiné à faire varier en plus ou en moins le nombre des éléments en circuit, soit à la charge, soit à la décharge, afin de régler le voltage de la batterie suivant les besoins ;

Un voltmètre D, pour vérifier la différence de potentiel aux bornes de la batterie ;

Enfin, un commutateur B, qui permet d'insérer la batterie dans le circuit de la dynamo ou de l'en sortir, suivant que le bras mobile est porté sur le plot 2 ou sur le plot 1.

Dans le premier cas, le courant de la dynamo entre dans la batterie par la borne 2, mais il se bifurque au droit du réducteur R, en deux courants, dont l'un se rend aux lampes sur le circuit d'utilisation, et l'autre traverse la batterie tout entière pour la charger.

Si, au contraire, le manipulateur est placé sur le plot 1, la batterie étant chargée, celle-ci débite un courant qui vient s'ajouter à celui de la dynamo, au moment où le débit de celle-ci serait insuffisant pour alimenter le nombre total des lampes allumées sur le réseau.

A l'aide du réducteur R, on insère dans le circuit le nombre d'éléments supplémentaires voulu pour maintenir le voltage constant sur les distributeurs d'utilisation.

RÉDUCTEUR. — Les réducteurs d'éléments peuvent être établis simplement sur le circuit d'utilisation, ou présenter une disposition double pour la charge et la décharge comme il est indiqué dans la figure 351. L'appareil com-

porte deux séries de contacts et deux manipulateurs, l'un B' pour la charge, l'autre B pour la décharge.

On place le commutateur B sur un plot tel que le nombre des éléments en circuit sur les lampes donne une tension égale à la tension normale de distribution.

Pendant la charge, le manipulateur B' est manœuvré de manière à réduire progressivement le nombre des éléments

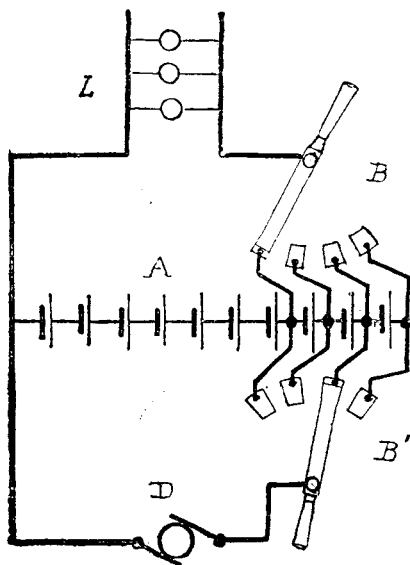


FIG. 351. — Réducteur double.

ments A sur le circuit de la dynamo ; finalement les deux manipulateurs se trouvent en communication avec le pôle d'un même élément, soit par exemple avec le dernier couple de contacts de gauche.

Pendant la période suivante de décharge, la tension des accumulateurs va décroissant de plus en plus, on ramène alors les deux manipulateurs vers l'extrémité de la batterie, afin d'augmenter le nombre des éléments en circuit.

On remarquera que le manipulateur B doit se trouver toujours à gauche, sinon vis-à-vis du manipulateur B', car s'il en était autrement, tous les éléments situés à droite de B' et compris entre les deux commutateurs, se trouveraient en série avec la dynamo sur le circuit d'utilisation, et se déchargeraient sous l'action des forces électromotrices combinées, avec une grande rapidité, ce qui mettrait ces éléments hors de service en peu de temps.

Il faut, dans tous les cas, que le passage du manipulateur d'un plot à un autre, se fasse de telle sorte que le circuit ne soit pas interrompu ; pour cela il est nécessaire que la lame frottante soit assez large pour ne pas abandonner un plot, avant d'être venue en contact avec le suivant. Il arrivera donc un moment où cette lame étant à cheval sur deux plots consécutifs, mettra l'élément d'accumulateur intermédiaire en court circuit.

Dans le cas d'accumulateurs à grande surface, l'élément en court circuit se déchargerait, en produisant un courant

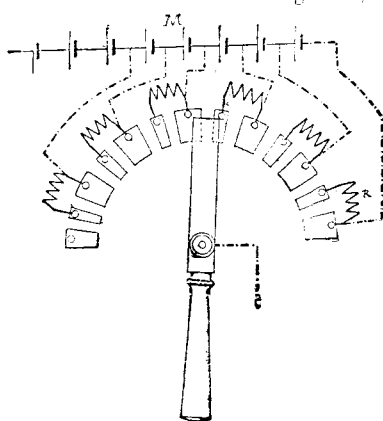


FIG. 352. — Réducteur à résistances entre les plots.

intense qui amènerait sa destruction très rapide. Pour éviter cet inconvénient, on intercale entre deux contacts consécutifs, un plot supplémentaire qui se relie à l'un des contacts voisins par une résistance disposée comme l'indique la figure 352. Dans la position indiquée du commutateur, le circuit particulier de l'élément se trouve fermé par l'une de ces résistances.

DISJONCTEUR AUTOMATIQUE. — Les appareils destinés à rompre automatiquement la communication entre les

dynamos et les accumulateurs, pour éviter que ceux-ci ne se déchargent accidentellement dans les machines génératrices, sont désignés, comme nous l'avons vu, sous le nom de disjoncteurs.

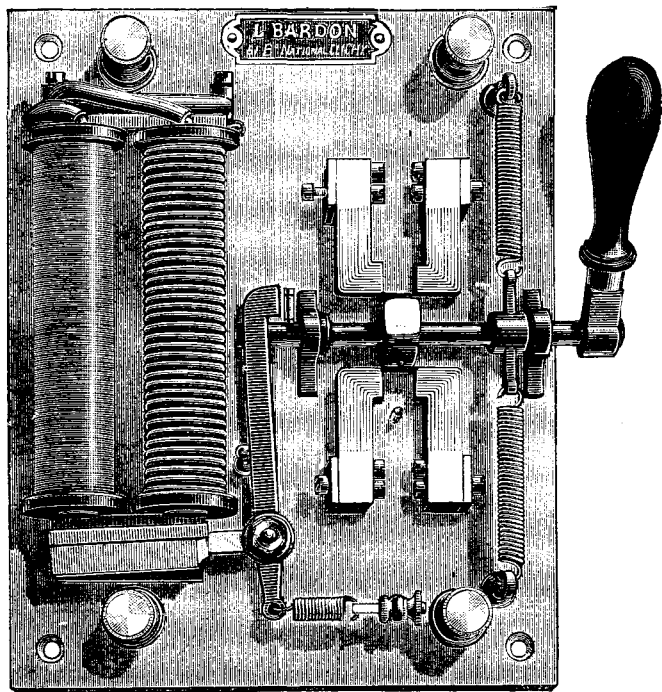


FIG. 353. — Disjoncteur Bardon.

Les modèles de disjoncteurs sont très variés, mais ils peuvent se classer suivant deux types, caractérisés par l'emploi du mercure d'une part, et de balais d'autre part, comme organes de fermeture du circuit.

Nous décrirons seulement, à titre d'exemple, le disjoncteur automatique Bardon représenté par la figure 353.

Cet appareil est un disjoncteur bipolaire à balais. Il se compose donc de deux paires de balais constitués par des lames de cuivre groupées en faisceau élastique ; entre les mâchoires formées par chaque groupe de balais, peuvent pénétrer, à frottement dur, deux pièces métalliques montées sur un noyau en matière isolante, fixé sur un axe. Celui-ci, commandé par une manette, est pourvu d'une traverse à laquelle viennent s'accrocher deux ressorts à boudin. Ceux-ci tendent à maintenir l'interrupteur dans la position d'ouverture ; quand on fait tourner l'axe en agissant sur la manette, les ressorts sont fortement bandés et exercent un effort suffisant pour arracher des mâchoires des balais les pièces métalliques qui y sont engagées.

Pour maintenir l'interrupteur dans la position de fermeture, il faut que la goupille fixée sur l'extrémité de gauche de l'axe, s'engage dans le cran ménagé à l'extrémité supérieure d'un levier coudé, dont la branche horizontale sert d'armature à un électro-aimant. La branche verticale se prolonge en dessous de l'axe de rotation, par un appendice où vient s'attacher un petit ressort antagoniste réglable.

L'électro-aimant a deux bobines : l'une en gros fil intercalée sur le conducteur positif, l'autre en fil fin dérivée sur les bornes de la dynamo.

Tant que le courant traverse les deux bobines dans le sens normal, l'armature est attirée et la goupille enclenchée à l'extrémité du levier maintient l'interrupteur en place ; mais, si par suite d'un ralentissement du moteur, de la chute ou du glissement d'une courroie de transmission, la force électromotrice de la dynamo devient inférieure à celle de la batterie, le courant de décharge des accumulateurs traverse les bobines en sens inverse et annule l'aimantation précédente. L'armature n'étant plus attirée, le levier obéit au ressort antagoniste et par son recul dégage la goupille ; l'axe devenu libre obéit au couple de rotation développé par les ressorts qui le commandent, et détermine par arrachement la rupture brusque du circuit.

Ce déclenchement est d'ailleurs facilité par l'action d'un pôle de nom contraire qui se développe à la partie inférieure du noyau de la bobine en dérivation et tend à repousser l'armature.

212. Entretien des accumulateurs. — Les batteries d'accumulateurs sont sujettes à des causes de détérioration nombreuses, qui tendent à réduire leur durée et à augmenter par suite les charges financières de leur emploi. Toutefois, si l'on suit exactement les instructions du constructeur et si l'on ne néglige aucun des soins d'entretien qu'indiquent la théorie et l'expérience, on peut compter sur une durée d'un an à dix-huit mois pour les plaques positives et une durée double pour les négatives.

La première condition est de ne pas dépasser le régime normal de charge et de décharge, assigné pour chaque type d'accumulateurs.

La densité de l'électrolyte à la fin de la charge ne doit pas dépasser 24 degrés Baumé; avec un degré plus élevé, les plaques se sulfatent, durcissent et donnent un rendement inférieur.

Les accumulateurs doivent être chargés journellement jusqu'au bouillonnement produit par le dégagement des bulles gazeuses : une légère surcharge consistant à prolonger quelque temps l'opération, après l'apparition du dégagement gazeux, ne fait qu'améliorer la batterie.

L'accumulateur doit être rechargé immédiatement après la décharge limitée au voltage de 1,8 volts par élément. On ne doit jamais laisser une batterie déchargée, et même l'abandonner chargée pendant une longue période, mais elle doit recevoir, en cas de repos, une charge complémentaire tous les huit jours au moins; on évitera ainsi la sulfatation des plaques.

Le niveau du liquide doit toujours dépasser de plusieurs centimètres le bord supérieur des plaques, afin que celles-ci ne soient pas exposées à l'oxydation de l'air; on le maintient à la hauteur normale par une addition d'eau distillée compensant l'évaporation.

Les oxydes formés à la surface des plaques, et notam-

ment les matières actives rapportées dans les accumulateurs du genre Faure, tendent à se désagréger et forment des dépôts boueux en tombant au fond des vases ; on devra veiller à ce que la couche déposée n'atteigne pas la base des plaques. Il peut également s'introduire des débris d'oxydes ou même des corps étrangers entre les plaques ; dans ces conditions, les plaques positives et négatives étant reliées intérieurement en court-circuit, l'élément se décharge sur lui-même et se trouve mis rapidement hors de service ; il faut donc enlever ces corps intercalés entre les plaques et nettoyer le récipient pour le débarrasser des boues, quand il est nécessaire.

Il convient d'ailleurs de démonter la batterie et de procéder à un nettoyage complet des vases et des plaques dans l'eau pure, tous les six mois au moins ; on décharge entièrement la batterie au préalable, et on la recharge dès qu'elle a été remontée.

On reconnaît que les plaques sont en bon état, lorsque, après la charge, les positives ont la couleur brun chocolat caractéristique du peroxyde puce de plomb, et les négatives la coloration grise du plomb métallique spongieux.

On doit vérifier fréquemment la densité de l'électrolyte d'une part, et la tension individuelle de chaque élément de la batterie, d'autre part.

La densité se vérifie à l'aide de flotteurs en verre, tels que l'aréomètre de Baumé ; cet instrument permet de suivre les progrès de la charge, puisque, pendant cette période, l'acide sulfurique en combinaison avec le sulfate des plaques est libéré et vient enrichir l'électrolyte, en augmentant sa densité. On peut considérer que la charge est terminée lorsque l'aréomètre accuse une densité de 1,18 à 1,20, ce qui correspond à 22,3 et 24 degrés Baumé.

Si l'on constate que la densité de l'électrolyte dans un élément est de 4 à 5 degrés inférieure à celle des autres après la charge, on le retirera du circuit pendant la décharge, et on le remettra en place pour subir une nouvelle charge avant d'être utilisé sur le circuit de décharge.

Pour vérifier la tension de chaque élément on relie les bornes d'un volt-mètre aux deux pôles de l'accumulateur lorsque la batterie est au repos ; si l'on opère après la charge, chaque élément doit accuser au volt-mètre une force électro-motrice de 2 volts ; si l'essai est fait après la décharge, la tension doit être au minimum de 1,8 volts.

Il peut arriver qu'une batterie doive rester plusieurs mois sans servir ; dans ce cas, il faut, après l'avoir chargée complètement, la démonter, essuyer les plaques positives à siccité et conserver les plaques négatives immergées dans les récipients contenant de l'eau pure.

Si, par suite de charges insuffisantes, d'électrolyte trop chargée en acide ou d'oxydation à l'air des plaques négatives, les électrodes sont fortement sulfatées, on soumettra les accumulateurs au traitement connu sous le nom de *bain d'hydrogène* ; il consiste à charger les éléments sulfatés dans une électrolyte d'eau légèrement acidulée et ne marquant que 2 à 3 degrés Baumé. Après cette opération, on reconnaît que les plaques négatives sont bien désulfatées, quand la matière active que le sulfate avait durcie, se laisse traverser facilement par une épingle.

On remplace ensuite le bain par l'électrolyte de densité normale, suivant les instructions du constructeur.

PROBLÈMES. — L'emploi des accumulateurs soulève un certain nombre de problèmes dont nous donnerons quelques exemples.

¹⁰ Calculer le poids d'accumulateurs nécessaire pour développer le travail d'un cheval-heure à ses bornes.

Nous admettrons une différence de potentiel moyenne aux bornes de 1,9 volts, pendant la décharge et une capacité de 10 ampères-heures par kilogramme de plaques.

Chaque kilogramme donnera donc une énergie totale :

$$W = 10^3 \times 3600^s \times 1,9 = 68.400 \text{ joules.}$$

Ce qui vaut, en kilogrammètres, un travail :

$$T = \frac{68.400}{9,81} = 6.972 \text{ kilogrammètres.}$$

Le poids de plaques nécessaire pour produire l'énergie d'un cheval-heure ou 270.000 kilogrammètres sera par suite :

$$P = \frac{270.000}{6.972} = 39 \text{ kilogrammes.}$$

Si l'on veut avoir le poids total d'accumulateurs en tenant compte des récipients et de l'électrolyte, il faudra multiplier le chiffre précédent par le rapport $\frac{3}{2}$ en moyenne, soit :

$$P_1 = 39 \times \frac{3}{2} = 59$$

soit 60 kilogrammes d'accumulateur, en nombre rond.

2° On veut actionner un moteur électrique de 20 kilogrammètres, ayant un rendement de 70 pour 100 et pouvant recevoir un courant de 45 ampères; on demande le nombre d'éléments du type précédent nécessaire à cet effet, et pendant combien de temps pourra marcher le moteur, à la charge indiquée.

Admettons que les éléments employés contiennent chacun 30 kilogrammes d'électrodes; chacun d'eux pourra former, d'après le calcul ci-dessus, une énergie :

$$C = 6900 \times 30 = 207.000 \text{ kilogrammètres.}$$

Pour obtenir 20 kilogrammètres avec un moteur ayant un coefficient d'utilisation de 70 pour 100, il faut lui fournir $\frac{20}{0,70} = 28,6$ kilogrammètres

La puissance électrique à demander aux accumulateurs est donc :

$$W = e \times 15^a = 28,6 \times 9,81 = 280 \text{ watts.}$$

D'où la tension aux bornes des accumulateurs, abstraction faite de la perte sur les conducteurs de connexion, sera :

$$e = \frac{280}{15} = 18,7 \text{ volts.}$$

Il faudra donc un nombre d'éléments en série :

$$n = \frac{18,7}{1,8^v} = 10,4$$

soit 11 en nombre entier.

Comme vérification, nous voyons qu'une pareille batterie est capable de développer une puissance :

$$W = 1,8^v \times 15^a \times 11 = 294 \text{ watts}$$

au lieu des 280 watts nécessaires; mais il est toujours préférable de disposer d'une puissance supérieure à celle qui est strictement demandée.

D'autre part, l'énergie disponible dans l'ensemble des 11 éléments sera :

$$T = 207.000 \times 11 = 2.277.000 \text{ kilogrammètres.}$$

La batterie devant fournir par heure une énergie :

$$U = 28,6 \times 3600^s = 102.960 \text{ kilogrammètres,}$$

pourra alimenter le moteur pendant un temps :

$$t = \frac{2.277.000}{102.960} = 22^h, 11$$

Soit vingt-deux heures, 7 minutes environ.

3° Nous empruntons à l'ouvrage de François Miron le problème suivant :

Déterminer les constantes d'une dynamo susceptible d'alimenter simultanément 100 lampes à incandescence, en dérivation, de 100 volts et 0,5 ampère, et une batterie d'accumulateurs qui devra ensuite assurer le service des mêmes lampes pendant quatre heures; la résistance du circuit étant de 0,4 ohm.

Les 100 lampes en dérivation exigent un courant :

$$I = 100 \times 0,5 = 50 \text{ ampères.}$$

La dynamo devra donc débiter ce courant, et elle devra en outre développer à ses bornes une différence de potentiel capable de suffire à la perte de tension dans le circuit et de fournir une tension de 100 volts aux bornes des lampes; cette différence de potentiel sera donc :

$$e = 100 + 0,4 \times 50 = 120 \text{ volts.}$$

La batterie devra être capable elle aussi de donner 120 volts à ses bornes; elle devra donc, à raison de 2 volts par accumulateur, comprendre en tout :

$$n = \frac{120}{2} = 60 \text{ éléments,}$$

soit 65, avec la réserve.

Pour le service de 100 lampes alimentées pendant quatre heures, la batterie devra avoir une capacité utile :

$$Q = 100 \times 0,5 \times 4 = 200 \text{ ampères-heure.}$$

Avec un rendement en quantité de 80 pour 100, il faudra fournir à la batterie :

$$Q_1 = \frac{200 \times 100}{80} = 250 \text{ ampères-heure.}$$

Si nous admettons un courant de charge des accumulateurs égal à la moitié du courant de décharge, soit 25 ampères, la durée de la charge sera :

$$t = \frac{250}{25} = 10 \text{ heures.}$$

En résumé, la dynamo devra développer à ses bornes une tension de 120 volts et débiter un courant de 75 ampères, dont 50 pour le service des lampes alimentées directement et 25 pour le service de la batterie.

Description de divers types d'accumulateurs.

213. Classification. — Il existe actuellement dans l'industrie une variété considérable de types d'accumulateurs, mais ils rentrent presque tous dans les deux genres déjà cités, soit le genre Planté à électrode de plomb, soit le genre Faure à oxydes rapportés.

ACCUMULATEUR FAURE-SELLON-VOLCKMAR. — Nous avons déjà exposé le procédé imaginé par Faure en 1881 : les plaques, constituées par un grillage formé d'un alliage de plomb et d'antimoine, présentent des alvéoles remplies, pour l'électrode positive, de minium, et, pour la négative, de litharge (fig. 354). La section de ces alvéoles est telle que la pâte d'oxyde s'y trouve moulée en queue d'hironde, pour ainsi dire, ce qui maintient solidement les pastilles dans les mailles du grillage.

Les plaques actuelles sont construites par paires, constituant les plaques jumelles dues à M. Sellon ; chaque couple comprend une plaque positive et une plaque

négative reliées pour un arc rigide du même alliage (fig. 355).

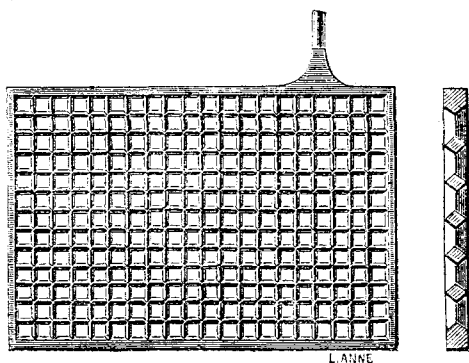


FIG. 354. — Electrode Faure-Sellon.

Le corps de la batterie se compose de plaques ainsi accouplées, dont la positive de chaque paire est plongée

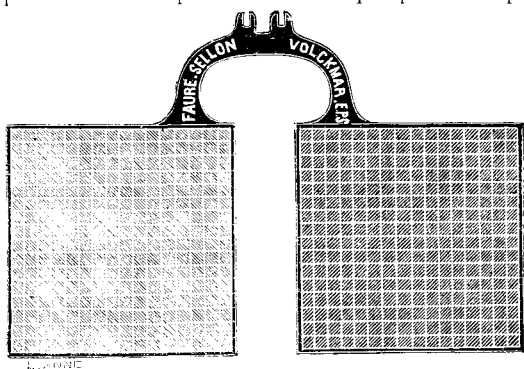


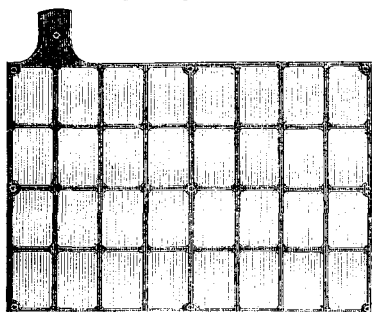
FIG. 355. — Plaques jumelles.

dans un récipient et la négative dans le récipient voisin ; en outre, on emploie des demi-plaques positives pour l'une des extrémités de la batterie et des demi-plaques négatives pour l'autre extrémité.

Ce mode d'assemblage supprime ainsi toutes connexions et soudures entre les divers éléments et facilite considérablement le montage, le démontage et par suite l'entretien de la batterie.

La capacité est de 10 ampères-heure par kilogramme de plaques et de 6.6 ampères-heure par kilogramme de poids total.

ACCUMULATEURS JULIEN ET PAUL GADOT. — La carcasse formant le grillage de cet accumulateur genre Faure est



V. Rose

FIG. 355. — Plaque P. Gadot.



formée d'un alliage inoxyda-
ble de 95 de
plomb, 3,5 d'an-
timoine et 1,5
de mercure.

Les alvéoles
contenant la
matière active
(fig. 356) ont
une section
comparable à
la précédente,
mais qui est

formée par l'assemblage de deux plaques soudées l'une sur l'autre d'une manière invariable, de telle sorte que ces alvéoles forment comme un cadre rainé, dans lequel la pâte d'oxyde est emprisonnée et ne peut que se maintenir solidement. Cette disposition a permis d'augmenter le volume des pastilles d'oxyde de plomb par rapport à la carcasse inerte de plomb antimoné.

On arrive ainsi à obtenir 10 à 12 ampères-heures par kilogramme de plaques.

ACCUMULATEURS DE LA SOCIÉTÉ POUR LE TRAVAIL ÉLECTRIQUE DES MÉTAUX. — Ces accumulateurs sont caractérisés spécialement par le mode de préparation des pastilles de matière active, qui sont toujours enchâssées dans les évidements des plaques de plomb.

La figure 357 montre la forme de ces pastilles, estam-

pées en creux pour augmenter la surface active ; on les obtient en fondant un mélange de chlorure de plomb et de chlorure de zinc ; puis on les lave à l'acide chlorhydrique qui dissout le chlorure de zinc et enlève en même temps toute trace d'oxyde.

Les pastilles ainsi traitées sont serties dans les mailles des plaques de plomb, puis on les débarasse du chlore en constituant une pile dont les électrodes sont formées avec ces plaques, d'une part et des plaques de zinc, d'autre part ; dans ces conditions le chlore abandonne le plomb pour se porter sur le zinc. Les plaques destinées à former l'électrode positive de l'accumulateur sont lavées, puis oxydées dans une étuve à air chaud.

On obtient par ce traitement, sur la plaque négative, des pastilles de plomb métallique très poreuses dont la densité ne dépasse pas 2,75, et sur la plaque positive, un oxyde également très divisé ; les matières actives sont ainsi amenées dans un état particulièrement favorable au développement des actions électro-chimiques.

La capacité de ces accumulateurs est de 8 à 10 ampères-heure par kilogramme de plomb utile.

ACCUMULATEUR TUDOR. — Cet accumulateur peut être considéré comme un appareil mixte, tenant du type Planté par ses plaques de plomb utilisées comme matière active et du type Faure par les oxydes artificiels appliqués à la surface des plaques.

L'électrode négative est constituée par une lame de plomb pur rainée verticalement, et la positive par une série de lames triangulaires formant des sillons horizontaux (fig. 358).

Avant d'insérer la pâte de litharge ou de minium dans

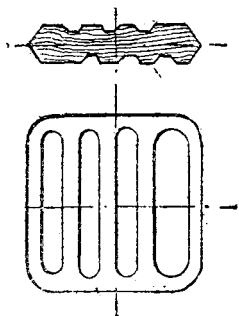


FIG. 357. — Pastilles de la Société pour le travail électrique des métaux.

les interstices des rainures, on soumet les plaques à la même transformation que l'accumulateur Planté; l'oxyde ainsi formé à la surface prépare l'attaque ultérieure de la plaque, qui continuera et pénétrera de plus en plus profondément, à chaque nouvelle charge.

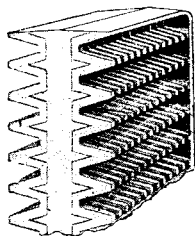


FIG. 358. — Plaques
Tudor.

La matière active que l'on applique ensuite sur les électrodes est destinée seulement à donner immédiatement à l'accumulateur la capacité voulue, en attendant que l'oxyde formé aux dépens de l'âme en plomb ait remplacé, les oxydes artificiellement rapportés qui se détachent et tombent au bout d'un an à dix-huit

mois. Les plaques reposent, dans les bacs, sur des lames de verre, disposées sur champ et encastrées dans des rainures; en outre, des feuilles de caoutchouc sont interposées entre les lames et le fond du récipient; l'écartement des plaques est maintenu par des tubes de verre placés verticalement entre les électrodes.

La principale qualité de ces appareils, qui sont spécialement destinés aux stations centrales, est d'être très robustes; aussi le poids des plaques de plomb est relativement fort, et la capacité varie de 4.4 à 6 ampères-heure par kilogramme.

La Compagnie Tudor fabrique également des types à charge rapide, spécialement destinés à la traction électrique. La constitution de l'accumulateur, telle que nous l'avons décrite, lui permet, en effet, de résister sans se détériorer à des charges et décharges intensives, conditions exigées par les efforts très variables que doivent développer les moteurs des tramways.

Le type spécial dont il s'agit présente une capacité utilisable variant de 8 à 4 ampères-heure, suivant le régime de décharge. L'intensité des courants de charge et de décharge peut atteindre sans inconvénient 15 à 18 ampères par kilogramme de plaque et même plus, notamment au commencement de la charge.

. ACCUMULATEURS LAURENT-CELY. — Ce type, construit par la Société pour le travail électrique des métaux (fig. 359), est établi suivant les mêmes principes que le premier appareil de cette maison décrit plus haut, mais il présente

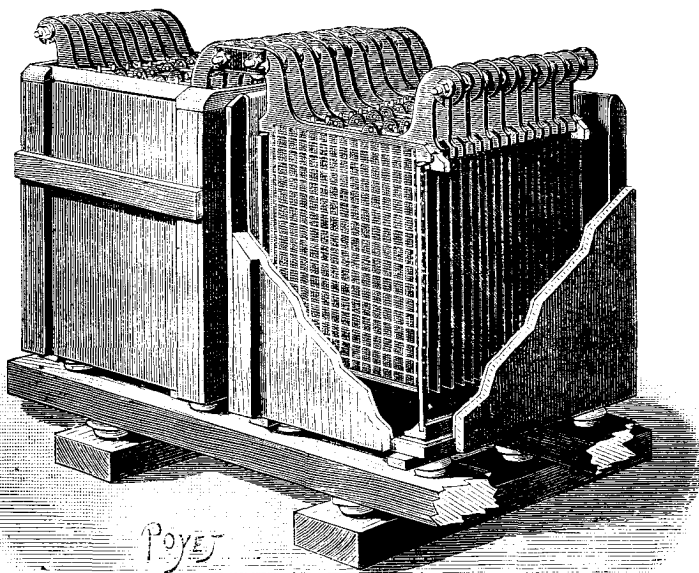


FIG. 359. — Accumulateur Laurent-Cely.

des perfectionnements très appréciables au point de vue de la facilité du montage et de la conservation des plaques.

Les cadres quadrillés sont surmontés de deux queues de forme appropriée, qui permettent de les monter et démonter indépendamment les uns des autres; les plaques de semblable polarité sont réunies dans un même élément, par un boulon de groupement sur lequel sont fortement serrées les queues d'une même rangée, par les écrous d'extrémité. Les divers éléments sont ensuite reliés en série, par des connexions en cuivre.

Les plaques sont également pourvues, à la partie supérieure, de deux talons de suspension qui reposent sur des châssis supports, établis à l'intérieur des récipients. Les électrodes ainsi suspendues par leur partie supérieure sont donc libres de se dilater dans tous les sens, condition très favorable pour éviter les déformations et gondolements des plaques, qui se produisent si fréquemment dans les dispositions ordinaires, sous l'action des réactions chimiques.

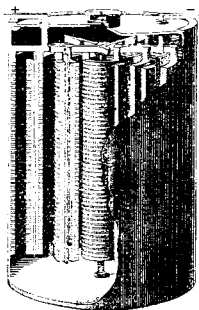


FIG. 360. — Accumulateur Mousterde.

ACCUMULATEUR MOUTERDE. — Les électrodes planes sont remplacées ici par des électrodes cylindriques, disposées concentriquement dans un bac formé par l'électrode positive extérieure elle-même.

Les faces en regard des cylindres de plomb sont armées de nervures horizontales, obtenues mécaniquement par pression hydraulique (fig. 360).

D'après l'inventeur, la matière active de l'électrode positive, en *foisonnant*, s'applique plus fortement dans le fond des rainures et la forme cylindrique des électrodes s'oppose à toute déformation consécutive des éléments.

ACCUMULATEUR A LA LITHANODE. — Dans les accumulateurs à oxydes rapportés artificiellement, sauf dans les systèmes mixtes tels que l'accumulateur Tudor, la carcassee de plomb constitue une matière inactive qui réduit considérablement, par son poids, la capacité spécifique de l'appareil. Il était donc logique de chercher à construire des plaques formées uniquement de matière active, en supprimant complètement tout support de plomb. Le problème semble avoir été résolu par M. Fitz-Gérald, qui emploie le procédé suivant.

Une pâte homogène, formée de litharge et de 5 pour 100 de pierre ponce imbibée de sulfate d'ammoniaque, est tassée dans un moule et soumise à l'action d'un jet de

vapeur, tenant en suspension une petite quantité de glycérine. On obtient ainsi des plaques homogènes dans lesquelles l'oxyde est à l'état de sulfate insoluble, auquel l'inventeur a donné le nom de *lithanode*.

La capacité d'un pareil accumulateur serait le double de celle des autres systèmes, et atteindrait, d'après l'auteur, 20 ampères-heure environ, par kilogramme de lithanode.

ACCUMULATEUR AU CUIVRE COMMELIN-DESMAZURES. — Le principe de la force électromotrice de polarisation, sur lequel est basée la théorie du transformateur, trouve une nouvelle démonstration dans ce système d'accumulateur qui n'est autre, en définitive, que la pile de Lalande et Chaperon, disposée pour être régénérée, après chaque décharge, par la reconstitution des combinaisons primitives.

Voyons, en effet, ce qui se passe dans cette pile : les électrodes sont formées, comme on sait, d'une caisse en fer B (fig. 361), servant à la fois de récipient et de pôle

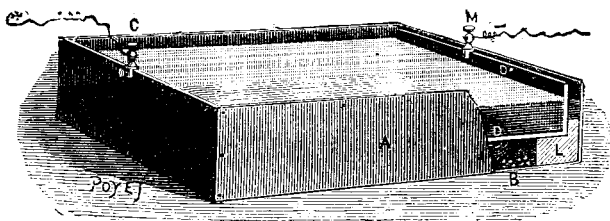


FIG. 361. — Pile de Lalande.

positif; d'une lame de zinc D, supportée à une certaine distance du fond par quatre isolateurs en ciment L; le fond du récipient est recouvert d'une couche de cuivre et le liquide excitateur est une dissolution de potasse caustique à 35 pour 100.

Lors du fonctionnement de la pile, la potasse hydratée abandonne son hydrogène qui se combine avec l'oxygène de l'oxyde de cuivre pour former de l'eau; la potasse se porte sur le zinc oxydé lui-même pour produire du zincate

de potasse. Lorsque la pile est épuisée, le zinc et la potasse sont entrés complètement dans cette combinaison et l'oxyde de cuivre est réduit à l'état de cuivre métallique.

A ce moment, la pile Lalande est analogue à l'accumulateur Commelin-Desmazures après décharge. Celui-ci comprend, en effet, une électrode positive de cuivre très poreux et une négative en zinc, plongeant dans une dissolution de potasse ou de soude, additionnée de chlorate de soude. Le cuivre poreux s'obtient par la compression de limaille en poudre, sous une pression de 1000 kilogrammes par centimètre carré.

Pendant la charge, l'électrode positive est transformée en oxyde de cuivre; le zincate de potasse se dédouble en zinc métallique qui se porte sur l'électrode négative et en potasse qui reste en dissolution dans l'électrolyte; les éléments de la pile Lalande se trouvent ainsi reconstitués dans l'accumulateur, qui développe alors une force électromotrice de polarisation, utilisée pendant la période de décharge.

L'accumulateur au cuivre ne donne qu'une tension relativement faible, mais sa capacité paraît analogue à celle des accumulateurs à la lithanode; toutefois, les accumulateurs au plomb paraissent susceptibles d'atteindre une capacité supérieure, théoriquement du moins.

ACCUMULATEUR AU CADMIUM. — La réaction fondamentale qui se produit dans les accumulateurs ordinaires au plomb, est la décomposition de l'eau, pendant la charge, en oxygène qui peroxyde l'électrode positive et en hydrogène qui réduit l'électrode négative à l'état de plomb métallique plus ou moins spongieux.

Au point de vue qui nous occupe, l'eau acidulée de l'électrolyte peut être considérée comme du sulfate d'oxyde d'hydrogène, corps dans lequel l'hydrogène joue le rôle d'un métal, en se portant sur l'électrode négative pendant l'électrolyse. On conçoit donc que l'on puisse arriver au même résultat, en composant le liquide excitateur d'un autre sel métallique, tel que le sulfate de cadmium.

C'est ainsi que MM. Commelin et Finot ont établi leur accumulateur au cadmium. L'électrode positive de cet appareil est constituée par un cadre grillagé du système Julien: la négative est une plaque mince de plomb amalgamé, ou d'un alliage de plomb, antimoine et cadmium; ces électrodes sont plongées dans une solution de sulfate de cadmium, additionnée de 10 pour 100 d'acide sulfurique.

Pendant la charge, la plaque positive se comporte comme dans les accumulateurs ordinaires et se peroxyde, la négative se couvre d'une couche de cadmium; à la décharge, les électrodes reviennent à leur état primitif.

Ces éléments donnent une force électromotrice à circuit ouvert de 2,3 volts, et leur énergie spécifique est de 54 watts-heure par kilogramme d'électrodes.

Distributions indirectes par accumulateurs.

214. Emploi des accumulateurs. — Ces appareils sont susceptibles de remplir des fonctions multiples. En premier lieu, comme instrument propre à emmagasiner l'énergie, ils peuvent jouer un rôle analogue à celui des gazomètres dans les usines à gaz.

Il arrive en effet que l'éclairage électrique absorbe, à un moment donné de la soirée, une énergie qui peut dépasser trois et quatre fois la charge moyenne de la journée. La conséquence de cette situation normalement irrégulière, est que la puissance des dynamos génératrices doit être établie pour une charge maximum qui ne persiste que quelques instants, et que, tout le reste du temps, les machines fonctionnent à faible charge, c'est-à-dire dans des conditions de rendement économique très défavorables.

L'emploi des accumulateurs dans les stations centrales remédie à ces inconvénients. Il est évident, en effet, que l'on pourra remplacer un groupe électrogène, moteur et dynamo de 12 chevaux, par exemple, fonctionnant seulement pendant quatre heures, par un autre de 4 à 5 che-

vaux marchant à pleine charge pendant douze heures, si l'énergie ainsi engendrée peut être emmagasinée dans des accumulateurs pendant la période de consommation nulle. En réalité, la charge a toujours une certaine valeur, si petite soit-elle, mais en tous cas, les accumulateurs recueilleront l'excès de l'énergie engendrée par les génératrices sur la consommation du réseau d'utilisation, si bien que les machines travailleront toujours à pleine charge.

En second lieu, l'énergie emmagasinée dans les accumulateurs peut servir à régulariser le courant lorsque l'allure de la machine motrice est irrégulière, notamment dans le cas de moteurs à gaz, et encore lorsque la machine motrice actionne, en même temps que la dynamo, des machines-outils en nombre variable. Nous avons indiqué ailleurs (tome I. § 142) comment la batterie devait être disposée sur les circuits, pour être utilisée comme régulateur.

A un autre point de vue, les accumulateurs constituent un puissant moyen pour assurer la sécurité de l'exploitation et éviter les extinctions accidentelles sur tout un réseau, la batterie étant toujours prête à suppléer la génératrice, en cas d'accident.

Les accumulateurs se prêtent également à l'installation des éclairages provisoires ou momentanés chez les particuliers. Enfin ils sont utilisés à l'éclairage des wagons et pour fournir la force motrice aux bateaux, voitures, tramways et locomotives électriques.

Nous rappellerons en dernier lieu, que les accumulateurs sont les véritables transformateurs à courant continu; ce sont, il est vrai, des transformateurs différés, mais ils fonctionnent en définitive comme les transformateurs à courants alternatifs, dans ce sens qu'ils reçoivent de même un courant primaire et restituent un courant secondaire, sur le circuit d'utilisation.

On peut donc disposer des tensions respectives de ces courants et régler leur rapport de transformation à volonté; pour cela il suffit de grouper les batteries en

séries répondant à la charge du courant à haute tension et de les découpler ensuite en parallèle, de manière à leur faire donner la tension réduite d'utilisation.

On peut même aller plus loin, et considérer une batterie d'accumulateurs comme un générateur d'électricité tellement constitué, que l'on peut y prélever telles différences de potentiel qu'il convient, soit successivement, soit simultanément. Considérons, en effet, une batterie de cent éléments en série, par exemple, chargée au potentiel de 2 volts par élément; nous pourrions obtenir tous les voltages que nous voudrions, depuis 2 volts jusqu'à 200 volts, en reliant le premier conducteur du circuit à l'un des pôles extrêmes de la batterie et reculant progressivement le second conducteur, depuis le point de jonction des deux premiers éléments, jusqu'à l'autre extrémité de la batterie.

On met ces propriétés à contribution dans les divers systèmes de distributions indirectes par accumulateurs, qu'il nous reste à étudier.

215. Distribution par sous-stations à deux batteries. — Lorsqu'il s'agit d'alimenter l'éclairage d'une ville sur un réseau très étendu, on serait conduit à employer des *feeders* de grande longueur, et à leur donner une forte section, pour réduire les pertes d'énergie sur ces canalisations. On pourrait encore multiplier les stations en différents centres, afin que chacune d'elles n'ait à desservir qu'un périmètre limité.

Ces deux solutions seraient très onéreuses, mais on peut remplacer les stations génératrices multiples par des *sous-stations* d'accumulateurs, constituant autant de centres de distribution.

Un premier système consiste à pourvoir chaque sous-station de deux batteries complètement distinctes et indépendantes, dont l'une est en charge, tandis que l'autre alimente l'éclairage de la section qui se rattache à la sous-station considérée (fig. 362).

Les batteries en charge A sont disposées en série sur le circuit de la dynamo; dans ces conditions leurs forces contre-électro-motrices s'ajoutent et la dynamo doit déve-

lopper à ses bornes une différence de potentiel égale à leur somme. Si chacune des trois batteries du schéma oppose une force électro-motrice de 133 volts, par exemple, la dynamo distribuera l'énergie au circuit de charge

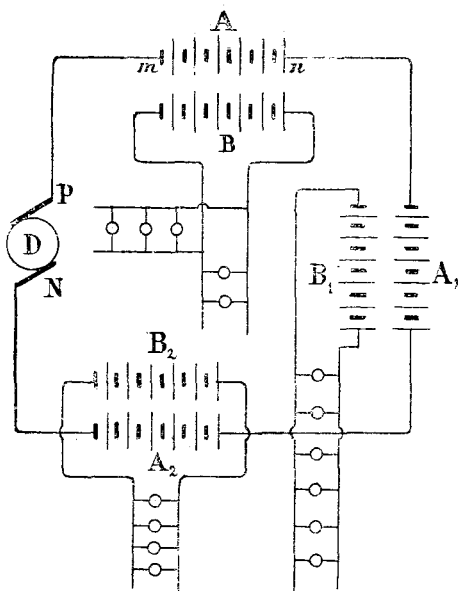


FIG. 362. — Sous-station d'accumulateurs à deux batteries.

sous la tension de 400 volts environ, et ce circuit pourra être formé d'un conducteur de faible section.

Il faut remarquer néanmoins que cette tension totale se répartit sur l'ensemble du circuit, en trois différences de potentiel partielles de 133 volts, entre les bornes de la batterie de chaque sous-station. On ne peut donc être exposé aux effets d'une tension dangereuse, même en touchant le circuit de charge, du moins quand celui-ci est parfaitement isolé. Mais si le pôle N de la dynamo, par exemple, est à la terre, la tension de P monte à 400 volts

et toute personne venant toucher accidentellement le conducteur en relation avec ce pôle sera soumis à ce potentiel maximum.

Toutefois le circuit de charge ne pénètre pas dans les habitations : les circuits secondaires alimentés par les batteries B sont complètement indépendants et isolés du circuit primaire. Il est évident que la tension sur le circuit d'utilisation dépend uniquement de la différence de potentiel aux bornes de chacune des batteries indépendantes B : on peut donc obtenir telle tension secondaire que l'on veut par la constitution même de la batterie.

Ce système présente toute garantie de sécurité, puisque le circuit à basse tension n'a aucun point de liaison avec le circuit d'utilisation, mais il a l'inconvénient d'exiger l'emploi de deux batteries dans chaque sous-station, ce qui augmente notablement les frais de premier établissement. En outre, toute l'énergie utilisée est fournie par les accumulateurs et la perte de transformation porte, par suite, sur cette énergie totale, ce qui réduit au minimum le rendement de la distribution.

DISTRIBUTION SYSTÈME MONNIER. — Pour remédier à ces inconvénients, M. Monnier ne place qu'une seule batterie dans chaque sous-station, et toutes les batteries sont constamment en série sur le circuit aboutissant aux bornes de la dynamo (fig. 363).

Or la présence d'une batterie, en chaque section telle que A, y détermine une chute de tension précisément égale à la force contre-électro-motrice de cette batterie : on utilise cette différence de potentiel aux points *m* et *n*, pour relier à ces points le circuit secondaire d'utilisation des lampes L.

Dans cette disposition, le circuit de charge est donc à haute tension et l'on peut ainsi transporter l'énergie électrique dans des conditions économiques, par un conducteur de faible section ; les circuits secondaires sont au contraire alimentés à basse tension, n'étant soumis qu'à la différence de potentiel d'une seule batterie.

Mais il faut considérer en outre que le circuit de charge

contribue lui aussi à la distribution, qui peut être faite, suivant les cas, soit par la dynamo seule, soit par le concours simultané de la dynamo et des accumulateurs, soit par ces derniers seulement.

Pendant les heures de faible consommation, le courant du circuit de charge se bifurque en m , par exemple, une

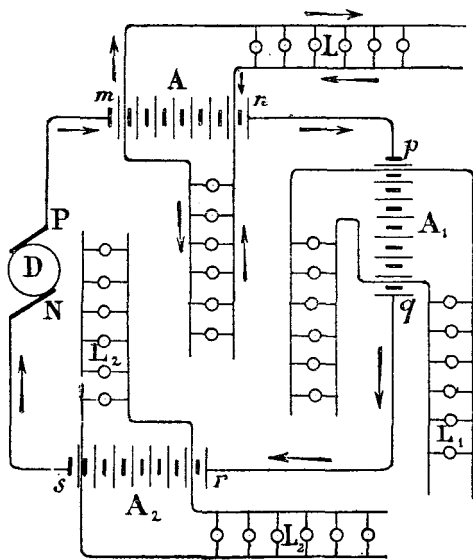


FIG. 363. — Distribution Monnier.

partie alimente le petit nombre de lampes en circuit sur la section L et le reste traverse l'accumulateur A pour se diriger vers A_1 ; ce dernier courant charge A en y développant l'énergie chimique correspondant à la chute de potentiel qu'il subit entre les bornes de cette batterie.

Lorsque la consommation atteint son maximum, la batterie A considérée se décharge et vient ajouter son courant sur la section L au courant de la dynamo; ce dernier, après avoir traversé les lampes L, poursuit sa route dans

le conducteur np pour se distribuer dans les lampes L_1 , qui peuvent être alimentées en même temps par la batterie A_1 et ainsi de suite.

On doit considérer ce système comme une distribution mixte, à la fois directe et indirecte : il s'ensuit que le rendement est plus favorable, puisque les pertes de transformation ne sont imputables qu'à une fraction de l'énergie distribuée.

Il va sans dire que, si la station est arrêtée momentanément par un accident quelconque, les batteries peuvent être séparées du circuit de charge et sont en état de pourvoir seules à l'alimentation de chacun des réseaux d'utilisation qu'elles desservent respectivement.

On peut également retirer l'une quelconque des batteries du circuit de charge, soit pour la changer au besoin, soit pour ne pas la surcharger, si sa capacité, appropriée au réseau qu'elle doit alimenter, est inférieure à celle des autres batteries. Dans ce cas, on réduit la force électromotrice des dynamos à l'usine, en conséquence.

Il est facile de calculer la puissance que les batteries d'accumulateurs doivent fournir au réseau, au moment de la charge maximum.

Soit i l'intensité du courant consommé pour chacune des sections desservies par une batterie et y le courant débité par la dynamo, commun à tout le circuit, chaque batterie devra fournir la différence, ou $(i-y)$. Soit encore E le voltage des lampes augmenté de la perte de charge maximum sur la canalisation de la batterie, la puissance électrique des trois batteries qui figurent dans notre schéma, aura pour valeur :

$$W = 3(i-y) \times E \text{ watts.}$$

et la puissance mécanique équivalente :

$$P = \frac{3(i-y) \times E}{736 \text{ kgm}} \text{ chevaux-vapeur.}$$

SYSTÈME MONNIER A TROIS CONDUCTEURS. — M. Monnier a appliqué un système analogue à l'éclairage de l'Opéra et

du Burgtheater de Vienne, en disposant le circuit secondaire suivant le mode de distribution à trois fils (fig. 364).

Dans les locaux de l'Opéra, situés à 1.500 mètres de la station centrale, sont établies quatre batteries en

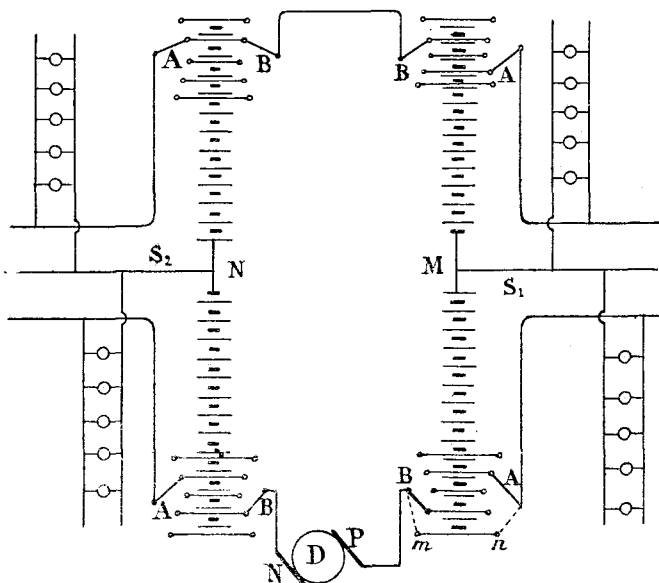


FIG. 364. — Système Monnier à trois conducteurs.

série sur le circuit de charge des dynamos D. L'ensemble des accumulateurs reçoit donc un courant dont la tension totale est le quadruple de la différence de potentiel aux bornes de chaque batterie ; la charge se fait ainsi à haute tension.

Au point de vue de la distribution, les batteries sont réparties en deux couples qui sont disposés chacun sur les circuits des lampes, comme les deux dynamos accouplées en série, sur la distribution à trois fils. A cet effet, les conducteurs extrêmes de la section S_1 viennent se relier

aux extrémités du couple correspondant et le fil neutre se rattache au point de jonction M des deux batteries.

Les lampes sont, par le fait, reliées aux pôles de chacune des batteries partielles et soumises à la tension réduite d'une batterie unique; la distribution se fait donc à basse tension.

Les deux ponts de la section S_1 , par exemple, sont équilibrés par le secours des deux batteries, qui interviennent individuellement pour compléter l'alimentation du pont le plus chargé et jouent ainsi un véritable rôle de régulateur.

Le fonctionnement général de cette distribution est le suivant : pendant les heures de faible consommation, soit dans la journée, les dynamos qui débitent un courant constant, alimentent directement les lampes en service et chargent en même temps les batteries; dans la soirée, le courant des dynamos étant insuffisant pour satisfaire à la dépense totale de l'éclairage, les accumulateurs se déchargent et fournissent le supplément nécessaire.

Les batteries sont pourvues de deux systèmes de réducteurs A et B, l'un pour maintenir le potentiel constant sur les circuits secondaires de décharge, l'autre pour régler la tension de charge.

En plaçant les commutateurs sur le même plot extrême en $m n$, par exemple, et ainsi pour les trois autres sections, on retirera l'ensemble des batteries du circuit de charge et l'éclairage sera fait directement par les dynamos. On voit alors que les quatre sections des lampes sont toujours en série sur le circuit des machines et que la tension totale se répartit en quatre différences de potentiel égales, aux bornes de ces diverses sections, abstraction faite d'ailleurs des chutes de tension sur les conducteurs d'alimentation.

RÉGULATION PAR ACCUMULATEURS D'UNE DISTRIBUTION A TROIS FILS. — On se sert aussi des accumulateurs exclusivement comme régulateurs de tension sur les feeders, au départ de l'usine génératrice, pour créer aux extrémités de ces câbles d'alimentation, les tensions variables répondant aux divers besoins de la distribution.

La figure 365 montre l'application de ce principe à une distribution à trois fils par feeders, dont les conducteurs extrêmes sont représentés en $p_1 p_2 p_3 p_4$ et $n_1 n_2 n_3 n_4$, et les conducteurs neutres ou d'équilibre en $m_1 m_2 m_3 m_4$.

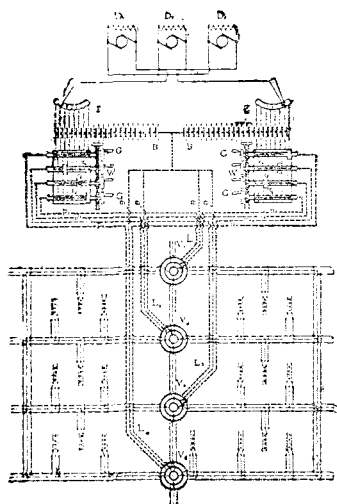


FIG. 365.— Distribution à trois fils avec accumulateurs-régulateurs. Les dynamos génératrices D_1 D_2 D_3 , en quantité sur les bornes du tableau, fournissent la différence de potentiel totale appliquée en $Z Z$ aux bornes des feeders extrêmes; entre ces deux bornes est intercalée la série de deux batteries, présentant chacune la moitié de la tension des dynamos.

En réalité, les groupes de feeders, au nombre de quatre dans le schéma, ne sont pas reliés directement aux pôles des dynamos, mais peuvent être mis en relation avec l'un quelconque des éléments de réduction de la batterie correspondante. A cet effet, les éléments de réduction sont reliés respectivement à autant de barres de cuivre telles que C_1 , formant un faisceau de conducteurs parallèles, isolés les uns des autres; les conducteurs extrêmes des feeders sont mis en communication avec ces barres, au moyen de contacts mobiles, commandés par une tige filetée que l'on manœuvre à l'aide de volants G ; un arbre transversal V peut actionner à la fois tous les volants, par une disposition d'embrayage mobile.

En faisant tourner les tiges filetées, soit isolément, soit ensemble dans un sens ou dans l'autre, on peut amener chaque contact en communication avec l'une quelconque

des barres reliées aux éléments réducteurs et faire varier ainsi la tension de chaque feeder.

Ce système permet ainsi de proportionner la force électro-motrice appliquée à l'origine des feeders, à la longueur de chaque conducteur. Il est évident, en effet, que, pour une tension donnée, les conducteurs d'alimentation devront avoir une section d'autant plus grande qu'ils aboutiront à des centres plus éloignés de l'usine; si donc on dispose, comme dans le cas actuel, de sources de potentiel multiples, on pourra admettre une chute de tension plus considérable sur les longs conducteurs, et, par suite, réduire leur section en conséquence.

A un autre point de vue, on voit que les accumulateurs remplacent avantageusement, pour la régulation du potentiel, les résistances ohmiques que l'on insère dans les feeders et qui absorbent une fraction notable de l'énergie distribuée.



CHAPITRE XIII

TRANSMISSION ÉLECTRIQUE DE L'ÉNERGIE. MOTEURS

216. — **Transmission de l'énergie.** — Ce qui distingue plus particulièrement l'électricité des autres formes de l'énergie, c'est la merveilleuse faculté qu'elle possède de se transporter presque instantanément d'un point à un autre, quelle que soit la distance considérée, et c'est en cela précisément que consiste le fait de la transmission de l'énergie.

Que l'énergie soit transmise par l'électricité, pour être transformée en lumière, ou pour produire de la force motrice, il est évident que le phénomène de transmission est le même; toutefois, il semble que, dans le langage de la pratique, on emploie plus particulièrement ce terme quand le but de la transmission est l'application de l'énergie à la force motrice.

Il serait plus logique, comme on le fait d'ailleurs ordinairement, de se servir de l'expression *transport de la force* quand l'énergie doit être employée à cet usage; certains électriciens, il est vrai, considèrent cette formule comme incorrecte, mais puisque la force est l'un des termes du travail ou de l'énergie, on ne voit pas comment, en transportant l'énergie, on ne transporterait pas la force qui la constitue.

La transformation de l'énergie électrique transmise, en force motrice ou énergie mécanique, est basée sur l'action réciproque des circuits électriques et des champs magné-

tiques ou encore sur l'action que les courants exercent directement entre eux.

La connaissance de ce phénomène procède en premier lieu de l'expérience d'Oerstedt qui découvrit l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée, puis des découvertes d'Ampère et de Faraday et des travaux de Laplace et de Maxwell.

Nous avons déjà traité cette question du travail mécanique d'un circuit électrique dans un champ magnétique (tome I, § 94). S'il s'agit d'un conducteur de longueur l , en vertu de la loi élémentaire de Laplace, la force exercée sur ce conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique d'intensité H est proportionnelle à l'intensité du courant, à H et à l ; de plus, cette action est perpendiculaire au plan déterminé par le conducteur et la direction générale des lignes de force du champ.

Par la simple application de ce principe, on réalisera un moteur élémentaire (fig. 366) en reproduisant l'expérience classique des cours de physique pour la démonstration de la rotation d'un courant rectiligne OC mobile autour d'un axe vertical O , sous l'action d'un courant circulaire constitué par un circuit d'un grand nombre de spires, qui se projette en plan suivant PQ .

L'action de cette bobine, dont l'axe est supposé vertical, se confond avec celle du champ électro-magnétique qu'elle développe et dont les lignes de force sont perpendiculaires à son plan; les forces qui s'exercent sur OC sont donc normales au plan vertical PQ ; elles s'appliquent à tous les éléments du conducteur OC et peuvent être représentées, en particulier au point C , par la flèche F , tangente au cercle de rayon OC : cette force est d'ailleurs dirigée sur

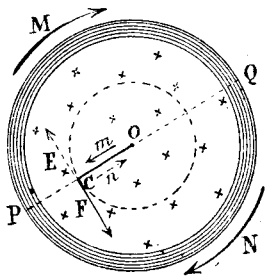


FIG. 366. — Rotation d'un conducteur dans un champ électro-magnétique.

la gauche du spectateur placé suivant la règle d'Am-père.

D'après la figure, le courant dans la bobine circule dans le sens des flèches MN et détermine sur la face supérieure du solénoïde un pôle sud ou négatif; c'est pourquoi les lignes de force sont indiquées par des croix représentant en projection les queues des flèches qui simulent les lignes de force électro-magnétiques.

Si, tout en conservant le même sens du courant dans la bobine, on fait circuler le courant en sens inverse dans le conducteur CO , la rotation changera de sens et se fera dans la direction de la flèche pointillée E . On voit, par la même raison, que si l'on change à la fois le sens des courants dans les deux circuits, le sens de la rotation ne variera pas.

Quant au travail accompli par le circuit mobile dans le champ magnétique, il est égal au produit du courant par le nombre de lignes de force coupées par le circuit dans son déplacement, ce produit étant divisé par 10^7 ou dix millions, pour avoir sa valeur en joules.

Dans le cas où l'on considère, non plus une fraction de circuit telle que le conducteur CO , mais un circuit complet fermé, mobile autour d'un axe, le circuit placé dans un champ magnétique s'orientera de telle sorte que le flux pénétrant par sa face sud ou négative soit maximum.

Ainsi un solénoïde, constituant un circuit fermé, à plusieurs spires, convenablement suspendu par ses extrémités sur des pointes plongeant dans des coupelles de mercure et recevant un courant extérieur, s'oriente comme une boussole, de telle sorte que son axe se place parallèlement au méridien magnétique, le pôle positif se dirigeant et revenant toujours vers le nord, quand il en est écarté (tome I, § 61).

Pendant le déplacement du circuit dans le champ, le travail en résultant est égal au produit du courant par la variation du flux de force correspondant aux deux positions initiale et finale du circuit.

Enfin, les mouvements mécaniques des circuits électri-

ques dans les champs magnétiques obéissent à la loi suivante de Lenz :

Un conducteur mobile dans un champ magnétique et traversé par un courant se met en mouvement dans un sens inverse du mouvement qu'il faudrait lui donner pour produire un courant de même sens, pour un même sens du champ magnétique.

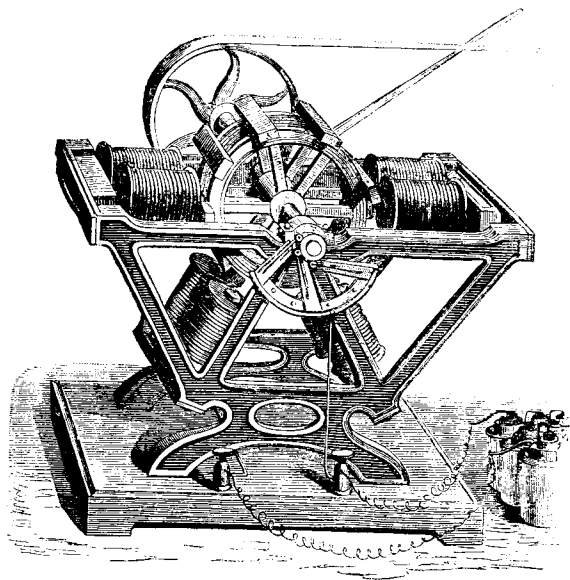


FIG. 367. — Moteur électro-magnétique de Froment.

Dès l'origine, on a combiné des électro-moteurs, en utilisant, soit les effets des courants électriques les uns sur les autres, soit les actions réciproques des aimants sur les courants, soit celles des électro-aimants sur des armatures en fer doux.

A ce dernier système appartient le moteur à mouvement de rotation direct de Froment (fig. 367). Sur un tambour mobile sont fixées des armatures de fer doux parallèles à

l'axe de rotation ; quatre électro-aimants disposés radialement sur le bâti de fonte sont excités d'une façon intermittente par le courant d'une pile, au moyen d'un interrupteur à galet dont le jeu est commandé par le mouvement de l'arbre.

Le courant est ainsi lancé successivement et alternativement dans chacun des couples d'électro-aimants dont l'action sur les armatures est concourante, on obtient donc un mouvement de rotation continu.

Un grand nombre de petits moteurs étaient basés également sur l'attraction que les solénoïdes ou bobines creuses peuvent exercer sur un noyau de fer doux. Pour développer la course du noyau, M. Page avait imaginé le système des bobines cloisonnées, dans lequel les diverses sections de l'enroulement du solénoïde étaient successivement parcourues par le courant excitateur. Marcel Desprez a combiné sur ce principe un marteau-pilon dont la tige, constituant le noyau de fer doux, est attirée progressivement du haut en bas de la course, au fur et à mesure de la distribution du courant dans les spires du solénoïde.

RÉVERSIBILITÉ DES DYNAMOS. — Les moteurs ainsi conçus ne pouvaient développer que de très faibles puissances et ne constituaient pour la plupart que des appareils de laboratoire. La question des moteurs électriques ne fut résolue que du jour où MM. Marcel Desprez et Siemens découvrirent le phénomène de la réversibilité des machines dynamos.

Ce phénomène réside dans le double fait suivant : si l'on fait tourner l'organe mobile d'une dynamo, en lui fournissant l'énergie d'un moteur mécanique, la dynamo transforme ce travail moteur en énergie électrique disponible sur le circuit d'utilisation.

Inversement, si l'on fournit de l'énergie électrique à une dynamo, en mettant ses bornes en communication avec une source d'électricité extérieure, l'organe mobile se met en mouvement, en restituant de l'énergie mécanique sur son arbre.

Les expériences classiques du disque de Faraday et de

la roue de Barlow mettent bien en évidence la faculté de réversibilité des machines d'induction.

Nous avons expliqué ailleurs (tome I, § 97) comment, en faisant tourner le disque de Faraday dans un champ magnétique normal à son plan, on développait des courants induits pouvant être recueillis dans un circuit extérieur; c'est la transformation du travail mécanique qui met la roue en mouvement, en énergie électrique.

Le même disque, ou plutôt la roue de Barlow placée également dans un champ magnétique, se met à tourner quand on lui fournit du courant issu d'une source extérieure d'électricité; c'est la transformation de l'énergie électrique en travail mécanique.

On constate d'autre part que, toutes choses égales d'ailleurs, la puissance mécanique développée par la roue de Barlow, a exactement la même valeur que l'énergie électrique des courants d'induction engendrés dans le disque de Faraday.

FONCTIONNEMENT ÉLECTRIQUE ET RENDEMENT DU TRANSPORT D'ÉNERGIE. — Avant que le transport de l'énergie électrique fût entré dans la pratique industrielle, il existait, comme il existe encore, plusieurs procédés pour distribuer l'énergie mécanique en divers points plus ou moins éloignés de la source ou des générateurs d'énergie.

Tels sont les câbles téléodynamiques, qui transmettent directement aux machines-outils l'énergie mécanique des moteurs, et les distributions de gaz de houille et d'air comprimé.

Mais ces différents procédés ne peuvent pratiquement transmettre l'énergie à grande distance sans des pertes considérables dans les organes de transmission, câbles, ou canalisations de toutes natures.

L'électricité, au contraire, par sa puissante faculté de transport, permet de transmettre à des distances considérables et avec une perte aussi réduite que l'on veut, l'énergie engendrée dans une station génératrice. On peut ainsi utiliser les forces naturelles, telles que les chutes d'eau si nombreuses dans les montagnes, qui resteraient sans

emploi, faute de pouvoir être transportées économiquement dans les centres commerciaux et industriels, toujours éloignés de ces régions.

Examinons maintenant les conditions électriques de la transmission, et pour cela considérons tout d'abord un récepteur électrolytique dans lequel chaque coulomb décompose en ses éléments un poids déterminé du sel, en développant une énergie dépendant de la chute de potentiel correspondante (tome I, § 38).

Nous savons que les éléments ainsi séparés tendent à se recombinaison de nouveau en produisant une *force électro-motrice inverse de polarisation*. Il a donc fallu, pour amener la séparation préalable de ces éléments, créer, pour chaque coulomb, une chute de potentiel équivalente, ou appliquer à cet électrolyte une force électro-motrice égale à la force électro-motrice opposée desdits éléments.

Mais en réalité il faudra employer une force électro-motrice supérieure, parce qu'une partie de celle-ci sera absorbée par la résistance intérieure de l'électrolyte, et la différence seulement sera disponible, pour vaincre la force contre électro-motrice des éléments chimiques.

Il en sera de même de la puissance totale que devra fournir le générateur, et qui sera transformée, partie en chaleur dans la résistance intérieure, partie en travail chimique, c'est-à-dire en travail utile.

La loi de la conservation de l'énergie nous permettra donc d'écrire :

$$\text{Puissance fournie par le} \left\{ \begin{array}{l} \text{générateur aux bornes} \\ \text{du récepteur.} \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} \text{Puissance absorbée sous forme} \\ \text{de chaleur.} \\ + \text{ Puissance transformée en} \\ \text{travail chimique utile.} \end{array} \right.$$

Et avec les notations abrégées :

$$E \times I = R \times I^2 + e \times I$$

e étant la fraction de E qui sert à vaincre la force électro-motrice antagoniste et qui est par suite égale à cette force contre électro-motrice.

On peut encore poser évidemment :

$$e \times I = E \times I - R \times I^2$$

Et comme on peut écrire la même relation entre les forces électro-motrices et chute de potentiel :

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

Ceci montre que la force électro-motrice de polarisation, ou force électro-motrice inverse, est la différence entre la force électro-motrice totale E appliquée aux bornes de ce récepteur et la chute de tension intérieure. Contrairement à ce qui se passe pour la force électro-motrice des générateurs, elle est donc plus petite que la différence de tension aux bornes.

Le même fait se reproduit pour les *électro-moteurs* ou *récepteurs mécaniques*; la partie de l'énergie transformée en mouvement est une fraction $e \times I$ de l'énergie électrique totale $E \times I$ qui est fournie par le générateur. Il s'ensuit que, nécessairement et d'après la loi de la conservation de l'énergie, les récepteurs mécaniques doivent opposer à la tension de la source une tension inverse, qui tend à refouler le courant qui les pénètre.

Cette force contre-électro-motrice, commune aux récepteurs des deux dernières catégories, serait égale à la tension principale E exercée par le générateur aux bornes des récepteurs, si ceux-ci étaient complètement dépourvus de résistance intérieure, et dans ce cas la totalité de l'énergie électrique transmise aux récepteurs serait transformée en travail utile, mécanique ou chimique.

Mais comme la résistance intérieure des récepteurs n'est jamais nulle, le *rendement* n'est pas complet, par suite de la fraction d'énergie transformée en chaleur.

Ce rendement est le rapport entre la puissance réellement utilisée et la puissance totale fournie au récepteur :

$$\text{Rendement} = \frac{e \times I}{E \times I} = \frac{e}{E},$$

les puissances étant dans le même rapport que les chutes

de potentiel. On voit que ce rendement est inverse du rendement du générateur qui, lui, est le rapport de la différence de potentiel aux bornes, à la force électro-motrice totale.

Il résulte de ces considérations, qu'un circuit comprenant un générateur d'électricité et un récepteur appartenant aux deux dernières catégories, doit être considéré comme renfermant deux sources de force électro-motrice opposées; de sorte que, désignant par R la résistance totale du circuit, l'on aura :

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

Ou encore :

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

C'est-à-dire que tout se passera, comme si la force électro-motrice principale était réduite d'une quantité e égale à la force électro-motrice inverse du récepteur.

Puisque l'enroulement induit tourne dans le champ magnétique des inducteurs, sous l'action du courant I qu'il reçoit d'une source extérieure, il devient le siège d'une force électro-motrice d'induction, absolument égale à celle qui se développerait si l'on faisait tourner cet induit avec la même vitesse, en l'actionnant au moyen d'une machine motrice; cette force électro-motrice n'est pas autre chose que la force contre-électro-motrice e , qui figure dans la formule ci-dessus.

La valeur de e est évidemment nulle tant que l'induit ne tourne pas, puis elle ira en croissant jusqu'au maximum de vitesse que pourra prendre cet induit. Il s'ensuit que I diminuera au contraire, depuis la valeur maximum $I = \frac{E}{R}$ correspondant à l'arrêt de l'électro-moteur ou à $e = 0$ jusqu'à la valeur zéro, pour $e = E$.

Le rapport de l'énergie électrique développée, dans l'induit du moteur, $e \times I$, à l'énergie électrique totale produite par la génératrice, $E \times I$, est ce qu'on appelle le

rendement électrique R_e ; on a donc, comme nous l'avons écrit plus haut :

$$R_e = \frac{e \times I}{E \times I} = \frac{e}{E}$$

On voit que ce rendement est indépendant de la résistance R du circuit de transport et par suite de la distance des deux machines motrice et réceptrice. Cette conclusion suppose toutefois que e reste constant, ce qui n'arrive pas généralement, car la vitesse du moteur diminue avec l'intensité du courant réduite par une résistance plus grande du circuit.

En admettant même que cette intensité reste constante, e qui est toujours la différence de la force électro-motrice appliquée aux bornes du moteur et de la chute de tension intérieure, diminuerait avec la résistance croissante du circuit de transport, laquelle a pour effet de réduire la tension aux extrémités de ce circuit.

En somme, cette constance de rendement électrique à toute distance qui a soulevé de grandes discussions parmi les électriciens, est tout à fait oiseuse, puisqu'elle revient à dire ceci : le rapport $\frac{e}{E}$ est constant pourvu que e le soit, or il ne l'est pas.

Cette considération n'a donc aucune importance : le *rendement mécanique* est beaucoup plus intéressant au point de vue industriel, pourvu que l'on tienne compte également de la variation nécessaire de e .

RENDEMENT MÉCANIQUE. — La machine motrice qui actionne la génératrice lui communique un travail T , mais celle-ci ne transforme en énergie électrique $E \times I$ qu'une fraction K de ce travail et l'on a :

$$E \times I = K \times T$$

La réceptrice développe une énergie électrique $e \times I$, mais une fraction K_1 seulement de cette énergie produit un travail mécanique T_1 , d'où l'égalité :

$$T_1 = K_1 \times e \times I,$$

K et K_1 sont les rendements individuels des deux machines.

On part donc d'un travail moteur T , pour aboutir à une énergie mécanique T' , et l'on appelle *rendement mécanique* R_m le rapport de ces deux quantités. On tire des expressions précédentes :

$$R_m = \frac{T'}{T} = K \times K_1 \times \frac{e}{E}$$

Le rendement mécanique est donc égal au produit du rendement électrique de la transmission $\frac{e}{E}$, par les rendements K et K_1 des deux machines. On voit encore ici que, K et K_1 étant constants d'ailleurs, le rendement R_m diminuera, quand la résistance de la ligne de transport croissant, réduira la valeur de e .

On peut toutefois rendre R_m constant pour toute distance en faisant croître e et E proportionnellement aux racines carrées des résistances : par exemple, si la résistance devient $R_2 = 4 R$, on fera $E_2 = 2 E$ et $e_2 = 2 e$ de telle sorte qu'on ait d'une manière générale,

$$\frac{E_2}{E} = \frac{e_2}{e} = \frac{\sqrt{R_2}}{\sqrt{R}}$$

Il est évident que si, dans ces conditions, le travail moteur utile recueilli est le même après comme avant, le rendement mécanique n'aura pas changé ; or, des formules établies précédemment :

$$T_1 = K_1 \times e \times I \text{ et } I = \frac{E - e}{R}$$

On tire la valeur :

$$T_1 = K_1 \times \frac{e \times (E - e)}{R}$$

pour l'expression de ce travail dans le premier cas ; on aura de même dans le second cas :

$$T_2 = K_1 \times \frac{e_2 \times (E_2 - e_2)}{R_2}$$

Or, si nous remplaçons dans cette dernière relation, E_2, e_2

et R_2 par les valeurs quelconques résultant des rapports numériques supposés plus haut, nous retrouverons :

$$T_2 = K_1 \times \frac{2e \times 2(E - e)}{4R} = K_1 \times \frac{e \times (E - e)}{R}$$

c'est-à-dire la première valeur T_1 .

Pour faire varier E et e proportionnellement aux racines carrées des résistances du circuit de transport, on pourra augmenter les vitesses de rotation des deux machines, ou remplacer ces dynamos par d'autres de forces électromotrices normales voulues.

L'expression T_1 du travail moteur utile est, abstraction faite du coefficient K_1 et de R supposés constants par exemple, le produit de deux facteurs e et $(E - e)$ dont la somme est toujours égale à E ; or, on sait qu'un pareil produit est maximum lorsque les deux facteurs sont égaux, savoir :

$$e = E - e \text{ d'où } e = \frac{E}{2}$$

en portant cette valeur de e dans la formule de T_1 il vient :

$$T_1 = K_1 \times \frac{E^2}{4R} = K_1 \times \frac{E}{4R} \times E$$

R étant la résistance totale du circuit, et comme, d'autre part, on a dans l'hypothèse admise :

$$I = \frac{E - e}{R} = \frac{E}{2R} \text{ ou } E = 2R \times I$$

il s'ensuit :

$$T_1 = K_1 \times \frac{E \times I}{2}$$

c'est-à-dire que l'énergie électrique du moteur est maximum quand elle atteint la moitié de celle de la génératrice, et ce maximum est obtenu lorsque l'intensité du courant n'est plus que la moitié de l'intensité maximum correspondant à l'arrêt du moteur.

On augmenterait ce rendement en se contentant d'un travail utile inférieur au maximum. C'est ainsi que l'on augmente le coefficient d'utilisation des machines à vapeur par la détente, en leur faisant produire un travail moindre que celui qu'elles seraient susceptibles de produire, en travaillant à pleine pression.

217. Calcul de la ligne de transport. — La section des conducteurs dépend de la perte que l'on peut consentir sur la ligne, pour obtenir à l'arrivée une puissance déterminée.

Supposons que, tout compte fait des énergies absorbées par la génératrice et la réceptrice, on dispose encore d'un excédent de 250 kilogrammètres sur la puissance que l'on veut transporter; le courant étant de 10 ampères, par exemple, la résistance R de la ligne pouvant absorber cette énergie sera obtenue par la relation :

$$R \times I^2 = 250 \times 9.81$$

d'où :

$$R = \frac{250 \times 9.81}{100} = 24,5 \text{ ohms.}$$

On en déduira immédiatement la section du conducteur, en millimètres carrés, par la formule :

$$S = \frac{2 \, l \times r}{R},$$

r étant la résistance spécifique et l la distance de transport qu'il faut multiplier par 2, pour tenir compte du conducteur d'aller et du conducteur de retour.

Il est évident que si l'on choisissait un conducteur de plus forte section, la ligne absorberait moins d'énergie et la puissance disponible au lieu d'utilisation serait plus grande; mais les dépenses d'installation de la ligne augmenteraient et l'intérêt annuel des frais de premier établissement pourrait constituer une charge financière supérieure à l'économie que l'on réaliserait sur l'énergie absorbée.

On conçoit donc qu'il existe un moyen terme, pour ainsi dire, entre les sacrifices que l'on peut faire sur le taux d'énergie à perdre dans la ligne et les frais qu'entraîne l'augmentation du diamètre des conducteurs.

Il convient de rechercher, comme l'a fait Thomson, quelle est la section pour laquelle le prix de l'énergie dissipée sur la ligne, ainsi que l'intérêt et l'amortissement des frais de premier établissement, forment un minimum de dépenses.

Soit D le prix de revient en francs du watt-heure et t le temps en heures pendant lequel le courant I est débité annuellement sur la ligne de transport.

La perte d'énergie annuelle sera :

$$R \times I^2 \times t = \frac{2 l \times r \times t}{S} \times I^2 \text{ watts-heure}$$

Et la dépense en résultant :

$$M = \frac{2 l \times r \times t}{S} \times I^2 D \text{ francs}$$

Il convient de prendre pour D , non pas le prix de revient moyen des watts-heure, qu'on obtiendrait en divisant la dépense totale par le nombre de watts-heure distribués, mais le prix afférent à la production d'un watt-heure supplémentaire, venant s'ajouter à la puissance développée pour l'exploitation. Supposons en effet que le prix de revient de 1000 watts-heure, soit de 0 fr. 20 et que pour produire ensuite 1200 watts-heure, la dépense s'élève à 0 fr. 22 ; il en résultera que les 200 watts supplémentaires coûtent 0 fr. 02, soit 0 fr. 0001 par watt, tandis que si l'on avait divisé 0 fr. 22 par 1200, on aurait obtenu un résultat supérieur à 0 fr. 00015.

Le prix de la canalisation se compose, d'une part, du coût de la tranchée qui ne varie pas sensiblement avec la section du conducteur et, d'autre part, du coût du conducteur qui peut être considéré comme proportionnel à sa section.

Soit m le prix par mètre relatif à la main-d'œuvre, tranchées et pose, et n le coût par millimètre carré de chaque mètre de conducteur ; enfin désignons par a le taux de l'intérêt et de l'amortissement par franc ; ces diverses constantes dépendent de la nature des canalisations et des conditions de durée de l'entreprise, spécialement en ce qui concerne a .

L'intérêt et l'amortissement du capital afférent à la canalisation aura donc pour expression :

$$(2 m \times l + 2 n \times s \times l) \times a = 2 (m + n \times s) l \times a$$

De sorte que la dépense totale C annuelle résultant des frais de canalisation et de l'énergie absorbée dans la ligne sera :

$$2 (m + n \times s) \times l \times a + \frac{2 l \times r \times t}{S} \times I^2 \times D = C$$

Toutes les quantités qui figurent dans cette relation sont

données, sauf C et s que l'on cherche à déterminer de manière à rendre C minimum.

Il est évident que les variations de s n'ont aucune influence sur le terme m ; je considérerai donc seulement les termes qui dépendent de s et je supposerai qu'on donne à s une valeur telle que l'on ait :

$$n \times s \times l \times a = \frac{l \times r \times t \times I^2 D}{s}$$

On démontre par le calcul que cette condition correspond au minimum de C , mais on peut s'en rendre compte en remarquant que, si s est très grand, le premier terme qui est multiplié par s prend aussi une grande valeur, tandis que le second terme qui est divisé par la même quantité devient très petit, c'est l'inverse qui se produit si s est faible; les deux termes varient dans tous les cas en sens inverse l'un de l'autre. On conçoit donc que le minimum de la somme des deux termes et par suite de C puisse correspondre à la valeur de s qui rendra justement ces deux termes égaux et, par suite, éloignés l'un et l'autre de leur maximum respectif.

Nous admettrons donc que la dépense afférente au transport de l'énergie est minimum, lorsque le prix de l'énergie absorbée et dissipée en chaleur dans la résistance du conducteur, est égale à la partie des frais de premier établissement de la canalisation proportionnelle à la section du conducteur.

Cette règle établie par Thomson donne la valeur de la densité la plus économique à adopter dans les conducteurs; de la relation précédente, on tire en effet :

$$\frac{I^2}{s^2} = \frac{n \times a}{r \times t \times D} \text{ ou } \frac{I}{s} = \sqrt{\frac{n \times a}{r \times t \times D}} = d$$

Si nous multiplions, d'autre part, les deux membres par $r \times l$, il viendra :

$$\frac{r \times l}{s} \times I = r \times l \times \sqrt{\frac{n \times a}{r \times t \times D}} = R \times I$$

Ce qui nous donne la chute de tension $R \times I$ que l'on peut consentir sur la ligne de transport.

Nous empruntons à Eric Gérard l'exemple numérique suivant pour l'application de ces formules. Soit une puissance motrice de 50 chevaux à transporter électriquement à 10 kilomètres de distance, sous la tension de 2000 volts.

La puissance électrique à développer par la génératrice est :

$$50^{\text{ch}} \times 736 \times 0,94 = 34.600 \text{ watts}$$

en admettant un rendement industriel de 0,94 pour cette dynamo.

De la relation :

$$W = E \times I \text{ ou } I = \frac{W}{E}$$

nous tirons la valeur de l'intensité du courant :

$$I = \frac{43.600}{2.000} = 17,3 \text{ ampères.}$$

Appliquons maintenant la règle de Thomson, en prenant pour les diverses quantités qui figurent dans la formule les valeurs suivantes :

Taux d'intérêt et d'amortissement de la canalisation aérienne, $a = 0 \text{ fr. } 075$.

Prix du fil de bronze, par mètre de longueur et millimètre carré de section, à raison de 3 francs le kilogramme, $n = 0,027$.

Coût d'un watt-heure, à raison de 240 francs le kilowatt-an supplémentaire, pour 2000 heures de travail, $D = 0 \text{ fr. } 00012$.

Nombre des heures de travail, $t = 2000 \text{ heures}$.

Résistance spécifique du bronze, $r = 0,02$.

La formule de Thomson deviendra alors :

$$d = \sqrt{\frac{n \times a}{r \times t \times D}} = \sqrt{\frac{0,027 \times 0,075}{0,00012 \times 2000 \times 0,02}} \\ = 0,65 \text{ ampère.}$$

Soit 0.65 ampère par millimètre carré.

Pour le courant de 17,3 ampères, la section du conducteur sera :

$$S = \frac{17,30}{0,65} = 26,6 \text{ millimètres carrés.}$$

Et le diamètre x , tiré de la relation géométrique :

$$S = \frac{\pi \times x^2}{4}$$

sera :

$$x = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}} = \sqrt{\frac{26,6 \times 4}{3,14}} = 5,8 \text{ millimètres.}$$

La résistance d'une ligne de 20 kilomètres, aller et retour,

construite avec de pareils conducteurs est d'environ 15 ohms; si les dynamos génératrice et réceptrice ont chacune une résistance intérieure de 5 ohms, la résistance totale du circuit sera :

$$R = 5 \times 2 + 15 = 25 \text{ ohms.}$$

La chute de tension dans le circuit est :

$$e_1 = R \times I = 25 \times 17.3 = 433 \text{ volts.}$$

et la force contre-électro-motrice.

$$e = E - e_1 = 2000 - 433 = 1567 \text{ volts.}$$

Le rendement électrique de la transmission est, par suite :

$$Re = \frac{1567}{2000} = 0,785$$

Et le rendement industriel :

$$R_i = 0,785 \times 0,94 \times 0,92 = 0,698$$

en admettant 0,92 comme rapport de l'énergie électrique absorbée par l'électro-moteur à la puissance motrice disponible sur l'arbre de la machine.

FRAIS D'INSTALLATION DE L'USINE. — Dans la discussion précédente, on n'a pas tenu compte des frais d'intérêt et d'amortissement du capital afférent à l'installation de l'usine; or, il est évident que ce capital se trouve accru du fait de l'énergie absorbée par la ligne de transport, laquelle est une fraction plus ou moins grande de la puissance de l'usine.

Si, en effet, on désigne par A la dépense d'installation pour une puissance d'un watt supplémentaire, à la station génératrice, la part imputable à la canalisation dans les frais d'établissement du matériel générateur sera :

$$N = A \times \frac{2l \times r}{S} \times I^2$$

et les frais annuels d'intérêt et d'amortissement qui s'y rapportent auront pour valeur, en désignant par b le taux annuel d'amortissement et d'intérêt de N :

$$N_1 = \frac{b \times A \times 2l \times r \times I^2}{S}$$

La formule établie précédemment :

$$d = \sqrt{\frac{n \times a}{r \times l \times D}}$$

contient en dénominateur le produit $t \times D$, qui figure dans la dépense d'énergie absorbée dans la ligne :

$$M = \frac{t \times D \times 2 l \times r \times I^2}{S}$$

la dépense complémentaire N_1 que nous envisageons actuellement, ne diffère de M qu'en ce que le terme $t \times D$ y est remplacé par $b \times A$; ce dernier terme joue le même rôle que $t \times D$ et nous pouvons, par analogie, compléter la formule de la densité en la remplaçant par la suivante :

$$d_1 = \sqrt{\frac{n \times a}{r(t \times D + b \times A)}}$$

Les aide-mémoire contiennent des tableaux qui, pour des valeurs déterminées de $t \times D$, de $b \times A$ et de $n \times a$ donnent, par simple lecture, la densité de courant la plus économique, dans chaque cas particulier.

OBSERVATIONS. — Les formules précédentes supposent que le courant I , correspondant à la puissance maximum à distribuer, est débité pendant la totalité des heures de travail, mais le courant réel varie constamment; ce n'est donc pas I^2 qui doit figurer dans ces formules, mais le carré d'un courant i supposé constant, et qui soit tel qu'il produise dans la ligne, pendant le temps t , une absorption d'énergie égale à la somme des pertes du fait des courants successifs de régime variable.

Soit i_1, i_2, i_3 , les divers régimes de courants; t_1, t_2, t_3 , les temps pendant lesquels ils se produisent, on aura pour déterminer le courant fictif i , la relation :

$$i^2 \times t = i_1^2 \times t_1 + i_2^2 \times t_2 + i_3^2 \times t_3 = Q$$

d'où :

$$i^2 = \frac{Q}{t} \text{ et } i = \sqrt{\frac{Q}{t}}$$

Remarquons encore que, dans le problème résolu précédemment, on se proposait de transporter une certaine puissance disponible à l'origine de la ligne, avec une force électromotrice donnée, ce qui déterminait l'intensité du courant.

On peut au contraire spécifier la puissance qui doit être fournie au récepteur à l'extrémité de la ligne de transport, tout en fixant le voltage initial E , comme précédemment.

Dans ce cas, il faut que la force électro-motrice initiale,

diminuée de la chute sur la ligne $\frac{2r \times i \times l}{S}$, fournisse la puissance voulue P aux bornes de l'électro-moteur, on a donc :

$$P = i \times \left(E - \frac{2r \times i \times l}{S} \right)$$

On voit alors que la puissance P peut s'obtenir avec des courants différents, suivant la valeur qui pourra être donnée à la section S du conducteur, c'est-à-dire que i n'est pas déterminé au préalable. Il y aura donc lieu de rechercher les valeurs simultanées de i et de S qui rendent minimum les frais d'exploitation.

MM. Ayrton et Perry ont établi les formules qui permettent de calculer la densité la plus économique dans les conditions précitées ; on ne peut les utiliser pratiquement qu'en se servant des tableaux donnés par les aide-mémoire, auxquels nous renverrons le lecteur sans insister autrement sur cette question complémentaire.

Il convient dans tous les cas que la chute de voltage sur la ligne ne soit pas exagérée, et l'on estime généralement qu'elle ne doit pas dépasser 10 pour 100 de la tension totale, de l'origine jusqu'aux récepteurs. Quand la distribution se fait par feeders, on peut admettre une perte de voltage de 10 à 20 pour 100 dans les feeders, de 1 à 1,5 pour 100 dans les distributeurs et de 2 pour 100 dans les branchements.

Il faut aussi avoir égard à l'échauffement possible des conducteurs et ne dépasser, en aucun cas, les densités extrêmes de 6 ampères par millimètre carré de section pour les fils nus tendus à l'air, et de 1 ampère au maximum pour les câbles souterrains à grand isolement, de plus de 200 millimètres carrés de section.

Électro-moteurs à courant continu.

218. **Mode d'entraînement de l'électro-moteur.** — Considérons une dynamo à induit annulaire, avec excitation en série (fig. 368) et réduisons, pour simplifier le schéma,

l'enroulement à quatre bobines symétriquement disposées sur le pourtour de l'anneau.

Le flux de force traverse l'armature de N en S : dans la bobine A, ce flux pénètre par la face négative de ce solénoïde, celui-ci sera donc sollicité à se déplacer dans le sens de la flèche, de manière à rendre maximum, suivant la loi indiquée, le flux qui le pénètre par cette face. Il en est de même des spires de la bobine opposée C, qui reçoivent le flux par leurs faces négatives.

Au contraire, la bobine B présente au flux inducteur sa face positive et lui oppose par suite son propre flux ; le flux résultant de la différence sera donc d'autant plus grand que le flux soustractif inducteur se rapprochera davantage de zéro ; il faudra pour cela que la bobine B se dirige vers l'axe polaire en N et son mouvement concordera avec celui des

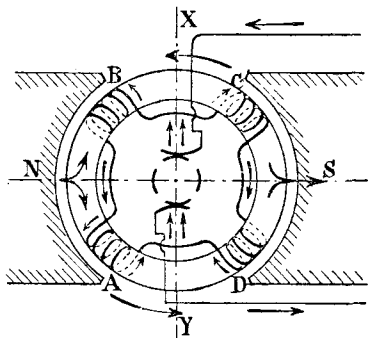


FIG. 368. — Réversibilité de l'anneau Gramme.

bobines précédentes. On verrait de même que la bobine D occupant le dernier quadrant conspire avec les trois autres bobines pour entraîner l'anneau dans le sens inverse de la rotation des aiguilles d'une montre.

Il est facile de vérifier sur ce schéma que, conformément à la loi de Lenz, le mouvement d'entraînement de l'induit est justement de sens contraire à celui qu'il faudrait imprimer mécaniquement à l'arbre de la dynamo, pour engendrer un courant de même sens que le courant d'alimentation employé.

Pour qu'il en soit ainsi, d'ailleurs, il est nécessaire que l'orientation du champ inducteur n'ait pas changé, et c'est ce qui arrive précisément dans un moteur excité en série.

Il n'en est plus de même pour un moteur schunt, ou excité en dérivation; aussi un pareil moteur doit-il tourner toujours dans le même sens que quand il fonctionne comme génératrice.

En effet, soit une génératrice *G* tournant dans le sens de la flèche *f* et produisant un courant qui traverse l'induit et l'inducteur *A* dans les sens respectivement indiqués sur le schéma (fig. 369).

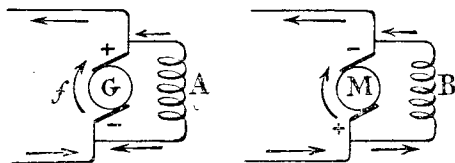


FIG. 369. — Sens de rotation d'un moteur schunt.

Si on lance un courant de même sens dans la ligne d'alimentation d'un électro-moteur *M*, la dérivation dans le schunt *B* aura un sens contraire à celui du schunt *A* de la dynamo génératrice. Si le courant excitateur eût été le même, l'induit *M* aurait tourné en sens inverse de l'induit *G*, il tournera donc dans le même sens puisque les pôles du champ inducteur ont été intervertis.

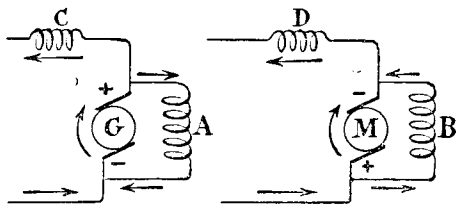


FIG. 370. — Sens de rotation d'un moteur compound.

S'il s'agit de machines compound (fig. 370), on voit que la polarité du champ inducteur développé par l'enroulement schunt, est inverse de celle de la génératrice, dans l'électro-moteur. Si donc l'excitation du schunt l'emporte sur celle de l'inducteur en série *D*, tout se passera comme

si l'excitation schunt existait seule, et l'on se retrouvera dans le cas précédent; le moteur tournera alors pour un courant extérieur de même sens, comme la génératrice; si c'est au contraire l'excitation série qui est prépondérante, le moteur tournera en sens inverse.

Il est évident d'ailleurs que l'on peut disposer l'enroulement schunt de telle sorte qu'il agisse dans le même sens que l'excitation en série; le cas sera alors analogue à celui du moteur à excitation unique en série.

On voit enfin, d'après ce qui vient d'être dit, que pour changer le sens de rotation d'un moteur, il suffira de changer le sens du courant, soit dans l'inducteur, soit dans l'induit; si l'on changeait le sens du courant dans les deux organes à la fois, le sens de rotation ne changerait pas.

CALAGE DES BALAIS. — Dans une génératrice, les balais doivent être calés par rapport au mouvement de rotation, en avant de la ligne perpendiculaire à l'axe des pôles inducteurs. En effet, nous savons que, par suite de la réaction d'induit, le champ magnétique subit une sorte de distorsion qui tend à refouler le flux de force en avant du mouvement de l'induit; il faut donc que les bobines commutées se trouvent suffisamment portées en avant de la ligne neutre, au moment du passage des balais d'une lame à l'autre, pour être placées dans un champ magnétique capable de neutraliser leur self-induction et d'y établir un courant de même sens et de même intensité que celui qui règne dans la nouvelle section où rentrent ces bobines (tome I, § 115).

Considérons maintenant l'induit d'un moteur série tournant dans le sens de la flèche f (fig. 371), si cette dynamo fonctionnait comme génératrice, avec un courant extérieur de même sens, elle tournerait suivant la flèche pointillée f' soit en sens inverse du moteur et les balais seraient calés sur le diamètre $A_1 B_1$ formant un angle de calage φ

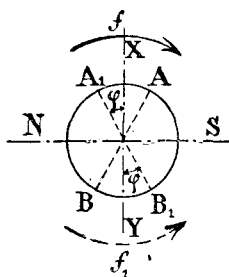


FIG. 371. — Calage des balais.

en avant du mouvement. Mais cet angle correspond à la région du flux de force maximum, qui est déterminée par l'intensité et spécialement par le sens du courant extérieur; comme ce sens est resté le même, par hypothèse, dans le cas du moteur et dans celui de la génératrice, les balais resteront à la même place $A_1 B_1$ pour l'électro-moteur. Or, ce même diamètre fait un angle φ en arrière de l'axe XY par rapport au mouvement de rotation du moteur, donc l'angle de calage est en arrière, au lieu d'être en avant comme dans la génératrice.

Nous arriverons aux mêmes conclusions pour un moteur schunt. En effet celui-ci tourne dans le même sens f_1 que la génératrice (fig. 369); mais le champ inducteur ayant une polarité inverse, le flux maximum se trouve reporté en arrière du mouvement et les balais devront être calés suivant le diamètre AB .

Il en sera de même pour un moteur compound; quel que soit le sens de rotation, les balais, pour éviter les étincelles, devront toujours être décalés en arrière sur le mouvement de l'induit.

COUPLE MOTEUR. — L'effort qui détermine le mouvement de rotation de l'anneau est nécessairement produit par une force tangentielle, analogue à celle que développe une courroie sur la jante d'une poulie; cette force est d'ailleurs proportionnelle au produit des intensités du courant et du champ inducteur.

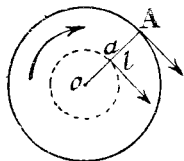


FIG. 372. — Couple moteur.

Considérons (fig. 372) un corps a mobile sur la trajectoire circulaire de r mètre de rayon et de centre o ; il parcourra, par seconde, sur la circonférence, un chemin

$$S = 2 \pi \times N$$

N étant le nombre de tours effectués pendant l'unité de temps. Soit f la force tangentielle qui l'entraîne; la puissance égale au produit de la force par le chemin parcouru par seconde, sera :

$$W = 2 \pi \times N \times f.$$

Si la force motrice était appliquée en A à l'extrémité d'un rayon de longueur l , elle aurait pour un même effort tangentiel, une valeur f_1 telle que l'on pourrait écrire :

$$l \times f_1 = 1 \times f = C$$

en effet, d'après les lois de la mécanique, les effets des forces sont proportionnels à la longueur de leurs bras de levier.

La quantité C , produit de la force par le rayon de la trajectoire, est le *couple moteur*, et la force reçoit elle-même le nom de *torque* ou force angulaire.

Dans tout système mécanique en mouvement, ayant atteint sa vitesse de régime, le couple de la force motrice est égal au couple résistant, car s'il en était autrement la vitesse irait en croissant et ne serait pas uniforme. Si l'on désigne par K le couple résistant qui doit être équilibré par l'effort moteur C , on aura, à l'état de régime, la relation :

$$2 \pi \times N \times C = 2 \pi \times N \times K$$

qui exprime que la puissance motrice est égale à la puissance résistante.

La puissance motrice disponible sur l'arbre du moteur est engendrée par la puissance électrique $e \times I$. Si l'on néglige les frottements mécaniques et magnétiques ou d'hystérésis, ainsi que les courants de Foucault, la loi de la transformation équivalente de l'énergie, nous donne :

$$2 \pi \times N \times C = e \times I$$

Or e représente la force électro-motrice d'induction engendrée par la rotation de l'armature dans le champ des inducteurs ; on a donc la relation :

$$e = \frac{n \times N \times N}{10^8} \text{ volts}$$

qui, portée dans l'égalité précédente, donne :

$$2 \pi \times N \times C = \frac{I \times n \times N \times N}{10^8}$$

d'où l'on tire :

$$C = \frac{I \times n \times N}{2 \pi \times 10^8} \text{ joules}$$

On voit que le couple moteur est indépendant de la vitesse de rotation N et ne dépend que de l'intensité du courant, le

flux N étant lié lui-même invariablement à cette intensité, dans un moteur excité en série particulièrement.

La loi de l'invariabilité du courant pour un effort résistant donné a été démontrée expérimentalement par Marcel Deprez, dans les conditions suivantes. Un frein de Prony, chargé d'un poids déterminé, étant placé sur la poulie d'un moteur en série, la dynamo fut soumise à une différence de potentiel croissante; dès que le courant eut atteint l'intensité voulue pour faire démarrer le moteur, il resta à très peu près constant, malgré l'augmentation du potentiel qui n'avait d'autre effet que d'accroître la vitesse, en proportion de la puissance fournie au moteur.

219. Conditions de fonctionnement des moteurs. — Ces conditions dépendent : 1° du mode d'excitation des électromoteurs; 2° du mode de distribution employé sur le réseau dont ils reçoivent l'énergie, soit qu'il s'agisse d'une distribution en série, c'est-à-dire à courant constant, ou d'une distribution en dérivation et par suite à potentiel constant. Il y a donc lieu d'étudier chaque type de moteur, dans les deux systèmes de distribution.

MOTEUR SÉRIE. — Supposons d'abord que ce moteur est alimenté par une distribution à courant constant. Le couple moteur ayant pour valeur :

$$C = \frac{I \times n \times N}{2 \pi}$$

sera constant, car I est invariable par hypothèse et N ne dépend que du courant qui passe tout entier dans l'enroulement inducteur. Pour que le moteur puisse démarrer, il faudra donc que cette valeur de C soit supérieure au couple résistant K . Si la charge ou le couple résistant décroît, la vitesse s'accélère jusqu'à ce que les résistances passives compensent la diminution de charge.

En second lieu, dans le cas de la distribution à potentiel constant, le courant sera maximum au démarrage, c'est-à-dire au repos; I et N sont en effet maxima à ce moment. La vitesse va s'accroissant, d'après la loi générale de la mécanique, jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre l'effort moteur et la résistance; e croît avec la vitesse et, par suite, I et N diminuent ainsi que C .

Dans le cas d'une charge nulle, et de résistances passives relativement faibles, comme il arrive dans les grands moteurs,

la vitesse peut prendre une valeur excessive et l'enroulement série doit être évité à ce point de vue.

Quand l'électro-moteur sur distribution à tension constante est mis en marche à forte charge, le courant peut atteindre une intensité dangereuse, avant que la vitesse ait acquis sa valeur de régime capable de développer une force contre-électro-motrice suffisante.

Pour obvier à cet inconvénient, on intercale dans le circuit soit un rhéostat métallique ou liquide, ce dernier constitué par de l'eau acidulée d'acide sulfurique ou par une dissolution de bicarbonate de soude; soit un électro-aimant disjoncteur.

On a la relation de régime, pour une charge K imposée:

$$2 \pi \times K = 2 \pi \times C = n \times N \times I$$

D'autre part, si V est le voltage constant de la distribution, on a :

$$V = e + r \times I, \text{ d'où : } e = V - r \times I$$

L'équation donnant la vitesse N pourra dès lors s'écrire :

$$2 \pi \times C \times N = e \times I = (V - r \times I) \times I$$

D'où l'on tire :

$$N = \frac{(V - r \times I) \times I}{2 \pi \times C} = \frac{(V - r \times I) \times I}{n \times N \times I}$$

Ou finalement :

$$N = \frac{V - r \times I}{n \times N}$$

Puisqu'il s'agit ici d'un moteur série, N dépend exclusivement de I ; si la charge K augmente, I et par suite N augmentent tous deux. Cette relation montre que le nombre de tours ou la vitesse diminuent, si K et par suite I et N augmentent, ces variations ayant pour effet de réduire la valeur du numérateur et d'accroître le dénominateur; la vitesse augmente au contraire, et peut s'élever à un taux exagéré et pouvant présenter du danger, si la charge K diminue.

Le couple de démarrage est maximum; au début, en effet, avant la mise en marche, la force contre-électro-motrice e est nulle et l'on a :

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

d'où :

$$I = \frac{V}{r}$$

C'est la plus grande valeur que puisse prendre l'intensité, comme nous l'avons déjà dit; dans ce cas, le couple moteur :

$$C = \frac{n \times N \times I}{2 \pi}$$

devient lui-même très grand, I et N étant maxima.

MOTEUR EN DÉRIVATION. — Dans ce cas, la dérivation du schunt donne lieu à deux nouvelles relations. En effet, si l'on désigne par i et i_1 les courants dans l'induit et dans le schunt; par V la différence de potentiel aux bornes de la dynamo ou aux extrémités de l'enroulement inducteur; par r_1 la résistance de ce circuit et par I le courant total invariable absorbé par la dynamo, on aura d'une part :

$$I = i + i_1;$$

d'autre part :

$$i_1 = \frac{V}{r_1} \text{ ou } V = r_1 \times i_1$$

Dans le cas de la distribution à courant constant, le courant qui traverse l'inducteur en dérivation est d'abord très faible, mais la force électro-motrice e , développée par la rotation de l'induit, vient augmenter la différence de potentiel aux bornes, puisque l'on a, outre la valeur ci-dessus de V , l'expression générale :

$$V = e + r \times i$$

en désignant par r et i la résistance du circuit induit et le courant dans ce circuit.

Il en résulte la relation :

$$e + r \times i = r_1 \times i_1$$

d'où l'on tire :

$$i_1 = \frac{e + r \times i}{r_1}$$

Le courant exciteur i_1 croît donc avec la force contre-électro-motrice e , si l'on peut considérer le terme $r \times i$ comme à peu près constant. Or, le courant i_1 est toujours une faible fraction de I , de sorte que i diffère très peu de I , quelles que soient les variations de i_1 ; on peut donc écrire approximativement :

$$i_1 = \frac{e + r \times I}{r_1}$$

ce qui justifie la proposition énoncée.

Le courant i_1 croissant, le couple moteur qui dépend du flux inducteur N augmente et la machine devient capable de surmonter une résistance croissante.

Pour démarrer plus rapidement en charge, on ajoute une résistance dans le circuit induit, pour augmenter la dérivation dans l'inducteur et on l'enlève ensuite graduellement, à mesure que la vitesse augmente.

Dans le cas de la distribution en dérivation nous avons toujours, entre la différence de potentiel aux bornes et l'intensité du courant exciteur, la relation :

$$i_1 = \frac{V}{r_1}$$

mais avec cette condition que le potentiel V est constant, donc i_1 est invariable et N est constant, abstraction faite de la réaction d'induit.

Par suite, le couple moteur :

$$2 \pi \times C = n \times N \times i$$

est maximum au démarrage, N étant invariable et i maximum à ce moment. Puis i diminue à mesure que la vitesse augmente, et $2 \pi \times C$ décroît, mais moins rapidement que dans le moteur en série, N restant à peu près constant dans le cas actuel.

La vitesse a toujours pour expression :

$$N = \frac{V - r \times i}{n \times N} = \frac{e}{n \times N}$$

Contrairement à ce qui se produisait pour la dynamo série, cette formule montre que dans le cas du moteur schunt, la vitesse reste à peu près constante quelle que soit la charge. En effet, r ne dépasse pas quelques dixièmes d'ohms et le produit $r \times i$ est généralement faible vis-à-vis de V ; N est donc à peu près indépendant de I et par suite de la charge K , puisque l'on a :

$$2 \pi \times K = n \times N \times i$$

En réalité, le produit $r \times i$, quoique relativement faible, n'est pas négligeable, et lorsque K et i augmentent, le numérateur $(V - r \times i)$ de l'expression de N , diminue légèrement, mais la quantité N en dénominateur n'est pas non plus absolument constante et elle diminue aussi par suite de la réaction croissante d'induit. Il se produit ainsi une compensation entre le numérateur et le diviseur et le nombre de tours varie peu avec

le courant, qui est lui-même sensiblement proportionnel au couple moteur.

Il en serait de même pour un moteur à excitation indépendante, pour lequel N est constant.

EXCITATION COMPOSÉE. — Si la réaction d'induit était négligeable, N serait absolument constant et la compensation que nous avons invoquée ci-dessus ne se ferait plus ; toute augmentation de i déterminerait une réduction du numérateur qui diminuerait la valeur de la vitesse, et inversement pour une diminution du courant.

Dans le cas où la réaction d'induit est insuffisante pour assurer la constance de la vitesse, on ajoute sur les noyaux de l'inducteur un enroulement en série, donnant une excitation inverse de celle du schunt et produisant, par suite, un affaiblissement du flux N qui compense l'effet de l'accroissement du courant. Pour le démarrage on supprime l'excitation, ou, ce qui est encore plus efficace, on renverse le courant dans l'enroulement en série, de manière à ce que les effets des deux excitations s'ajoutent dans le circuit magnétique.

Dans le cas de charge variable et notamment de surcharge éventuelle, le courant peut prendre une intensité anormale dans l'induit et, par suite, dans les bobines-série de l'inducteur ; l'excitation série devenant alors prépondérante, sera capable d'intervertir l'aimantation normale des électros correspondant à l'excitation de l'enroulement en dérivation.

L'enroulement compound, au lieu d'être différentiel, peut comporter deux excitations schunt et série disposées pour ajouter leurs effets ; ce moteur participe alors des propriétés des deux systèmes d'excitation. Ce dispositif est surtout recommandable lorsque les courants intenses qui s'établissent au démarrage déterminent une chute de tension que la source d'électricité est impuissante à compenser. La différence de potentiel diminuant aux bornes du moteur, le champ dérivé tend à faiblir ; mais il est renforcé par l'enroulement série dont l'excitation croît au contraire avec le courant.

220. Caractéristiques des moteurs. — On peut représenter par des courbes les diverses circonstances du fonctionnement des moteurs. A cet effet, on tracera deux axes rectangulaires sur lesquels on portera en abscisses, soit l'in-

tensité du courant, soit la vitesse ou le nombre de tours par minute, et en ordonnées l'une quelconque des quantités, puissance, rendements électrique ou industriel, qui interviennent dans le fonctionnement des électro-moteurs.

L'examen de ces courbes dressées pour les trois catégories de moteurs, série, schunt, compound différentiel ou concourant, permet de comparer utilement les qualités propres à ces différents types de moteurs.

Les caractéristiques ne sont que la représentation graphique des divers éléments électriques et mécaniques du fonctionnement du moteur. On peut se proposer par exemple, de rechercher comment varient la puissance électrique dépensée, la puissance mécanique recueillie, les rendements électriques et industriels, lorsque, maintenant une différence de potentiel constante aux bornes du moteur, on fait varier la vitesse de rotation.

Ces constatations comportent donc à la fois des mesures mécaniques et électriques ; les premières s'effectuent, par exemple, à l'aide du frein de Prony dont on fait varier la charge, et les mesures électriques au moyen d'un ampèremètre et d'un voltmètre.

Considérons d'abord le cas d'un moteur série. Supposons que le frein soit placé sur la poulie de la dynamo et que la charge soit réglée de sorte que l'induit tourne à 450 tours.

On mesure le courant à ce moment, et le produit $E I$ donne la valeur de la puissance électrique P dépensée ; on porte en am (fig. 373), à une échelle déterminée, une longueur représentant le nombre de watts correspondant ; on calcule en même temps, d'après la charge du frein et le nombre de tours du moteur, le travail utile recueilli, soit an ; enfin, le rapport $\frac{p}{P} = R_i$ donne le rendement industriel correspondant, soit aq l'ordonnée représentative. En opérant de même pour les diverses vitesses, on obtiendra les courbes P de la puissance électrique fournie, p de la puissance mécanique utile et R_i du rendement industriel.

Ces courbes, qui peuvent varier d'un moteur à l'autre, conservent cependant la même allure pour tous les moteurs de cette catégorie, c'est-à-dire à excitation en série.

On voit que les quantités représentées sur le diagramme passent chacune par un maximum. Pour le travail utile, ce maximum aurait lieu vers 420 tours et serait représenté par l'ordonnée bu .

Puis la vitesse augmentant, la puissance utile diminue, on peut admettre qu'elle a atteint pratiquement sa valeur

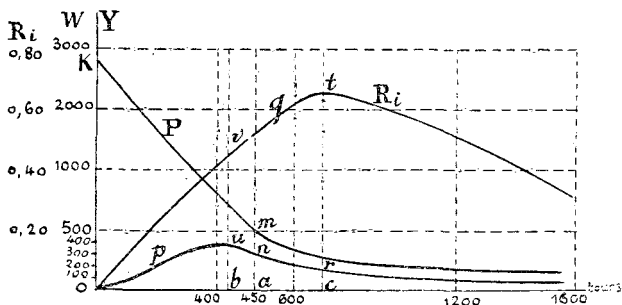


FIG. 373. — Caractéristique d'un moteur série.

minimum à 1200 tours, vitesse à partir de laquelle la décroissance du travail utile est à peu près insensible.

Au moment de la puissance utile maximum, le rendement est seulement représenté par bv , et il continue à croître rapidement à partir de ce point jusqu'à ct , où il atteint son maximum pour une vitesse de 630 tours ; la puissance est alors faible, étant représentée par cr . Le mieux est de se placer dans des conditions moyennes de marche, et l'on voit à la simple inspection de la courbe que le meilleur régime est celui qui correspond à la vitesse de 450 tours environ, pour laquelle la puissance est assez voisine du maximum et le rendement peu éloigné de 60 pour 100.

Les ordonnées de la courbe $P = E \times I$ sont proportionnelles à l'intensité I , puisque E est supposé constant. On

voit que, pour la vitesse nulle, la puissance électrique dépensée est maximum et représentée par $O K$; il en est de même du courant I ; le couple moteur est donc bien maximum au démarrage. Au fur et à mesure que la vitesse augmente, cette puissance et le courant I diminuent pour converger vers zéro, sans toutefois l'atteindre à l'état de régime permanent.

Au lieu de porter en abscisses les vitesses de rotation, on peut construire les courbes de rendement, de puissance et de vitesse en fonction des intensités de courant figurées sur l'axe des X . Nous empruntons à l'ouvrage de M. J. Laffargue les diagrammes suivants de moteurs série, schunt et compound différentiel.

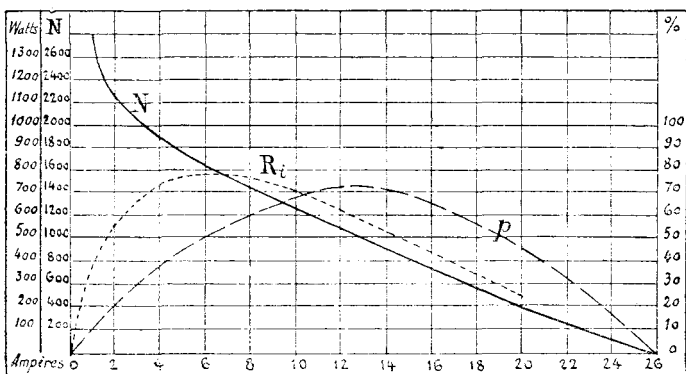


FIG. 374. — Caractéristique d'un moteur série en fonction de l'intensité.

Si nous lisons à rebours le diagramme (fig. 374), nous ferons décroître l'intensité de 26 à zéro ampères et la vitesse N croîtra de zéro à 2.800 tour par minute.

L'intensité de 26 ampères est la valeur maximum du courant au moment du démarrage, c'est-à-dire lorsque l'électro-moteur est au repos. A ce moment, le travail utile p est nécessairement nul, puis il va en croissant jusqu'au maximum de 700 watts environ, qu'il atteint pour

l'intensité de courant de 13 ampères ; à partir de ce point, la puissance va en diminuant et redevient nulle pour le cas où l'intensité du courant est elle-même tombée à zéro, à l'origine du diagramme.

Quant au rendement industriel R_i , il est de 25 pour 100 environ pour 20 ampères, croît jusqu'à 75 pour 100 et devient nul pour le courant nul.

On voit, d'après l'inspection des courbes, qu'en se contentant d'un rendement de 70 pour 100, très raisonnable pour un moteur de faible puissance tel que celui qui fait l'objet du diagramme, la puissance développée pour le courant de 10 ampères correspondant est très voisine du maximum.

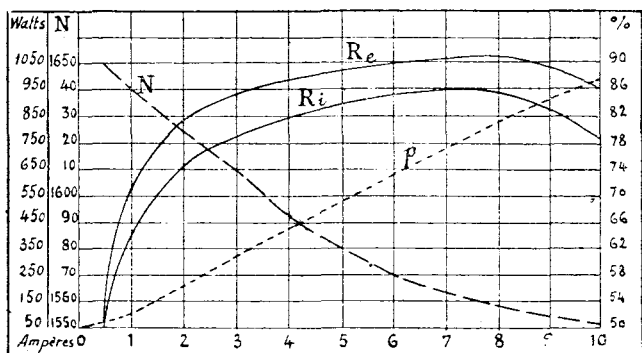


FIG. 375. — Caractéristique d'un moteur schunt en fonction de l'intensité.

La figure 375 représente la caractéristique d'un moteur schunt. A l'extrémité de droite de la courbe, le courant est environ de 10 ampères : l'intensité allant en décroissant, la vitesse croît de 1550 tours à 1650, c'est-à-dire que la variation ne dépasse pas en pratique 10 pour 100.

La puissance maximum est atteinte pour la vitesse initiale considérée de 1550 tours : les rendements électrique et industriel R_e et R_i prennent tout de suite une valeur élevée et se maintiennent avec une décroissance

insensible à partir du maximum, jusqu'au courant de 3 ampères ; après quoi ces rendements tombent rapidement vers zéro, à l'origine.

On remarquera ici que le maximum de rendement se trouve dans la même région que le maximum de puissance : les conditions de fonctionnement de ce moteur sont donc particulièrement avantageuses à ce point de vue.

La caractéristique du moteur compound à enroulement différentiel, telle qu'elle est présentée par la figure 376, montre que la vitesse est constante à tous les régimes de

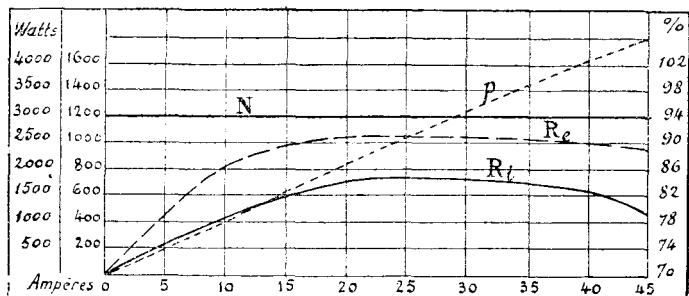


FIG. 376. — Caractéristique d'un moteur compound à enroulement différentiel.

courant, depuis l'intensité de 45 ampères voisine du démarrage, jusqu'à l'intensité zéro, à l'origine du diagramme.

La puissance utile est également maximum pour la valeur maximum de l'intensité. Quant aux rendements électrique et industriel, ils sont à très peu près constants aux divers régimes, depuis 45 ampères, jusqu'à l'intensité réduite de 15 ampères.

La caractéristique d'un moteur compound à enroulements concourants se présente dans les mêmes conditions que la précédente, en ce qui concerne la constance de la vitesse : mais les maxima des rendements ne coïncident pas avec le maximum de puissance.

Au point de vue des moteurs de diverses puissances, le

rendement électrique est très faible pour les petits moteurs; il ne dépasse pas 65 pour 100 pour les moteurs d'une puissance inférieure à 100 watts; puis il augmente rapidement, atteint 95 pour 100 vers 10 kilowatts et ne croît plus que d'une manière insensible, sans dépasser 96 à 97 pour 100 pour les moteurs de très grande puissance.

Le poids par kilowatt utile est aussi très variable, suivant les types de moteurs et le nombre des pôles inducteurs; depuis les faibles puissances jusqu'à celle de 50 kilowatts, le chiffre varie de 250 à 80 kilogrammes.

221. Démarrage. Arrêt. Réglage de la vitesse et de la puissance. Changement de marche. — Nous avons vu qu'au démarrage, surtout si le moteur est en charge, c'est-à-dire accouplé à la machine qu'il doit actionner, et avant que la vitesse soit devenue assez grande pour développer une force contre-électro-motrice suffisante, le courant, sur une distribution à potentiel constant, peut atteindre une intensité capable de détériorer et même de détruire les fils des enroulements du moteur.

Pour opposer un frein à ce courant, on introduit, à la mise en marche, une résistance réglable dont on supprime successivement les diverses sections, au fur et à mesure que la vitesse de rotation augmente pour atteindre sa valeur de régime. Cette résistance se trouve naturellement insérée dans le circuit de l'induit, quand il s'agit d'un moteur série; on l'établira également dans ce circuit et non dans la dérivation de l'inducteur, si l'on a affaire à un moteur schunt.

Dans le cas du moteur série, on peut utiliser la résistance de l'enroulement inducteur, qui fait partie du circuit général, en couplant les diverses bobines de cet enroulement, reliées aux bornes d'un commutateur approprié, soit en série, soit en quantité, successivement, au démarrage et en cours de marche.

La puissance se règle par le même procédé. Puisque cette puissance est entièrement liée à l'intensité du courant transmis au moteur, il suffira de faire varier la

résistance additionnelle intercalée dans le circuit, pour obtenir telle intensité et, par suite, telle puissance que l'on voudra, dans les limites de fonctionnement normal de la machine. On réglera de même la vitesse, qui dépend directement de la puissance.

La puissance est également fonction du champ inducteur, on pourra donc la modifier, en faisant varier l'excitation. Dans le cas du moteur série, ce réglage peut être réalisé en plaçant une résistance réglable R , en dérivation aux bornes des inducteurs (fig. 377); on dérive ainsi par cette résistance une fraction plus ou moins grande du courant excitateur de l'inducteur I , ce qui modifie la puissance dans le même sens.

Le changement de marche s'opère, comme nous l'avons dit, en changeant le sens du courant dans l'inducteur ou dans l'induit, mais non dans les deux organes à la fois, qu'il s'agisse d'un moteur schunt ou d'un moteur série.

Les balais, devant toujours être calés en arrière du mouvement, le calage doit changer avec le sens de rotation; mais il ne suffit pas de déplacer les balais,

il faut encore renverser leur inclinaison sur le collecteur, afin d'éviter le rebroussement des fils et le broutement des balais. On emploie alors des porte-balais doubles, tels que ceux de l'appareil représenté par la figure 378; cha-

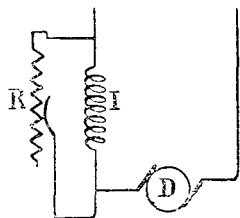


FIG. 377. — Résistance en dérivation sur l'inducteur d'un moteur série.

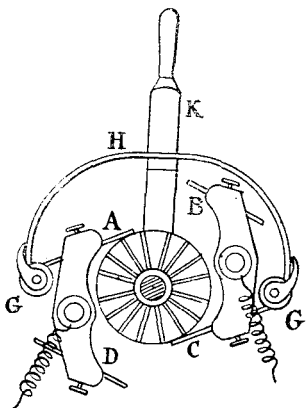


FIG. 378. — Appareil de changement de marche.

cun d'eux est mobile autour d'un axe ; le levier de commande K, pivoté sur l'arbre, entraîne un arc II, muni de galets G qui viennent appuyer successivement les balais A et C ou B et D, suivant que l'on manœuvre ce levier dans un sens ou dans l'autre.

La figure 379 reproduit un appareil complet de mise en marche pour moteur schunt à courant continu. Le

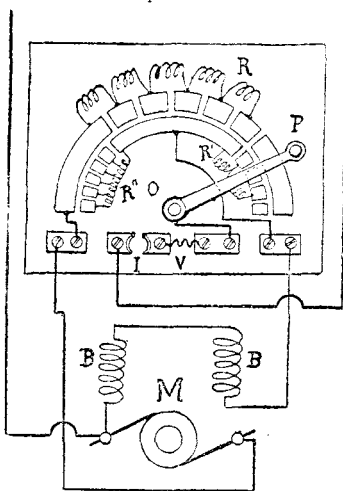


FIG. 379 — Appareil de mise en marche pour moteur schunt.

manipulateur P pivoté sur l'axe o, se déplace sur deux arcs de plots concentriques ; l'arc intérieur est en relation avec les inducteurs en dérivation B et avec l'un des conducteurs extérieurs, à travers le manipulateur P, le coupe-circuit V et l'interrupteur à fiche I ; l'arc extérieur communique de son côté avec l'une des bornes du moteur, directement et avec le même fil de ligne, par l'intermédiaire du manipulateur précité.

Celui-ci est complètement ramené sur la droite dans la position de repos : l'inducteur et l'induit sont alors complètement séparés de la ligne d'alimentation. Pour la mise en marche ; on tourne lentement la manette P de droite à gauche et le circuit inducteur se trouve relié aux pôles de la ligne, par l'intermédiaire des résistances R' qui sont enlevées successivement, de manière à donner au champ son excitation maximum.

Le manipulateur arrivant ensuite sur les plots des résistances R, l'induit se trouve relié à son tour aux pôles de la ligne, à travers ces résistances, qui s'éliminent par le jeu du manipulateur et sont complètement mises hors du cir-

cuit, lorsque le moteur a acquis sa vitesse de régime.

Les petits contacts avec résistances R'' servent à réduire le courant excitateur, en cours de marche, pour diminuer au besoin la vitesse.

Pour arrêter le moteur, on reporte rapidement le manipulateur sur la droite, dans la position de repos.

Le but de la résistance R' , intercalée dans le circuit inducteur, est de diminuer l'intensité du courant d'excitation et de réduire l'étincelle qui se produit à la rupture du circuit, sur le dernier contact de droite.

Cette disposition est suffisante pour les moteurs de faible puissance et de voltage moyen, ne dépassant pas 8 à 10 chevaux et 250 volts; mais pour les moteurs de puissance supérieure, il convient d'employer pour la rupture du circuit inducteur des moyens plus efficaces, afin d'éviter l'étincelle

qui, dans le cas d'un courant notable, prend une intensité considérable due à la self-induction de l'enroulement inducteur.

L'un des meilleurs systèmes consiste à mettre l'armature en court-circuit sur l'inducteur, suivant la disposition indiquée par le schéma de la figure 380, lequel est relatif à un moteur en dérivation. Dans la position de repos le manipulateur est à gauche; on le manœuvre à droite pour mettre le moteur en mouvement.

Le champ est d'abord excité à travers l'armature M et les résistances r et R ; le courant très faible qui passe dans ce circuit sert à faire démarrer le moteur. On manœuvre

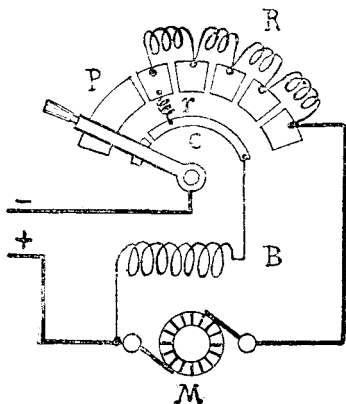


FIG. 380. — Appareil de mise en marche pour moteur puissant.

lentement le commutateur jusqu'à ce que toutes les résistances soient éliminées. Lorsqu'on reporte celui-ci rapidement sur la gauche pour arrêter le moteur, l'extra-courant de rupture trouve, au moment où le manipulateur quitte le secteur C, un circuit à résistance limitée, à travers R, r , B et M : il s'écoulera donc par cette voie, et l'étincelle de rupture entre le secteur C et le manipulateur sera très petite. En même temps, la force électro-motrice de self-induction de l'enroulement inducteur B, étant répartie sur l'ensemble des résistances du court-circuit, ne peut créer une grande différence de tension entre les spires voisines du système inducteur dont l'isolement ne risque plus d'être compromis.

Moteurs à courants alternatifs.

222. Classification. — Les moteurs à courants alternatifs se divisent en deux grandes classes : les *moteurs synchrones* et les *moteurs asynchrones*, tant monophasés que polyphasés.

A la première catégorie appartiennent les moteurs à courants alternatifs simples ou monophasés, lorsque ces alerno-moteurs sont à champ constant, excité par un courant continu.

Les moteurs polyphasés synchrones se distinguent également par la présence d'une armature à polarité constante.

Les moteurs de la deuxième catégorie comportent un champ inducteur alternatif quand il s'agit des alternomoteurs à courants monophasés, et une armature munie d'enroulements induits par les courants polyphasés de la transmission de force, dans le second cas.

223. Moteurs synchrones à courants alternatifs simples. — Les alternateurs ou dynamos génératrices à courants alternatifs sont réversibles, comme les génératrices à courants continus. De même que la génératrice, l'alternomoteur doit être excité par un courant continu : de sorte que le

champ inducteur conserve toujours la même polarité. L'organe inducteur peut donc être formé, soit d'un aimant permanent, soit d'un électro-aimant excité par une génératrice indépendante à courants continus. On peut encore réaliser l'auto-excitation, en redressant à l'aide d'un commutateur approprié, une partie du courant agissant, avant de diriger la dérivation dans le courant inducteur.

Considérons deux machines magnétos Siemens (fig. 381), exactement semblables, dont l'une A fonctionne comme génératrice et l'autre B comme réceptrice. La génératrice A envoie un courant alternatif dans l'induit du moteur B, par l'intermédiaire des anneaux isolés *bd*, *mp*, calés sur les arbres et qui ont été représentés schématiquement en dessous, pour plus de clarté.

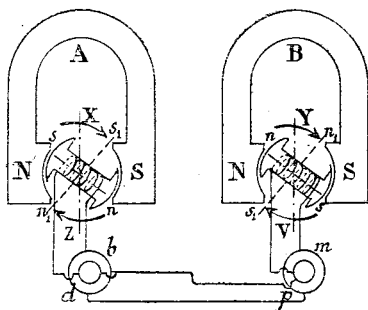


FIG. 381. — Machines magnétos Siemens, génératrice et moteur à courants alternatifs.

Les connexions sont disposées de manière à ce que le courant qui pénètre en B fasse naître un pôle *n* dans l'armature de l'induit, en face du pôle inducteur N de même nom et de même pour le pôle sud. Si nous supposons qu'à ce moment l'armature B soit orientée comme il est indiqué sur le schéma, le pôle *n* de l'armature sera repoussé vers le haut par le pôle N de l'aimant, et le pôle *s* de l'autre extrémité vers le bas par le pôle S inducteur, et l'induit tournera dans le sens des flèches figurées.

Puis l'induit de la génératrice A, continuant à tourner, viendra dans la position symétrique *s*₁ *n*₁, et si l'on suppose que l'induit de B se trouve arrêté de la même manière, l'extrémité *n*₁ plus voisine maintenant de S que de N, sera attirée par le premier de ces pôles; il en sera de même de

l'extrémité s_1 qui sera attirée par le pôle N de l'aimant.

Quand la bobine A sera placée suivant la ligne polaire NS, le flux qui la traversera sera maximum, et l'induction nulle; l'axe NS est donc aussi l'axe de commutation et le courant changera de sens dans la génératrice A; il changera également dans la bobine B et les pôles de son armature seront inversés.

A ce moment, l'armature B comme l'armature A d'ailleurs sont dans une position analogue à celle du piston d'un moteur à vapeur se trouvant à fin de course ou à l'un des points morts; il n'y aurait donc pas de raison pour que le mouvement continuât, si la vitesse acquise ne faisait pas franchir à l'organe mobile cette position d'équilibre. Dès que l'axe a basculé en dessous de la position horizontale, le nouveau pôle s faisant vis-à-vis à S sera repoussé vers le bas, le nouveau pôle n vers le haut, et le mouvement de rotation se continuera indéfiniment dans le même sens.

On voit donc que, dans un pareil système, pour que le mouvement de rotation continu soit possible, il faut que le mouvement de B suive exactement celui de A, autrement dit que les deux armatures tournent avec la même vitesse et d'une manière semblable. C'est ce que l'on exprime en disant que le moteur et la dynamo tournent synchroniquement; d'où le nom de *moteur synchrone* donné à la réceptrice fonctionnant dans de pareilles conditions.

Pour qu'un moteur de ce système puisse démarrer, il faut d'abord qu'il ne soit pas à un point mort, c'est-à-dire que l'axe de l'induit ne soit pas confondu avec celui des pôles inducteurs; il faut, d'autre part, que les frottements et les résistances que doit surmonter l'induit, soient relativement faibles, de manière à ce qu'il puisse suivre synchroniquement le mouvement de l'induit générateur.

Il s'ensuit que ces moteurs ne peuvent démarrer d'eux-mêmes en charge; ils doivent être mis en marche à vide et, lorsqu'il s'agit de machines puissantes, le meilleur moyen consiste à les mettre en mouvement en leur don-

nant une impulsion initiale, comme on fait pour certains moteurs à gaz. Lorsque, dans sa révolution, l'induit B se trouve orienté de même que A, et en concordance de phase avec lui, l'entraînement se fait et le mouvement s'entretient ensuite sans difficulté. Il faudra avoir soin, d'ailleurs, de n'appliquer alors la charge que progressivement, car une charge trop brusque ferait diminuer la vitesse et détruirait la concordance, en produisant l'arrêt du moteur.

Si la machine vient à s'arrêter, de même qu'au moment du démarrage, la force contre-électro-motrice devenant nulle, le courant qui pénètre dans le moteur peut atteindre une intensité dangereuse pour la conservation de la machine; aussi convient-il d'employer des coupe-circuit automatiques ou des accouplements mécaniques qui peuvent se débrayer d'eux-mêmes quand la charge devient trop grande, et permettent ainsi au moteur de continuer son mouvement synchrone.

VITESSE ET PUISSANCE. — La vitesse de rotation du moteur est telle que l'organe mobile doit parcourir le champ de deux pôles correspondant au cycle magnétique complet, pendant le temps périodique: le nombre de tours par minute sera donc donné par la relation suivante :

$$N = \frac{60 \times f}{p}$$

f désignant la fréquence ou le nombre de périodes par minute, et p le nombre des champs ou des paires de pôles.

Pour un moteur à six pôles ou trois paires de pôles, et une fréquence de 39 périodes, le nombre de tours par minute serait :

$$N = \frac{120 \times 39}{3} = 1560 \text{ tours.}$$

La puissance du moteur, est, comme on sait, le produit de la force électro-motrice développée dans l'enroulement de son armature, par le courant absorbé; mais ce produit doit être encore multiplié par le facteur de puissance de l'alternomoteur, si la self-induction de celui-ci détermine une différence de phase entre cette force électro-motrice et le courant

et l'on a, en désignant par E et I les valeurs efficaces de ces quantités électriques :

$$W = E \times I \times \sqrt{1 - K^2}$$

K étant un coefficient qui peut varier, de 0 à 1, quand la différence de phase de E et de I varie de 0 à 90 degrés; dans ce cas extrême, la puissance du moteur deviendrait nulle. Il convient donc de réduire ce décalage au minimum.

Lorsque le couple résistant augmente momentanément, la vitesse de l'induit venant à diminuer, sa force contre-électromotrice due au déplacement dans le champ inducteur, subit un retard de phase correspondant, qui rapproche son vecteur de celui du courant et diminue le décalage entre les deux; il s'ensuit que le facteur de puissance augmente, tant pour la puissance dépensée et fournie par la source d'électricité que pour la puissance utile recueillie sur le moteur. Cet accroissement d'énergie tend à relever la vitesse à sa valeur primitive. Le phénomène inverse se produira, si le moteur s'accélère par suite d'une réduction momentanée de la charge; le facteur de puissance diminuant, l'énergie développée sera moindre et ramènera la vitesse à son allure normale. Le synchronisme tend à se maintenir ainsi automatiquement, tant que les variations de charge ne se produisent pas d'une façon trop brusque.

EXCITATION. — L'excitation des inducteurs se fait, soit à l'aide d'une excitation spéciale à courant continu, soit en empruntant à la ligne de transport le courant à haute tension, dont une partie, dérivée dans le circuit primaire d'un petit transformateur, est préalablement réduite à une tension convenable, et traverse, avant de se rendre aux inducteurs, un commutateur redresseur analogue à ceux employés pour les alternateurs-générateurs à auto-excitation.

Dans le cas où l'on emploie une excitatrice à courant continu, l'organe mobile est généralement fixé sur le même arbre que l'alternomoteur dont il reçoit son mouvement; mais comme il faut, pour la mise en train, que les inducteurs de la machine alternative soient excités au préalable, on utilise, en marche normale, l'excitatrice pour

charger quelques éléments d'accumulateurs dont le courant permet d'amorcer les inducteurs au démarrage.

224. **Moteurs asynchrones à courants alternatifs simples.** —

Les moteurs à courants continus, à collecteurs sectionnés, peuvent aussi être alimentés par des courants alternatifs. Il faut remarquer, en effet, que, si l'on vient à changer le sens du courant dans ces moteurs, le sens changeant à la fois dans l'induit et l'inducteur, que celui-ci soit en dérivation ou en série, le moteur reçoit toujours une impulsion de même sens. Ces machines sont donc nécessairement auto-excitatrices, puisque les variations du même courant doivent se produire en concordance dans l'inducteur et dans l'induit. Leur vitesse n'est pas nécessairement en concordance avec la fréquence des courants qui les alimentent ; ces moteurs sont donc asynchrones.

Mais les changements rapides du sens du courant tendent à produire dans les inducteurs des courants de Foucault très intenses : aussi convient-il de les construire, comme les armatures des induits, au moyen de tôles minces ; c'est pourquoi l'on désigne souvent ces moteurs sous le nom d'alternomoteurs à inducteurs feuilletés.

Ces inversions de courants donnent lieu également à des forces électro-motrices de self-induction très considérables, qui diminuent l'intensité efficace et déterminent un retard de phase, dont les effets se traduisent par une réduction considérable de la puissance que le moteur peut absorber et rendre en travail utile.

La self-induction prend une importance particulièrement grande dans les inducteurs des moteurs schunt dont le coefficient de self est toujours considérable. Il en résulte notamment un décalage plus grand du courant, par rapport à la tension, dans l'inducteur que dans l'induit et par suite une certaine différence de phase entre les courants des deux circuits.

Les variations périodiques du courant dans les enroulements induits et excitateurs, déterminent également des phénomènes d'hystérésis donnant lieu à de grandes pertes d'énergie.

Les effets de self-induction produisent aux balais des étincelles qui compromettent rapidement la conservation du collecteur.

Divers procédés ont été imaginés pour obvier à ces nombreux inconvénients. Les dispositions combinées par MM. Stanley et Kelly est représentée par le schéma de la figure 382. Les inducteurs et induits sont construits en feuilles de tôles minces pour éviter les courants de

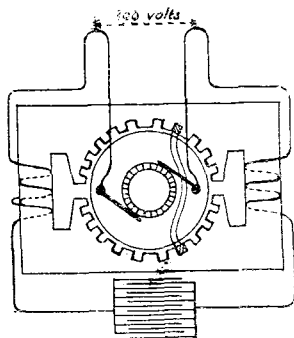


FIG. 382. — Disposition Stanley et Kelly pour moteurs à inducteurs feuilletés.

Foucault. Le procédé employé pour combattre la self-induction des inducteurs consiste, d'une part, à réduire autant que possible le nombre des spires excitatrices en augmentant le diamètre du fil, et, d'autre part, à insérer dans le circuit inducteur un condensateur C, dont les effets de capacitance sont opposés à ceux de l'inductance des enroulements inducteurs.

En ce qui concerne la self-induction de l'induit, on a employé plusieurs moyens plus ou moins efficaces consistant, en principe, dans l'adjonction d'enroulements secondaires dont l'induction est opposée à la self-induction de l'induit. Dans le système Stanley et Kelly, on a donné aux pièces polaires un grand développement, et dans les sillons ménagés sur le pourtour intérieur on a logé des barres de cuivre reliées entre elles de manière à former un circuit complètement fermé. Cet enroulement joue vis-à-vis du circuit de l'armature, le rôle de la bobine secondaire par rapport à la bobine primaire d'un transformateur. L'induction mutuelle des deux circuits réduit la self-induction et le décalage, dans l'enroulement induit.

On évite toutes ces difficultés, en construisant des

moteurs sans fer, mais les actions électrodynamiques qui s'exercent entre les enroulements induits et inducteurs sont toujours très faibles et ne permettent pas de réaliser sur ce principe des moteurs de puissance notable : le petit moteur du compteur Thomson est un des exemples les plus connus de ces alternomoteurs sans fer.

MOTEURS A INDUIT FERMÉ. — Dans cette classe spéciale de moteurs, l'inducteur est alimenté par l'énergie électrique du circuit de distribution à courant alternatif, comme précédemment, mais l'induit n'est pas mis en relation avec ce circuit et son enroulement est fermé sur lui-même. L'induit étant mis en marche par un procédé quelconque, le mouvement se continuera sous l'influence des réactions qui s'exercent entre le flux périodique développé par les inducteurs et le courant qu'il produit par induction dans l'armature. Ce moteur ne peut démarrer de lui-même, soit en charge, soit même à vide.

On peut toutefois obtenir le démarrage automatiquement, en alimentant d'abord l'induit, placé en série dans le circuit inducteur : puis lorsque la mise en train s'est effectuée, comme dans le cas des moteurs asynchrones, on retire l'induit du circuit et on le ferme sur lui-même, en reliant directement les balais entre eux.

Dans une disposition réalisée par les ateliers d'Oerlikon (fig. 383), l'induit A est un tambour portant un enroulement fermé : l'inducteur B est divisé en sections reliées aux lames d'un collecteur ordinaire de dynamo à courant continu. Le courant arrive par la canalisation M à deux balais E, D, montés sur une barre mobile autour de l'axe et qui peut être mise en mouvement, soit à la main, soit automatiquement.

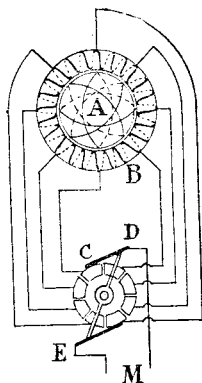


FIG. 383. — Disposition de mise en marche.

Dans la position que les balais occupent sur le schéma, le courant entre par le pôle supérieur C D, par exemple, pénètre en B dans l'enroulement inducteur, se divise en deux parties égales dans les deux moitiés de l'anneau et revient se fermer par le balai inférieur. Dans ces conditions, l'anneau inducteur peut être considéré comme formé de deux électro-aimants demi-circulaires, accolés par leurs pôles de même nom, suivant le diamètre déterminé par les points de soudure de l'enroulement avec les conducteurs amenant le courant.

Par suite du mouvement de rotation des balais, le contact C se trouvant reporté sur la lame voisine de droite et celui du balai inférieur ayant reculé de même sur la gauche, la ligne des pôles du système inducteur aura tourné de gauche à droite et l'on réalisera ainsi une sorte de champ tournant qui, réagissant sur l'enroulement induit, l'entraînera dans son mouvement de rotation. Une fois le démarrage obtenu, le moteur fonctionne à la manière ordinaire des moteurs asynchrones à champ alternatif et à induit fermé.

225. Caractéristiques de moteurs à courants alternatifs simples. — Nous donnons à titre d'exemple, dans la figure 384, la caractéristique d'un moteur du genre Brown de 11 kilowatts, que nous empruntons à l'ouvrage de M. Lafargue.

Les conditions de fonctionnement à pleine charge correspondent au trait pointillé vertical du diagramme. On voit que pour la puissance utile maximum P_u de 11 kilowatts, portée sur l'axe des abscisses, le rendement industriel est de 0,82 et le facteur de puissance $\sqrt{1 - K^2}$ de 0,94.

Les courbes P_e et P_a donnent les différentes valeurs de la puissance électrique réelle et de la puissance apparente aux bornes de l'électro-moteur ; on a la relation :

$$P_e = P_a \sqrt{1 - K^2}$$

Les expériences ont montré que la vitesse variait très peu, étant de 876 tours par minute à vide et de 851 tours

en pleine charge; le courant s'est élevé à 150 ampères au démarrage, et il n'était plus que de 102 ampères à pleine

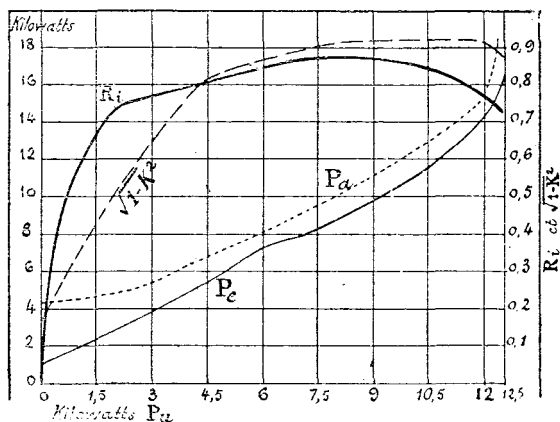


FIG. 384. — Caractéristique d'un moteur à courants alternatifs simples.

charge et de 27 ampères à vide. Enfin le facteur de puissance part de 0,16 à vide, pour s'élever à 0,88 vers la puissance de 8 kilowatts, et s'abaisser ensuite à mesure que la puissance augmente.

Moteurs à courant polyphasé ou à champ tournant.

226. Origines. — Nous avons décrit précédemment (tome I, § 98), à propos des applications des courants de Foucault, les expériences d'Arago sur l'entraînement d'un barreau aimanté par un disque métallique tournant à une légère distance du barreau, et l'expérience inverse consistant à entraîner le disque de cuivre, en faisant tourner au-dessous de lui un aimant en fer à cheval, autour de son axe de symétrie. Il a été expliqué alors que ces mouvements d'entraînement sont dus aux réactions qui s'exercent

entre le champ tournant et les courants de Foucault engendrés dans la masse du disque, par le mouvement relatif de ce disque et du champ tournant.

Les moteurs à courants polyphasés sont également basés sur l'emploi d'un champ magnétique tournant, agissant soit sur un cylindre de fer qu'il entraîne notamment en vertu des actions attractives qui s'exercent entre un aimant et son armature, soit sur une pièce de cuivre ou sur un circuit électrique fermé, qui deviennent le siège de courants d'induction.

Mais le fonctionnement de ces moteurs diffère essentiellement de celui des disques d'Arago ; ce dernier exige en effet que l'on actionne l'un des deux appareils en présence, soit l'aimant par exemple, par une force mécanique quelconque, pour réaliser le champ tournant qui entraîne alors le disque de cuivre ; il serait donc tout aussi avantageux et plus simple d'appliquer directement la force développée, sur le disque lui-même, si l'on avait intérêt à faire tourner cet appareil.

Le problème résolu par les moteurs polyphasés actuels est tout autre ; il consiste à transformer l'énergie électrique distribuée à distance plus ou moins grande, en travail mécanique, par l'action d'un champ tournant, engendré par les effets combinés de courants alternatifs multiples, présentant entre eux des différences de phases déterminées.

La priorité de l'invention des champs tournants dans les moteurs polyphasés n'est pas nettement établie. Toutefois, la première description d'un pareil système semble remonter à l'année 1879, époque à laquelle le physicien Baily, en Angleterre, démontra la possibilité de produire un champ tournant, capable d'imprimer à un disque de cuivre un mouvement de rotation, au moyen d'un courant diphasé alimentant deux électro-aimants en fer à cheval verticaux, dont les plans des branches sont disposés à angle droit et les pôles à 90 degrés l'un de l'autre.

M. Marcel Desprez emploie en 1883 deux bobines conjuguées à angle droit et excitées respectivement par deux courants alternatifs, décalés d'un quart de période.

En 1807, Charles Bradley, en Angleterre, utilise encore le courant diphasé, qu'il lance dans l'enroulement d'un anneau Gramme dont quatre points, situés aux extrémités de deux diamètres rectangulaires, sont respectivement reliés à deux circuits extérieurs, traversés chacun par l'un des courants alternatifs de l'énergie diphasée.

Pour la première fois, Haselwarder, en 1887, combine un moteur dans lequel le champ tournant est produit par un courant triphasé, dont les courants composants sont distribués dans trois bobines, occupant chacune le tiers de la circonférence de l'anneau constituant l'armature.

Bien que les travaux de Galileo Ferraris soient postérieurs aux précédents et datent seulement de 1888, le nom du savant professeur de Turin semble attaché plus particulièrement à la découverte des champs tournants. Son moteur consistait en un cylindre de cuivre, soumis à l'action d'un champ tournant produit par deux bobines verticales placées à angle droit et traversées par des courants alternatifs, présentant entre eux une certaine différence de phase. Ferraris obtient deux courants dont les phases ne diffèrent pas sensiblement d'un quart de période, en intercalant l'une des bobines inductrices A dans le circuit primaire P d'un transformateur à très faible charge, et la seconde bobine B dans le circuit secondaire S (fig. 385).

Vers la même époque, Nicolas Tesla, en Amérique, utilise également le courant alternatif simple, qui se bifurque aux abords du moteur en deux circuits dérivés, dont l'un présente une faible résistance ohmique et un grand coefficient de self-induction, et l'autre une grande résistance sans self-induction ; les deux bobines à angle droit insérées

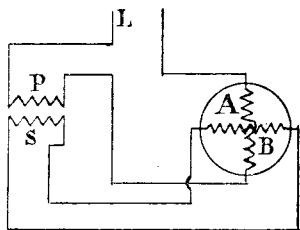


FIG. 385. -- Dispositif Ferraris pour moteur à champ tournant.

dans chacune des dérivations, sont alors le siège de courants décalés, à très peu près, d'un quart de période.

Le même procédé de bissection d'un courant alternatif simple a été utilisé par MM. Hutin et Leblanc, qui obtiennent le décalage de deux dérivations, par l'insertion d'un condensateur dans l'une des branches de la bifurcation.

En 1889, M. von Dolivo Dobrowolsky imagina son moteur à champ tournant, dont l'enroulement induit présente la disposition *en cage d'écureuil*, qui a servi de type à un grand nombre de moteurs polyphasés établis ultérieurement : il établit aussi les premiers transformateurs à courants triphasés.

Enfin, les moteurs à courants polyphasés reçurent une consécration éclatante à l'occasion de l'exposition de Francfort-sur-Mein en 1891, lorsque MM. Dobrowolsky et Brown organisèrent, avec un succès complet, le transport d'une puissance initiale de 300 chevaux, de la station de Lauffen aux terrains de l'exposition, sur un parcours de 175 kilomètres. Le rendement industriel fut de 73 pour 100 et la tension du courant de transport s'éleva à 15.000 volts.

Les moteurs polyphasés sont remarquables par la simplicité de leur construction, qui ne comporte point de collecteur et souvent même ni bagues ni balais ; ils peuvent démarrer aisément et supporter sans arrêt une grande différence de charge, en un mot ce système réunit à la fois les avantages des transmissions par courants alternatifs et des moteurs à courants continus.

227. Production d'un champ tournant par les courants diphasés. — Considérons deux bobines AA_1 , BB_1 (fig. 386) placées en croix et dont les centres coïncident. Ces bobines produisent chacune un flux magnétique perpendiculaire au plan des spires, dont la direction sera ob pour la bobine BB_1 et oa pour la bobine AA_1 .

Ces bobines étant excitées par des courants alternatifs, le champ magnétique qu'elles engendrent subira les mêmes variations périodiques d'intensité et de sens. Les deux courants ayant même amplitude et même fréquence

ne sont pas toutefois en concordance, mais présentent entre eux une différence de phase de 90 degrés, c'est-à-dire que leur ensemble formera un courant diphasé.

Les flux correspondants seront également décalés d'un quart de période l'un par rapport à l'autre, et, de même que les courants générateurs du flux sont respectivement représentés dans les bobines $B B_1$ et $A A_1$ par les expressions :

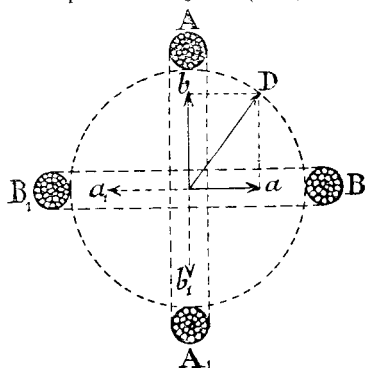


FIG. 386. — Production d'un champ tournant diphasé.

$$I = I_m \times K; I_r = -I_m \times \sqrt{1 - K^2}$$

Ces flux auront simultanément pour expressions :

$$N = N_m \times K \quad N_r = -N_m \times \sqrt{1 - K^2}$$

Dans ces conditions, quand ob sera maximum, oa sera nul et inversement; on voit donc déjà que pour ces valeurs particulières le champ se réduira à un flux unique égal à sa valeur maximum, et dirigé soit suivant ob ou oa , soit suivant les prolongements ob_1 ou oa_1 de ces vecteurs.

Considérons maintenant des valeurs quelconques de oa et ob différentes de zéro et du maximum; ces deux champs partiels à 90 degrés ont une résultante oD que l'on obtient par la règle du parallélogramme des forces.

Le triangle rectangle oDa permet d'écrire,

$$\overline{oD}^2 = \overline{oa}^2 + \overline{aD}^2 = \overline{oa}^2 + \overline{ob}^2$$

puisque $ob = aD$; on a donc, d'après les relations précédentes :

$$\overline{oD}^2 = N_m^2 \times K^2 + N_m^2 \times (1 - K^2) = N_m^2$$

c'est-à-dire que $oD = N_m$; donc le champ résultant oD est égal au maximum de chacun des champs composants, et comme la construction faite est indépendante des valeurs simultanées de oa et ob , on en déduira que le champ résultant a toujours pour valeur N_m et qu'il est par suite constant.

Supposons que le vecteur oD soit dirigé suivant oa , à l'origine ; après un quart de période il sera sur ob et il aura décrit le quart de la circonférence, il est donc évident qu'il effectuera une rotation complète pendant le temps périodique.

D'un autre côté si, partant de l'origine B , nous faisons tourner le vecteur oD d'un mouvement uniforme autour du centre o , et si nous projetons ce point D sur les deux axes rectangulaires des bobines, nous obtiendrons les vecteurs simultanés tels que oa et ob qui représenteront les valeurs des champs magnétiques, à chaque instant du temps périodique et, réciproquement, la résultante de ces champs partiels se confondra aux divers temps de la période avec le vecteur oD ; donc le champ résultant représenté par ce vecteur tournera d'un mouvement uniforme.

En résumé, le champ tournant a une intensité constante et égale à la valeur maximum de l'un des champs composants ; il tourne autour du point o , en se dirigeant de la bobine parcourue par le courant en avance vers la bobine dont le courant est en retard, et il fait un tour par période d'un mouvement uniforme.

PRODUCTION D'UN CHAMP TOURNANT PAR LES COURANTS TRI-PHASÉS. — Disposons maintenant trois bobines enroulées sur un cylindre, suivant trois plans diamétraux faisant entre eux, deux à deux, des angles consécutifs de 120 degrés ou d'un tiers de circonférence (fig. 387).

Faisons passer dans chacun de ces circuits des courants qui, au même instant, présentent l'un par rapport à l'autre un retard de phase correspondant au décalage des bobines respectives sur la circonférence : l'ensemble de ces courants formera donc par définition même un courant triphasé.

Les flux perpendiculaires aux plans des bobines seront simultanément dirigés suivant oa , ob et oc et la résultante de ces trois champ partiels s'obtiendra en composant successivement le flux ob avec le flux oa , puis la résultante ob_1 ainsi obtenue avec le flux oc ; la résultante totale sera finalement oc_1 , qui n'est autre d'ailleurs que la droite fermant le polygone des forces, oa , ab_1 , b_1c_1 .

On démontre aisément, en exprimant les flux triphasés par des formules analogues à celles des forces électro-motrices triphasées (§ 118), que le champ magnétique résultant a une valeur constante et égale à une fois et demie la valeur maximum de chaque champ composant. Comme d'autre part les projections de oc_1 sur oX , soit oc_2 et sur oA_2 , soit c_1c_2 varient périodiquement avec le temps, de la même manière que les projections des vecteurs des quantités alternatives (tome I), il s'ensuit que le vecteur oc_1 tourne lui-même d'un mouvement continu et uniforme autour du point o et dans le sens de A_1 en A_2 , dans le cas actuel.

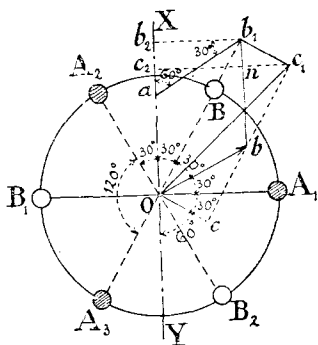


FIG. 387. — Production d'un champ tournant triphasé.

228. Champ tournant produit par un enroulement Gramme. — Soient les deux sections f_1 et f_2 d'une ligne à courant biphasé; relierons respectivement à chacune de ces lignes les deux couples de bobines AA_1 , BB_1 enroulées comme l'indique la figure 388, sur l'armature d'un anneau Gramme.

Le premier couple de bobines est parcouru par le courant alternatif i , I. § 126 :

$$i_1 = I_m \times K$$

et le second par le courant en retard d'un quart de phase :

$$i_2 = -I_m \times \sqrt{1 - K^2}$$

Si l'on admet que la reluctance du circuit est pratiquement constante, l'intensité de chacun des champs partiels

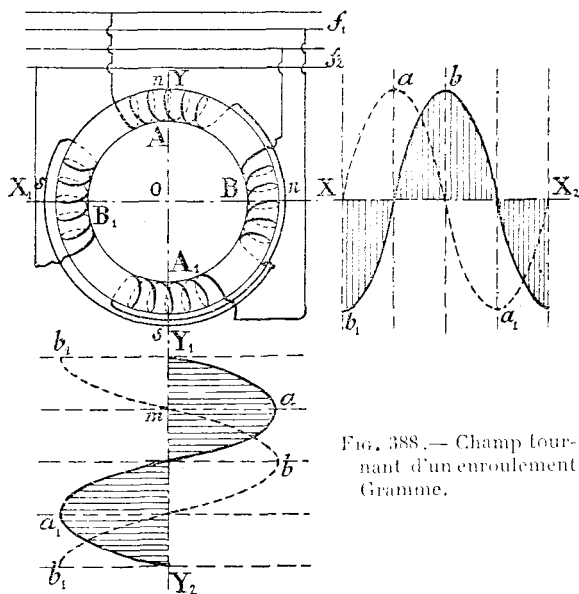


FIG. 388.— Champ tournant d'un enroulement Gramme.

variera proportionnellement à l'intensité des courants déphasés et il existera la même différence de phase entre les deux champs engendrés par ces courants.

Considérons d'abord le groupe de bobines A A₁ de la première section, diamétralement disposées sur l'armature. Si le courant traverse ces bobines dans le sens des flèches à l'instant considéré, il est clair, d'après la règle de Maxwell, que chacun des solénoïdes A et A₁ conspirent

pour créer deux pôles sud consécutifs en X et deux pôles nord en X_1 sur le diamètre perpendiculaire à l'axe $Y Y_1$ des bobines considérées. Au moment où le courant est nul, le flux correspondant est aussi égal à zéro, puis le flux grandit avec le courant, devient maximum, change de signe, passe par un second maximum et redevient nul à la fin de la période.

Toutes ces variations de signe et d'intensité sont représentées par la courbe en trait plein du diagramme inférieur $a a_1$, dont l'axe des abscisses $Y_1 Y_2$ représente les temps successifs de la période; toutes les ordonnées horizontales doivent être reportées en projection sur $o B$ ou $o B_1$, suivant qu'il s'agit de la nappe a ou de la nappe a_1 de la courbe.

À l'origine, lorsque le flux est nul dans la section $A A_1$, ce qui correspond au point Y_1 de la courbe, le flux passe par un maximum négatif dans la seconde section $B B_1$, le courant est alors dirigé en sens inverse du précédent et les solénoïdes $B B_1$ développent un pôle nord en Y et un pôle sud en Y_1 . La courbe représentative des variations de ce second flux magnétique est la courbe en trait plein du schéma de droite; les ordonnées doivent en être projetées sur l'axe polaire $A A_1$.

Nous avons donc à l'origine, deux pôles nord composants en X et Y sur l'armature et deux pôles sud en X_1 et Y_1 , qui donnent comme résultantes un pôle nord et un pôle sud uniques, compris respectivement entre ces deux groupes de points.

Tout d'abord, le flux de la section $B B_1$ étant maximum est représenté par $X B_1$, tandis que le flux de la section $A A_1$ est nul; le pôle nord résultant se réduit à l'un des pôles composants et se trouve en A ; puis le premier flux décroît, tandis que le second augmente suivant $o B$ et le pôle nord résultant s'approche de B ; au bout d'un quart de période, le flux sera représenté uniquement par $m a$ et le pôle nord sera en B .

En ce moment, le courant et le flux changeront de signe dans la section $B B_1$ qui produira un pôle sud en Y et un

pôle nord en Y_1 , nous aurons donc maintenant les deux pôles nord en B et A_1 et le pôle nord résultant continuera à se déplacer dans ce deuxième quart de la circonférence.

On verrait de même, qu'à chaque quart de période l'un ou l'autre des deux courants et des flux correspondants venant à changer de signe, la permutation des pôles nord et sud composants se fait de telle sorte que le mouvement des pôles résultants se continue sans interruption et que

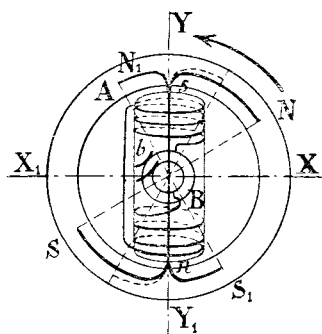


FIG. 389. — Moteur à champ tournant synchrone.

le champ tournant qui en est la conséquence, effectue un tour complet pendant une période.

229. Moteurs synchrones.

— Comme pour les moteurs à courants alternatifs simples, les moteurs polyphasés se classent en moteurs synchrones et moteurs asynchrones.

Étant donné un système d'enroulements parcourus par un courant diphasé, tel que celui que nous venons d'étudier, plaçons à l'intérieur de l'anneau A et sur son axe (fig. 389) un électro-aimant mobile B, pourvu de bobines excitatrices dont les extrémités sont soudées respectivement à deux bagues calées sur le même axe et sur lesquels frottent deux balais b .

Ceux-ci sont reliés à une excitatrice qui envoie dans les bobines des électros un courant continu, de manière à maintenir à chaque extrémité de l'armature B, en marche normale, une polarité constante.

Il y a lieu de considérer tout d'abord la période de démarrage. L'armature se trouvant placée suivant YY_1 , supposons que le champ tournant produit par l'enroulement diphasé de l'anneau A, ait ses pôles sur le diamètre NS. Le flux tendra à se fermer à travers l'armature A et il se produira une *onde magnétique* qui, partant du pôle

inducteur N , traversera l'entrefer en s , l'armature, de nouveau l'entrefer en n , et se fermera sur le pôle sud inducteur S .

Si à ce moment l'enroulement de l'électro B était excité, il pourrait arriver que le pôle supérieur, dans la situation actuelle de cette armature, fût de même signe que le pôle inducteur N , le flux tournant serait donc refoulé et ne pourrait pénétrer dans la pièce de fer pour l'entraîner dans son mouvement de rotation. Au moment de la mise en marche, on sépare donc l'enroulement des électros de la dynamo excitatrice et même, on le ferme en court-circuit, en reliant directement les balais entre eux.

Le champ polyphasé tournant dans le sens de la flèche s'approche de l'armature B et engendre en même temps des courants de Foucault dans le bloc de fer et des courants d'induction dans l'enroulement en court-circuit.

Ces courants d'induction développent un flux antagoniste et qui tend à chasser au dehors les lignes de force du champ tournant NS , au fur et à mesure qu'il s'approche de l'axe de l'électro-aimant ; l'action attractive que le pôle N exerce sur le pôle s de l'armature se trouve ainsi affaiblie. Quand, au contraire, le flux tournant NS a dépassé l'axe de l'électro, les courants d'induction développent un flux de même sens, qui augmente le couple moteur agissant dans le sens de rotation du champ tournant.

Il résulte de cette inégalité des actions mutuelles entre l'armature et le flux inducteur, à l'approche et pendant l'éloignement du flux tournant par rapport à l'axe de l'armature, que le moteur tend à démarrer spontanément et à se mouvoir dans le sens du flux tournant ; l'organe mobile s'accélérera peu à peu, jusqu'à ce qu'il atteigne la vitesse des pôles inducteurs.

La ligne NS étant en avant de l'axe sn , celui-ci courra pour ainsi dire après le flux tournant, en restant à la même distance en arrière, tant que la charge ne changera pas ; si la charge augmente, le retard de sn sur NS croîtra, ce qui aura pour effet de développer dans l'en-

roulement induit de B, un flux auxiliaire et d'augmenter le couple moteur. Ce couple variera dans tous les cas, de manière à maintenir le synchronisme du moteur avec le mouvement du champ tournant. D'où le nom de moteurs synchrones donné à ce genre de dynamoteurs.

Par suite des phénomènes de dispersion magnétique qui se produisent au démarrage, le couple à ce moment est faible : c'est pourquoi de pareils moteurs ne peuvent démarrer qu'à très faible charge. En outre, l'affaiblissement du champ permet au courant polyphasé de prendre une très grande intensité, qui peut élever très fortement la température des enroulements de l'anneau.

Le nombre de tours effectué par un pareil moteur est évidemment égal à la fréquence N . Si, par exemple, $N = 50$, le moteur fera $50 \times 60 = 3000$ tours par minute; cette vitesse acceptable pour de petits moteurs est évidemment exagérée pour des machines de grande puissance. Pour réduire la vitesse de rotation d'un moteur synchrone, il suffit de remarquer que le champ tournant qui s'attache aux deux pôles s, n , d'un électro est engendré par quatre bobines, formant deux couples alimentés par le courant diphasé (fig. 388).

Nous pourrions donc enrouler sur l'anneau un nombre de bobines égal à un multiple de 4, soit par exemple, $4 \times 3 = 12$ bobines, en formant deux sections de 6 bobines en série et en ayant soin d'enrouler alternativement les bobines de l'une et l'autre section.

Les trois groupes de quatre bobines formeront chacun un flux tournant, et il y aura par conséquent trois bras polaires, conservant entre eux une distance angulaire de 120 degrés et effectuant ensemble une rotation du tiers de la circonférence pendant le temps périodique : chaque pôle tournant doit en effet se déplacer de l'arc recouvert par quatre bobines consécutives durant une période.

Il faudra donc trois périodes pour que l'ensemble des flux tournants effectue une rotation complète, et la vitesse sera ainsi réduite, dans les conditions précédentes de fréquence, à :

$$\frac{50 \times 60}{3} = 1000 \text{ tours par minute.}$$

Comme chacun des axes du triple champ tournant doit s'attacher à deux pôles d'électros, l'armature devra présenter six expansions polaires.

La figure 390 représente le schéma d'un pareil moteur; chaque section de l'enroulement de l'anneau inducteur est formée de six bobines, en série, dont les spires sont enroulées dans le même sens et les quatre extrémités des fils des deux sections, viennent émerger des quatre premières bobines consécutives de l'enroulement. L'armature est pourvue de six expansions polaires sur lesquelles sont bobinées les spires inductrices, qui ne forment qu'un seul circuit, aboutissant aux deux bagues calées sur l'arbre du moteur.

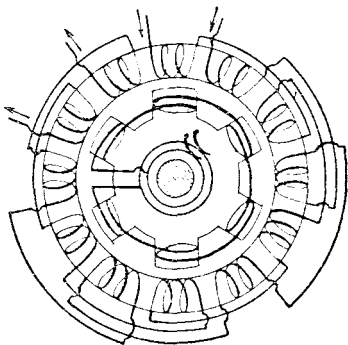


FIG. 390. — Moteur synchrone à six pôles.

Comme nous l'avons vu plus haut, le démarrage s'effectue à vide, l'enroulement excitateur des électros étant coupé ou mis en court-circuit; mais dès que le moteur a atteint le synchronisme, on relie le circuit des électros à l'excitatrice.

On a constaté qu'un moteur synchrone dont les électros sont excités par un courant continu, développe une puissance quatre à cinq fois plus grande que son excitation.

Au lieu de constituer l'enroulement par deux sections distinctes, reliées aux deux circuits du courant diphasé, on peut utiliser un anneau, avec son enroulement effec-

tué dans le système Gramme (fig. 391) en faisant aboutir les extrémités de ces circuits, respectivement aux points c, d et a, b de l'enroulement, situés sur deux diamètres rectangulaires.

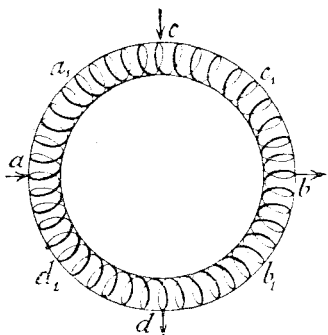


FIG. 391. — Champ tournant diphasé dans un anneau Gramme.

le courant polyphasé doit comprendre quatre fils distincts aboutissant aux points de division de l'enroulement induc-

On produira deux champs tournants et l'on réduira ainsi la vitesse de moitié, en doublant le nombre des divisions et reliant les quatre premiers points aux conducteurs du premier circuit et les quatre nouveaux a, b, c, d aux conducteurs du second.

Dans cette disposition,

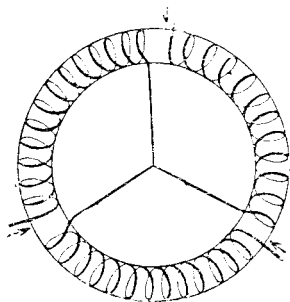


FIG. 392. — Champ tournant triphasé avec enroulement Gramme en étoile.

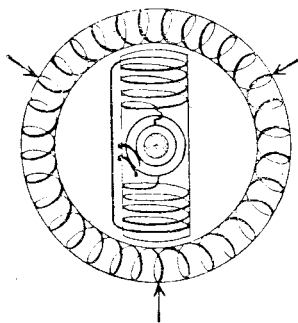


FIG. 393. — Champ tournant triphasé avec enroulement Gramme en triangle.

teur, tandis que dans le cas précédent des sections distinctes, on peut supprimer l'un des fils, en adoptant un fil de retour commun.

On peut évidemment obtenir un champ tournant triphasé, avec trois bobines distinctes enroulées sur un anneau Gramme; la figure 392 donne le schéma d'un inducteur Gramme avec enroulement des trois bobines en étoile; la figure 393. le même inducteur avec enroulement en triangle.

Une armature à deux pôles, mobile à l'intérieur de ces divers anneaux (fig. 393) serait entraînée d'un mouvement synchrone dans le sens de rotation du flux tournant tri-

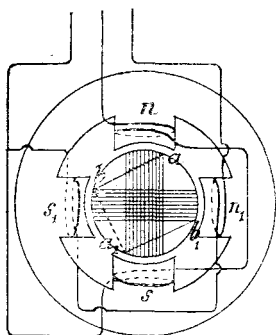


FIG. 394. — Moteur asynchrone avec inducteur à pôles diphasé.

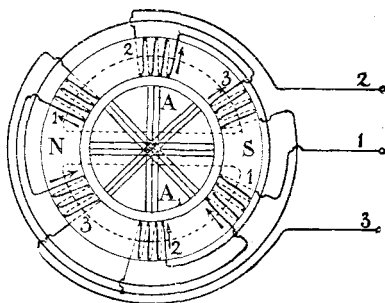


FIG. 395. — Moteur asynchrone avec inducteur lisse à anneau triphasé.

phasé. On réduira de même la vitesse, en augmentant le nombre des bobines faisant partie de chacun des courants simples formant le courant triphasé.

236. Moteurs asynchrones.— Dans les moteurs synchrones le champ tournant s'attache aux parties saillantes formant expansions polaires, du noyau de l'armature, de telle sorte que celui-ci est entraîné et tourne synchroniquement avec le champ. Dans la seconde classe de moteurs dits asynchrones, l'armature est constituée par un cylindre lisse portant une série d'enroulements fermés sur eux-mêmes.

Quant à l'inducteur qui reçoit le courant polyphasé, il peut présenter des saillies polaires, comme dans l'exemple illustré par la figure 394, ou consister en un anneau lisse

comme dans le cas des moteurs synchrones étudiés précédemment, tel que le moteur à inducteur triphasé de la figure 395.

Considérons le premier moteur par exemple, dont l'inducteur fixe est alimenté par un courant biphasé. Avant la mise en marche de l'induit mobile, le champ tournant coupe les spires des bobines a, b de l'armature, celles-ci deviendront donc le siège d'une force électro-motrice d'induction.

Les courants induits, réagissant sur le champ tournant, développent un couple moteur qui entraîne l'armature dans le sens de rotation du champ.

Les fils actifs situés suivant les génératrices de l'armature en a , en face du pôle inducteur n , peuvent être reliés respectivement à chacun des fils projetés en a_1 en face d'un pôle inducteur de nom contraire, de manière à constituer autant de spires parallèles indépendantes formant l'une des deux bobines du schéma. On obtiendra de même une seconde bobine de spires indépendantes avec l'enroulement $b b_1$.

Mais on pourrait connecter tout aussi bien un fil a avec un fil b , et former ainsi des spires indépendantes fermées par des cordes tendues sur les faces du tambour.

Au lieu de constituer des spires indépendantes, on peut encore réaliser des enroulements continus de spires en série, ne formant qu'un seul circuit. Dans ce but, il suffira, après avoir réuni a à b par une corde $a b$, sur la face avant du tambour, de relier b à a_1 par une corde $b a_1$ menée sur la face arrière: on réalisera ainsi un enroulement continu et fermé, se développant en zigzag.

On peut ainsi multiplier les combinaisons, pourvu que l'on observe toujours cette condition, de faire les connexions de telle sorte que chaque courant parcourant un fil dans un sens, trouve son retour dans un second fil situé, au même instant, dans un champ de polarité opposée à celui où se trouve le premier fil.

Dans les petits moteurs comme celui de Ferraris, l'armature peut être constituée par un cylindre creux en

cuivre, sur lequel se développent les courants de Foucault engendrés par le champ tournant. Le couple moteur résultant de la réaction du champ sur ces courants fermés, ne peut atteindre une valeur importante, car les actions des diverses parties de ces courants ne sont pas concordantes, comme dans les enroulements où l'électricité est canalisée et dirigée en vue de produire le couple moteur maximum.

Dans tous les cas, on voit que le fonctionnement de ces moteurs est basé sur la génération des courants d'induction, soit dans une armature métallique, soit dans des enroulements conducteurs, aussi donne-t-on également à ce genre de machines le nom de *moteurs d'induction*.

On remarquera d'autre part que les courants d'induction ne peuvent se produire dans les bobines de l'armature, qu'autant que le flux tournant se déplace par rapport aux fils de manière à les couper; il faut donc que la vitesse du champ tournant soit toujours plus grande que celle de l'armature qu'il entraîne à sa suite; autrement dit, la vitesse de l'armature doit être moindre que celle du champ et le retard entre l'un et l'autre ira toujours croissant; de là le nom de moteurs asynchrones qui qualifie ce système.

Avant la mise en marche, la vitesse relative du champ par rapport à l'induit, à l'état de repos, est maximum; la force électro-motrice d'induction et le courant développés dans les enroulements fermés peuvent atteindre une intensité dangereuse pour la conservation de l'induit; il conviendra donc d'insérer à ce moment une résistance, soit dans le circuit de l'armature, soit dans le circuit inducteur.

Il résulte d'ailleurs de ces circonstances que le couple moteur est maximum au démarrage, qui se fait très facilement en charge; les moteurs asynchrones ont donc cette qualité commune avec les moteurs à courant continu.

On remarquera l'analogie qui existe entre un moteur asynchrone et un transformateur; si l'on vient à caler l'organe mobile, l'inducteur agira sur l'induit comme le circuit primaire du transformateur sur les bobines secondaires. L'enroulement de l'inducteur étant disposé pour

courant triphasé, on recueillera aux bornes de l'induit un courant secondaire, triphasé, diphasé ou alternatif, suivant l'enroulement réalisé sur l'armature. On pourra même, en décalant celle-ci, se servir de la machine comme transformateur et comme dynamoteur; l'énergie de l'inducteur se répartit alors en travail moteur et en énergie électrique dans le circuit secondaire de l'induit.

MOTEUR BROWN A CAGE D'ÉCUREUIL. — Si nous considérons les divers genres de connexion des conducteurs

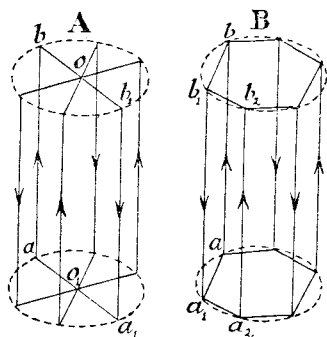


FIG. 396. — Enroulements en cage d'écureuil.

induits et notamment les deux types représentés par les schémas de la figure 396, nous voyons d'abord, en ce qui concerne la disposition A, que les différentes spires rectangulaires sont soudées à leurs points de croisement o, o . Cette disposition est rationnelle, car on peut admettre que le potentiel est le même sur chacun des cadres aux points de soudure, la force électromotrice agissant de a à b étant égale et de sens contraire à celle agissant de b à a_1 , comme l'indiquent les flèches, de sorte que les milieux des connecteurs radiaux sont dans un état électrique semblable.

La disposition B dans laquelle les extrémités des conducteurs sont reliées ensemble sur chaque base du tambour, par des connecteurs hexagonaux, est également justifiée, car le conducteur $a_1 b_1$ peut être relié indifféremment aux conducteurs voisins $a b$ ou $a_2 b_2$ et, par conséquent, aux deux à la fois. On obtient ainsi la disposition dite en cage d'écureuil appliquée par Brown dans la construction de ses moteurs asynchrones polyphasés.

Les barreaux de la cage d'écureuil forment une masse conductrice analogue à celle d'un cylindre de cuivre, avec

cette différence essentielle que les courants de Foucault de direction quelconque, qui se développent dans ce cylindre, sont ici remplacés par des courants dirigés d'une manière rationnelle et efficace dans le champ inducteur. Celui-ci est d'ailleurs renforcé par la présence d'une armature en fer feuilleté, pour éviter les courants de Foucault.

Les conducteurs sont logés dans des trous percés dans le fer de l'armature et dans le voisinage de la périphérie; les enroulements inducteurs sont également disposés à l'intérieur de trous forés très près de la périphérie interne de l'organe fixe. Il résulte en effet des expériences de Brown, que les anneaux rainés à denture fine ou grosse, formant des sillons ouverts sur la face extérieure du fer, donnent lieu à un échauffement considérable des pièces en présence et à des vibrations sonores inacceptables.

Les enroulements inducteurs recevant le courant polyphasé, seront bobinés dans le système enchaîné où les spires des diverses sections diphasées ou triphasées chevauchent l'une sur l'autre, en restant décalées l'une par rapport à l'autre, dans l'espace, d'un angle correspondant au décalage des courants, dans le temps.

La figure 397 reproduit un moteur diphasé du système Brown construit d'après les principes énoncés.

L'inducteur et l'induit sont tous les deux construits en fer feuilleté; le noyau induit est calé sur l'arbre supporté par deux paliers P, venus de fonte avec les parois latérales du bâti. Le paquet de feuilles de tôle annulaires qui forme le noyau inducteur B est encastré dans une enveloppe cylindrique en fonte K qui porte à la base de larges patins D supportant toute la machine; sur les bords de ce cylindre pourvus de brides circulaires, viennent se visser les plaques latérales cintrées C, portant les palliers, dont il est parlé plus haut: l'inducteur et l'induit sont ainsi contenus dans une enveloppe en fonte presque entièrement close.

Les trous circulaires *t*, forés au bord de l'armature, sont garnis de barres de cuivre enrobées dans des tubes de

papier p , qui sont réunies en court-circuit, à leurs extrémités émergeant sur chaque face du tambour, par de

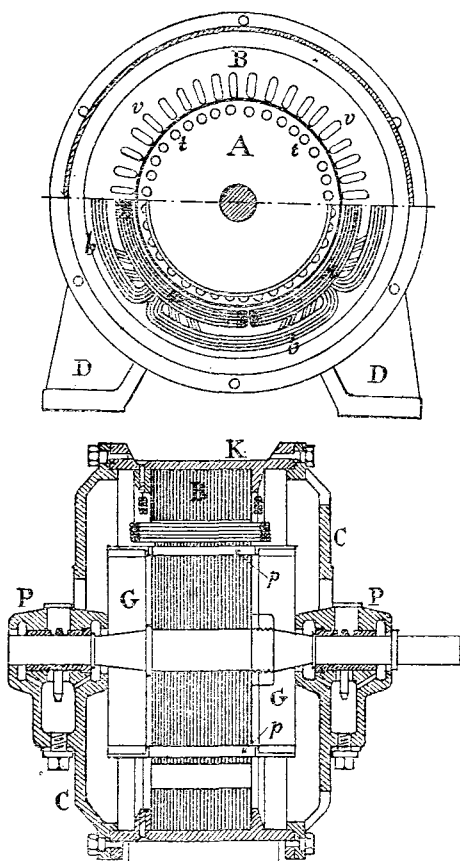


FIG. 397. — Moteur diphasé système Brown.
Coupes transversale et longitudinale.

larges cercles de fer G , qui, par leur grande surface refroidissante, combattent efficacement l'élévation de température de circuit induit.

L'enroulement inducteur se compose de deux couples de quatre bobines a et b alimentés respectivement par chacun des circuits biphasés; les fils des bobines sont insérés dans les trous ovalisés v perforés sur le bord intérieur de l'anneau.

Les deux couples de bobines forment ainsi un double flux ou quatre pôles tournants. La vitesse de rotation d'un pareil moteur, à raison d'une fréquence du courant polyphasé de 60 périodes par seconde, par exemple, serait de 30 révolutions complètes, puisque chaque flux tournant se déplacera d'une demi-circonférence soixante fois, ou d'une circonférence entière trente fois par seconde.

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DES MOTEURS ASYNCHRONES. — Le champ magnétique tournant engendré par les courants diphasés ou triphasés de l'enroulement inducteur fixe, coupe à la fois les spires de cet enroulement et celles de l'induit mobile. Le courant d'induction développé dans cet induit, crée lui-même un champ magnétique antagoniste, de sorte qu'il y a en réalité deux champs composants dont la résultante constitue le champ effectif, agissant pour produire le courant induit dans l'enroulement mobile et le couple moteur du travail mécanique.

Ce flux résultant exerce donc son action sur le circuit fixe et le circuit mobile, comme sur les circuits primaire et secondaire d'un transformateur.

Si le moteur tournait à vide, sa vitesse angulaire ou le nombre de tours n qu'il effectuerait par seconde, serait à très peu près semblable à ceux n_1 du champ tournant, et les vitesses de l'un et de l'autre seraient rigoureusement égales, si les résistances passives étaient nulles.

Dans ce cas extrême, le *glissement*, c'est-à-dire la différence entre le nombre de tours de l'organe mobile et du champ, étant nul, il n'y aurait pas de courants induits dans les enroulements de l'armature, et le couple moteur M serait nul également; le système fonctionnerait alors comme un transformateur à vide.

Quand le moteur supporte une certaine charge, le glissement $(n - n_1)$ prend une valeur qui, pour la charge

normale, varie de 4 pour 100 environ dans les machines bien construites, de puissance moyenne, et ne dépasse pas 10 pour 100 pour les petits moteurs.

Le courant secondaire induit augmente avec la charge et la valeur du glissement, mais de même que dans les transformateurs, une augmentation parallèle du courant primaire se produit dans l'inducteur pour maintenir le flux magnétique, malgré la réaction plus forte de l'induit, à une valeur à peu près constante.

On peut donc admettre que le flux est constant à toutes les charges, mais à la condition que les intensités, tant dans les enroulements fixes que dans les mobiles, n'atteignent pas des valeurs exagérées. Dans ce cas, en effet, les forces magnétomotrices en opposition des deux organes déterminent des fuites magnétiques très importantes, dans l'entre-fer, qui réduisent le champ principal et déterminent un décalage entre les courants induits et le champ tournant; ces différentes causes diminuent considérablement le couple moteur.

C'est ce qui arrive au démarrage: le glissement ($n - n_1$) est alors maximum, le terme n_1 étant nul; la force électro-motrice d'induction atteint alors sa plus grande valeur et engendre un courant très intense dans l'induit. Il convient donc d'opposer un frein à ce courant, par l'introduction d'une résistance dans le circuit induit, à la mise en marche, non seulement pour prévenir toute détérioration des enroulements primaire et secondaire, mais encore pour réduire la puissance thermique dissipée dans les enroulements et augmenter en même temps le couple moteur au démarrage.

Le diagramme de la figure 398 rend compte des variations du couple moteur, lorsque la vitesse relative ou le glissement varie de 0 au maximum égal à la vitesse de rotation du flux.

On a porté sur l'axe des abscisses OV les valeurs successives de n_1 et en ordonnées les valeurs correspondantes du couple moteur. Comme la vitesse donnée du flux tournant V est représentée par la longueur OV , à chaque

valeur $OP = n_1$ de la vitesse de l'organe mobile, portée à partir de O , correspondra une longueur $VP = (n - n_1)$ de la vitesse relative portée en sens inverse, à partir de V .

Le point V correspondrait à la marche à vide, sans frottement, pour laquelle le glissement serait nul, il n'y aurait alors aucun travail et le couple moteur serait également nul, comme l'indique la courbe qui part de zéro en ce point. Elle s'élève ensuite rapidement, atteint un maximum, puis descend brusquement et s'infléchit pour tomber à la valeur très réduite oq , à la vitesse nulle du moteur, c'est-à-dire au démarrage.

On remarquera que la portion de la courbe Vp , surtout dans le voisinage de l'origine, est presque une ligne droite

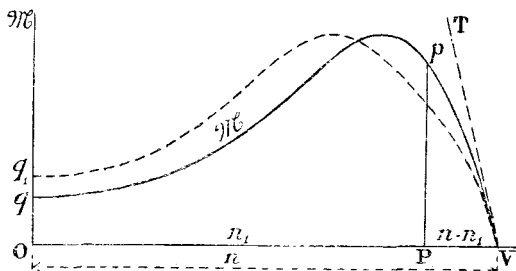


FIG. 398. — Diagramme du couple moteur par rapport au glissement.

qui diffère très peu de la tangente en V tracée en pointillé. En effet, dans la région proche de l'origine, où la vitesse différentielle est relativement faible, on peut admettre que le champ est constant et que les dérivations magnétiques sont négligeables; dans ce cas, et pour des variations limitées de la vitesse $n - n_1$ le couple mécanique serait proportionnel à ces différentes vitesses et ses variations seraient représentées par la tangente VT .

La courbe en pointillé, représentée sur le même diagramme, est relative au fonctionnement du moteur, après insertion d'une résistance complémentaire dans le circuit

induit. On voit que cet accroissement de résistance, ainsi que nous l'avons expliqué plus haut, a pour effet de relever le couple moteur au démarrage. D'un autre côté, la valeur maximum correspond à une différence de vitesse $(n - n_1)$ plus grande entre le flux tournant et l'organe moteur, de telle sorte que le rendement à pleine charge, correspondant à une vitesse moindre de l'armature, se trouve diminué.

Ces considérations justifient d'une part, l'usage des résistances que l'on introduit dans le circuit de l'armature pour augmenter le couple moteur au démarrage et l'enlèvement de ces résistances, dès que l'armature a atteint sa vitesse normale.

Les moteurs d'induction sont réversibles; si en effet, à l'aide d'un moteur mécanique auxiliaire, on imprime à l'élément mobile une vitesse supérieure à celle du champ tournant, de telle sorte que n_1 soit plus grand que n , le couple moteur qui comprend le facteur $(n - n_1)$ devient négatif et change de signe. Ainsi, de moteur qu'il était, le couple devient résistant, c'est-à-dire que la machine fonctionne comme génératrice et produit dans l'organe inducteur un courant, qui aura d'ailleurs la même fréquence que le courant polyphasé amené aux bornes de la machine, quelle que soit d'ailleurs la vitesse de l'armature mobile.

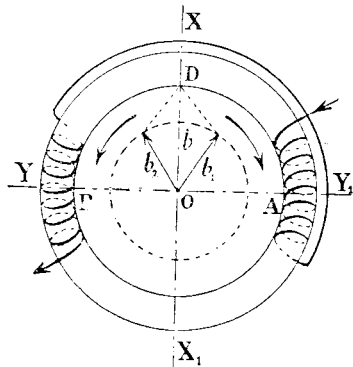
231. Moteur d'induction à courant alternatif simple. — On peut également réaliser des moteurs d'induction à champ tournant, par la réaction d'un courant alternatif simple sur les enroulements en court-circuit d'un induit mobile.

Considérons (fig. 399) un inducteur muni de deux bobines AB enroulées sur un anneau, aux extrémités d'un même diamètre YY_1 ,

Si on lance dans ce couple de bobines un courant alternatif, celui-ci engendre un champ alternatif XX_1 qui oscille entre un maximum positif et un maximum négatif, en passant deux fois par zéro dans une période: ce flux engendre dans les enroulements de l'induit des courants alternatifs, comme dans le circuit secondaire d'un transformateur.

Soit OD la valeur maximum B du flux inducteur; pour comprendre comment ce champ alternatif est capable de déterminer une rotation, nous considérons ce flux comme la résultante de deux autres flux b_1 et b_2 tournant avec la même vitesse n_1 , l'un b_1 dans le sens des aiguilles d'une montre, l'autre b_2 en sens contraire.

Si l'organe induit est en repos, les flux b_1 et b_2 agissent semblablement sur l'enroulement, y développent des courants i_1 et i_2 et les réactions mutuelles de ces courants et du flux, créent deux couples moteurs égaux et de signe contraire. Dans ces conditions, l'induit ne peut être entraîné ni d'un côté ni de l'autre et le moteur ne peut démarrer.



Le flux résultant OD s'élève et s'abaisse suivant XX_1 , comme le

FIG. 399. — Démonstration de la rotation par un courant alternatif.

piston unique d'une machine à vapeur agissant sur la manivelle; si l'on suppose qu'au repos cette manivelle se trouve au point mort, le bras de levier sur lequel agit la tige du piston est alors nul et la machine ne peut démarrer sans le secours d'une impulsion extérieure qui vienne rompre la symétrie des efforts et continuer le mouvement commencé.

Il en est de même dans le moteur électrique actuel; si l'on imprime à l'induit un mouvement de rotation dans un sens quelconque, l'harmonie des couples sera détruite et l'armature mobile sera entraînée dans un mouvement continu, par celui des deux couples qui devient alors prépondérant.

232. Dispositions de démarrage et de changement de vitesse des moteurs polyphasés. — Lorsque les moteurs sont destinés

à des applications qui ne comportent pas de démarrage à pleine charge, on ferme directement le circuit inducteur sur la canalisation de distribution, sans intercaler aucun appareil de mise en marche. Il convient alors de donner au champ inducteur une grande intensité, de réduire la résistance de l'enroulement primaire et d'augmenter, au contraire, la résistance du circuit induit.

Ce procédé présente toujours l'inconvénient de déterminer dans l'induit un courant intense entraînant un échauffement considérable de cette partie du moteur; en outre, le courant induit ayant pour effet, comme dans les transformateurs, d'équilibrer la self-induction de l'enroulement inducteur, celui-ci est en même temps traversé par un courant de grande intensité qui vient surcharger la canalisation, les transformateurs et les génératrices, au moment du démarrage.

On évitera la production des courants trop intenses, tant dans l'induit que dans l'inducteur, en introduisant dans

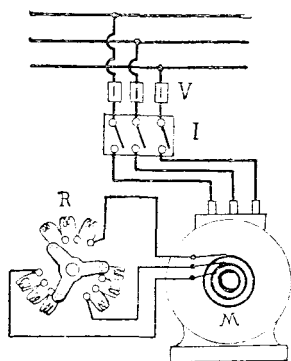


FIG. 400. — Appareil de mise en marche pour moteur triphasé.

ce dernier organe, soit un rhéostat, soit une bobine de self-induction. Cette insertion a nécessairement pour résultat de réduire le champ inducteur et par suite le couple moteur; ce moyen ne peut donc être employé que dans le cas où le moteur n'a à démarrer qu'à vide ou à faible charge. Si l'on veut obtenir un couple énergique au démarrage, il faut, comme nous l'avons vu, intercaler une résistance dans le circuit induit.

Cette résistance réglable peut être liquide ou métallique.

Considérons le cas d'un moteur triphasé dont l'induit à anneau, par exemple, porte un enroulement monté en

étoile. Les extrémités du circuit seront reliées à trois bagues, si c'est l'induit qui est mobile. L'appareil de mise en marche pourra présenter la disposition illustrée par la figure 400. Sur les trois bagues M frottent des balais en nombre égal, qui sont respectivement reliés à trois résistances R , par un commutateur à trois ailes. A la mise en marche, celui-ci doit occuper la position indiquée sur le dessin, la résistance maximum est alors insérée dans chacune des sections de l'induit; en tournant lentement le commutateur dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre, on élimine successivement les diverses fractions de résistances. Lorsque les branches du commutateur se trouvent sur les derniers plots, les sections de l'induit sont reliées en court circuit par ledit commutateur et le moteur peut développer sa puissance maximum.

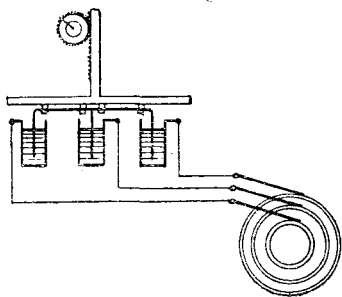


FIG. 401.— Résistance de démarrage liquide.

Les rhéostats liquides (fig. 401) se composent généralement de trois plaques métalliques, montées sur un même support qu'on peut immerger plus ou moins dans trois vases isolés, contenant une solution saline destinée à rendre le liquide plus conducteur. Chacun des vases est relié respectivement à l'un des trois balais du collecteur triphasé. Les plaques étant d'abord hors du liquide, on les fait descendre peu à peu pour réduire de plus en plus la résistance intercalée; quand le moteur a atteint sa vitesse normale, le support métallique des plaques vient mettre les vases et par suite les sections de l'induit en court circuit.

Un autre procédé consiste à composer l'enroulement induit de plusieurs sections, qui sont toutes reliées en série au démarrage, de façon à présenter la résistance

maximum du circuit à ce moment et que l'on met successivement en quantité, pour réduire progressivement cette résistance, au fur et à mesure que la vitesse du moteur se rapproche de sa valeur de régime.

On peut encore opposer entre eux les divers éléments de l'enroulement, à la mise en marche, puis les relier ensuite

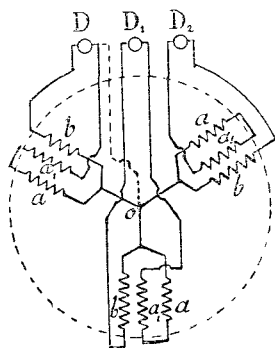


FIG. 402.— Mise en marche par le couplage des bobines.

en parallèle, de manière à réduire la résistance de ces circuits et à développer la force électro-motrice maximum donnant un courant plus intense, lorsque la vitesse du moteur est à son taux normal.

Considérons, par exemple (fig. 402), un moteur triphasé dont les sections de l'induit comportent chacune trois bobines, formant des couples en série, tels que a a_1 groupés en étoile, tandis que les troisièmes bobines

b de chaque section sont également reliées en un second groupement étoilé, au centre commun o .

Si l'on relie les extrémités libres des branches de chaque étoile, deux à deux, aux trois bornes D , D_1 et D_2 , chacun des groupes a a_1 sera en opposition avec la bobine unique b , et la force électro-motrice résultante ne sera que la différence des forces électro-motrices engendrées dans a a_1 d'une part, et dans b de l'autre, soit la moitié seulement de celle engendrée par le couple a a_1 ; en même temps la résistance du circuit entier sera le triple de la résistance de la bobine unique. Il suffira ensuite de relier les plots D au point o , pour que les deux enroulements de chaque section ne soient plus en opposition mais en parallèle; ils débiteront alors chacun un courant i , tandis que, dans le premier cas, le courant pour une résistance triple sera le tiers du précédent.

Pour faire varier la vitesse d'un moteur d'induction, on peut insérer des résistances dans l'induit, ce qui a pour effet de réduire le courant et par suite le couple moteur ; mais ce réglage à l'inconvénient d'absorber de la puissance et d'affaiblir le rendement.

Dans le cas d'un inducteur à anneau triphasé, à six bobines par exemple, on pourra dédoubler chacune des bobines en deux sections, et grouper à l'aide d'un commutateur les diverses sections, de manière à réunir sur la moitié de l'anneau six demi-bobines triphasées ; le champ tournant fera alors un demi-tour par période et la vitesse sera réduite de moitié.

Pour obtenir le changement de marche du moteur, il suffit d'inverser le courant à deux des bourses de l'inducteur, car en changeant le sens de l'un des courants composants, on renversera le sens de rotation du couple moteur.

DÉMARRAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES MONOPHASÉS. — Le procédé généralement employé consiste à munir l'inducteur d'un second enroulement que l'on relie aux bornes du moteur, au moment de la mise en marche, mais après avoir inséré dans son circuit, soit une bobine de self-induction, soit un condensateur, destinés à créer une différence de phase entre les courants des deux enroulements. Il se produit ainsi un champ tournant qui fait démarrer le moteur, comme s'il s'agissait d'un moteur di-ou triphasé.

On se sert à cet effet d'un appareil de mise en marche tel que celui de Brown représenté par la figure 403. On voit sur la gauche l'inducteur avec ses deux enroulements, dont l'un, à gros fil, est le circuit ordinaire de marche, et l'autre, en traits plus fins, la bobine auxiliaire de démarrage. Ce circuit est connecté, d'une part, à la borne d'arrivée de l'un des conducteurs, et, d'autre part, au second conducteur, par l'intermédiaire d'un condensateur C. L'appareil comprend encore un commutateur bipolaire A B et un transformateur T ou auto-transformateur à un seul enroulement.

Le condensateur est formé d'un certain nombre de plaques métalliques plongées dans un récipient d'eau pure. Le commutateur A B représenté en plan et en élévation, est pourvu de huit bornes de contact. Quant au transformateur T, sa bobine unique, est placée en dérivation sur les conducteurs extérieurs: cette bobine est divisée en plusieurs sections qui aboutissent à quatre bornes, on peut donc prendre, entre ces divers plots, telle tension réduite que l'on désire.

Au repos, le commutateur est dans la position verticale; pour la mise en marche, on l'abaisse à gauche vers

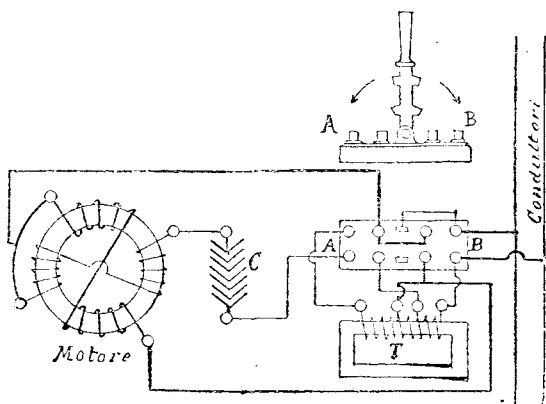


FIG. 403. — Appareil de mise en marche, système Brown.

A; les quatre bornes de ce côté sont alors reliées deux à deux, de part et d'autre de l'axe longitudinal.

Le courant venant de B par le conducteur supérieur, par exemple, traverse l'axe du manipulateur et se divise entre les deux enroulements du moteur. Le circuit de la bobine inductrice principale, tracé en gros traits, se ferme sur le second conducteur extérieur, en traversant la moitié de l'enroulement du transformateur T, qui réduit ainsi de moitié la tension dans ce circuit.

Le circuit auxiliaire contenant le condensateur C, se

ferme, également par une section comprenant quelques spires de la bobine du transformateur.

Quand la vitesse du moteur a atteint sa valeur normale, on porte rapidement le commutateur à droite en B ; le courant du circuit principal du moteur est alors relié directement, sans l'intermédiaire de T, aux conducteurs d'alimentation dont il reçoit la tension totale.

Par la même manœuvre, la bobine auxiliaire avec son condensateur et le transformateur se trouvent mis hors circuit.

233. Qualités des moteurs à courants polyphasés. — Ces moteurs, et notamment les moteurs d'induction ou asynchrones, sont remarquables par la constance de leur vitesse. En effet, les moteurs synchrones tournent avec une vitesse angulaire fixée par la fréquence même du courant ; quatu

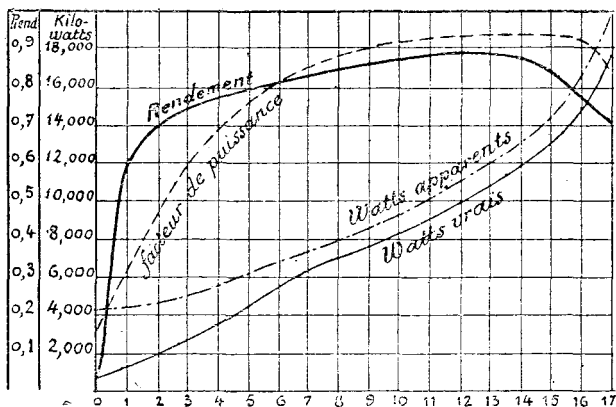


FIG. 404. — Diagramme du travail d'un moteur asynchrone.

aux moteurs de la seconde catégorie, leur vitesse ne varie pas de plus de 3 à 4 pour 100, entre la marche à vide et la puissance à pleine charge.

Les moteurs d'induction, surtout ceux qui ne nécessitent pas l'emploi d'un rhéostat pour la mise en marche,

sont d'une construction réduite à la plus grande simplicité, ne présentant ni bagues ni balais. Les induits portent des enroulements en anneau ou en tambour, montés dans le système biphasé ou triphasé, ou des conducteurs en cage d'écureuil.

Le rendement des moteurs polyphasés est comparable à celui des meilleurs moteurs à courants continus. Il est de 55 à 68 pour 100, dans le cas des puissances inférieures à un cheval; il s'élève jusqu'à 94 pour 100, à pleine charge, pour les puissances supérieures à 100 chevaux.

La figure 404 est la reproduction d'un diagramme dressé par M. Arno, touchant le fonctionnement d'un moteur Brown asynchrone, à six pôles, de 15 chevaux.

Le rendement à pleine charge est de 0,83; il atteint 0,89 pour 12 chevaux; il est encore de 0,80 au tiers de charge. Le facteur de puissance $\sqrt{1-k^2}$ est très élevé, et dépasse 0,9 entre 10 et 16 chevaux.

Enfin le diagramme donne les courbes de la puissance apparente qui est le produit direct de la tension par l'intensité, et de la puissance réelle, qui se déduit de la première en la multipliant par le facteur de puissance.

CHAPITRE XIV

APPLICATIONS MÉCANIQUES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

234. Traction électrique. — L'électro-moteur se prête de la façon la plus remarquable à la traction des voitures sur les lignes ferrées. La propriété qu'il possède de développer un couple moteur maximum au démarrage, surtout dans le cas des courants continus, au moment même où l'effort le plus grand est nécessaire, en fait un instrument des plus précieux pour cette application spéciale.

C'est en outre le moteur rotatif par excellence, qui, sans l'intermédiaire des bielles et manivelles, peut transmettre, sans transformation mécanique autre que celle de la vitesse, son mouvement de rotation aux essieux du véhicule. Enfin, si l'énergie électrique est fournie par une station génératrice fixe, le moteur présente une élasticité de puissance assez grande pour absorber, sur la ligne, toute l'énergie nécessaire aux besoins variables de la traction et du trafic.

EFFORT DE TRACTION. — Avant de décrire les divers systèmes employés pour distribuer le courant aux moteurs des voitures de tramways, il convient de rappeler brièvement les principes mécaniques de la traction.

Nous n'envisageons ici que la circulation sur des rails et notamment sur les lignes de tramways. La résistance au roulement sur les voies ferrées est évidemment bien inférieure à celle des voies pavées ou macadamisées, mais

elle varie encore dans d'assez grandes proportions, suivant le système de rails employé. Les types les plus usités en France sont le rail Broca et la voie Marsillon.

Le premier (fig. 405) présente un champignon creusé

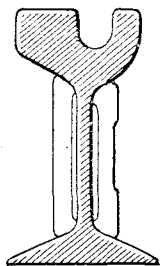


FIG. 405. — Rail Broca.

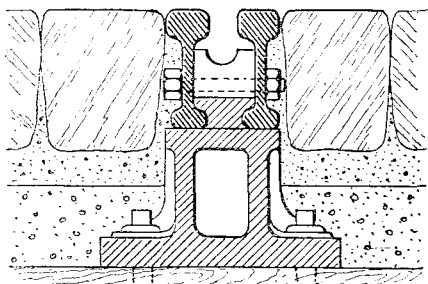


FIG. 406. — Voie Marsillon.

d'une ornière et monté sur une âme supportée par un patin.

La voie Marsillon (fig. 406) est formée de deux rails identiques, à doubles champignons, dont l'écartement est rendu aussi invariable que possible par des fourrures et des coussinets en fonte, boulonnés sur des traverses en bois.

Le sillon profond qui sépare les deux rails est moins susceptible de se combler par les détritns de la route que l'ornière du rail Broca, et la première voie présente une résistance au roulement plus faible que la seconde.

L'effort communiqué par le moteur à l'essieu se transmet tangentiellement à la jante de la roue ; or la force de frottement qui se développe au point de contact de la roue sur le rail est directement opposée à l'effort moteur tangentiel ; il s'ensuit que, si la résistance de frottement est inférieure à cet effort, la roue n'étant pas suffisamment butée en arrière, pour ainsi dire, par cette résistance, glissera et *patinera* sur le rail, sans pouvoir rouler ni avancer. On dit alors que le coefficient d'adhérence ou de

frottement de la roue sur le rail est insuffisant. *On voit que la condition essentielle du roulement, c'est que la force de frottement, ou l'adhérence, soit supérieure ou au moins égale à l'effort moteur tangentiel.*

Cette adhérence est proportionnelle au poids du véhicule supporté par les roues motrices ; elle dépend d'ailleurs, pour les roues de même nature, du système de rail employé et surtout de l'état atmosphérique actuel.

Le coefficient d'adhérence, qui est la fraction par laquelle il faut multiplier le poids agissant, pour obtenir la force de frottement, varie dans des limites très étendues de $1/9$ à $1/17$, suivant l'état de la voie. Par un temps sec, ce coefficient s'élève jusqu'à $1/5$, mais l'humidité, la neige et le verglas le font tomber au-dessous de $1/10$; les coefficients les plus bas s'observent par certains brouillards et dans les tunnels où les rails se recouvrent d'enduits gras très glissants. En somme, on peut prendre comme chiffre ne devant pas être dépassé en régime normal, le coefficient de $1/10$.

Soit par exemple une voiture automobile de 6 tonnes, à quatre roues, n'ayant qu'un seul essieu moteur ; les deux roues motrices portant trois tonnes. L'adhérence, calculée d'après le coefficient indiqué, sera de 300 kilogrammes.

L'effort de traction dépend également de la nature des rails et de l'état d'entretien et de propreté de la voie. On admet qu'en palier, la résistance moyenne à la traction, ou *le coefficient de traction*, est de 10 kilogrammes par tonne remorquée, pour une voie à rails saillants, et de 13 kilogrammes, pour une voie de tramway noyée dans la chaussée. Mais ce coefficient peut s'élever facilement à 20 kilogrammes, sur une voie sale et mal entretenue ; il varie d'ailleurs avec l'état atmosphérique, et diminue notablement par les temps de pluie et de brouillard.

Le coefficient susdit s'entend pour la traction en palier et en ligne droite. Dans les courbes, la résistance augmente notablement, par suite du calage des roues et du parallélisme des essieux qui produisent des glissements correspondant à un effort supplémentaire. Cet effort est

d'autant plus considérable que le rayon de la courbe est plus petit; on admet que, pour des courbes de 15 mètres de rayon, l'effort de traction est doublé, et qu'il est triplé pour les courbes de 10 mètres de rayon.

La résistance augmente aussi avec la vitesse, du fait de la discontinuité et des inégalités de la voie et notamment par suite de la résistance du vent, qui est proportionnelle à la section transversale du véhicule et au carré de la vitesse. Toutefois, avec les vitesses relativement réduites admises généralement sur les lignes de tramways, on peut adopter le chiffre moyen de 12 kilogrammes par tonne.

EFFORT DE TRACTION EN RAMPE. — Dans les rampes, il faut non seulement vaincre les résistances de roulement, de glissement et autres,

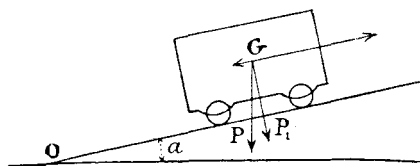


FIG. 407. — Effort pour l'ascension d'une rampe.

mais il faut encore élever le poids du véhicule, pour chaque mètre de progression en direction horizontale, du nombre de millimètres exprimé par

la pente du profil de la voie. Soit une voiture pesant une tonne (fig. 407) et roulant sur une rampe de 1 millimètre par mètre; le travail relatif à l'élévation du poids à une hauteur de 1 millimètre, pour chaque mètre d'avancement compté sur le profil de la rampe sera :

$$C = 1000^k \times 0,001 = 1 \text{ kilogramme.}$$

Il faut donc ajouter 1 kilogramme par millimètre, ou 10 kilogrammes par centimètre de rampe et par tonne à l'effort de traction en palier.

Ces considérations nous permettront d'établir, dans chaque cas particulier, la rampe limite qu'une voiture automotrice pourra gravir par la seule adhérence des roues sur les rails, c'est-à-dire sans le secours de crémaillère ou de tout autre moyen artificiel.

Soit une voiture de 8 tonnes à deux essieux moteurs; le poids adhérent sera avec un coefficient de $\frac{1}{10}$ égal à $\frac{8000}{10} = 800$ kilogrammes; si le coefficient de traction en palier est de 12 kilogrammes par tonne, l'effort moteur total sera égal à $8 \times 12 = 96$, soit 100 kilogrammes.

L'effort supplémentaire pour gravir une rampe pourra donc atteindre, sans dépasser l'adhérence, le chiffre de $800 - 100 = 700$ kilogrammes. En réalité, ce calcul n'est qu'approximatif, car le poids qui produit l'adhérence n'est pas P, poids total du véhicule, mais seulement P_1 la composante de ce poids suivant la normale à la voie. Le poids adhérent tend donc à diminuer au fur et à mesure que la rampe augmente, mais la différence est négligeable, pour les cas ordinaires de rampes ne dépassant pas 10 centimètres par mètre.

L'effort ascensionnel étant dans le cas actuel de 8 kilogrammes, et la force disponible par rapport à l'adhérence de 700 kilogrammes, la rampe limite sera de $\frac{700}{8} = 87$ millimètres environ.

EFFORT AU DÉMARRAGE.— L'effort de traction, au départ, est bien supérieur à celui qui est développé en cours de marche; il peut facilement devenir six à sept fois plus grand. Cela tient en premier lieu à ce que la résistance au roulement s'accroît, du fait de la dépression des rails, sous les roues du véhicule au repos, et en second lieu, qu'il faut augmenter l'effort correspondant aux diverses résistances de frottement et de roulement, de la force nécessaire pour communiquer au véhicule la vitesse voulue, en un temps donné.

Il importe en effet que la voiture puisse démarrer et atteindre rapidement la vitesse qu'elle doit avoir en cours de marche. Or, on sait que la force de la pesanteur agissant sur la masse d'une tonne, lui imprimerait en chute verticale, une accélération de 9,81 par seconde; si l'on veut, par exemple, que l'accélération ou la vitesse acquise au bout d'une seconde soit de 1 mètre seulement, il faudra dépenser un effort sup-

plémentaire qui ne sera plus que $\frac{1000}{9,81}$ et, pour une accélération quelconque K, la force F à développer deviendra $\frac{1000}{9,81} \times K$.

Ce que l'on veut, c'est atteindre une certaine vitesse v , au bout d'un temps t ; l'accélération correspondante est alors $K = \frac{v}{t}$ et en remplaçant dans l'expression précédente, on obtient :

$$F = \frac{1000}{9,80} \times \frac{v}{t} = 102 \times \frac{v}{t}$$

Ainsi, pour imprimer au bout d'une seconde à la masse d'une tonne une vitesse de 1 mètre, il faudra développer un effort supplémentaire de 102 kilogrammes, il en serait de même pour réaliser la vitesse de 5 mètres au bout de cinq secondes; la force pour obtenir les mêmes vitesses au bout de dix secondes serait réduite proportionnellement au temps.

PUISSANCE DE TRACTION. — Elle s'obtient en kilogrammètres en multipliant l'effort de traction en kilogrammes, par la vitesse en mètres par seconde; pour avoir sa valeur en chevaux, on divise le résultat par 75.

Le travail total sur la ligne, aller et retour, s'obtiendra en multipliant l'effort moyen par la longueur du trajet complet. Pour obtenir l'effort moyen, on multipliera l'effort correspondant à chaque section de la ligne, par la longueur de cette section, et l'on divisera la somme de ces produits par la longueur totale du parcours.

Pour avoir la puissance moyenne absorbée par une voiture, il faudrait faire les produits des divers efforts par les vitesses correspondantes ou, si les vitesses dans les différentes sections ne diffèrent pas sensiblement de la vitesse moyenne, multiplier l'effort moyen par cette vitesse.

S'il s'agit de déterminer la puissance dépensée sur la ligne en vue d'évaluer la puissance de l'usine génératrice, on calculera les puissances partielles afférentes aux diverses voitures situées au même instant dans les différentes sections de la ligne, tant pour les voitures montantes que pour les descendantes. Si l'on admet un rendement de 50 pour 100 entre les machines à vapeur de la station et

les moteurs des voitures, on obtiendra la puissance de l'usine en multipliant par 2 le résultat obtenu.

Enfin, la puissance du moteur de la voiture sera déterminée par la considération du maximum de puissance à développer, sur le point le plus défavorable de la ligne. Dans cette question, il ne faudra pas perdre de vue que le moteur a non seulement à fournir la puissance afférente à la résistance de roulement, mais encore celle absorbée par les organes de réduction de vitesse, chaînes ou roues d'engrenage, de même que par le frottement des fusées dans les boîtes à graisse. On calculera le chiffre maximum correspondant aux passages en courbe et en rampe. Il faut d'ailleurs que la puissance du moteur soit suffisante pour les besoins du démarrage, mais cette condition sera facilement remplie par les électro-moteurs qui ont cette précieuse propriété de développer leur couple moteur maximum à la mise en marche.

Une voiture de 10 tonnes n'absorbe guère, à la vitesse de 10 à 12 kilomètres à l'heure, que 8 à 10 chevaux, en palier ; mais pour tenir compte des rampes et de l'effort supplémentaire au démarrage, on est conduit, en pratique, à équiper cette voiture de deux moteurs de 25 chevaux. Pour les voitures de petit modèle, de 4 à 5 tonnes, on adopte un seul moteur de 20 à 25 chevaux.

Sur les réseaux des lignes de tramways, les variations de courant sont très brusques, il faut donc que le réglage des dynamos génératrices s'opère automatiquement ; aussi fait-on généralement usage de machines compound. On doit calculer les dynamos génératrices en vue de leur permettre de développer, au besoin, une puissance triple de la puissance normale.

Le moteur qui actionne les génératrices doit être pourvu d'un régulateur sensible et d'un lourd volant, pour parer aux variations brusques de charge. On peut admettre que le rapport entre la demande moyenne d'énergie électrique et la demande maximum est d'un tiers, dans une petite exploitation et atteint un demi pour une ligne comportant 35 à 40 voitures en circulation ; sur les

réseaux de 100 voitures et plus, ce rapport est voisin de l'unité.

En résumé, il faut toujours calculer très largement la puissance de la station génératrice, aussi bien en ce qui concerne les dynamos, que les moteurs et les chaudières à vapeur, et il doit en être de même des dynamoteurs des voitures, qui sont exposés à des surcharges brusques, auxquelles ils doivent pouvoir convenablement résister.

235. Distribution du courant. — CLASSIFICATION. — On peut établir deux grandes classes de procédés propres à alimenter les électro-moteurs des tramways.

La première comporte l'établissement d'une *station centrale fixe* qui distribue le courant sur tout le réseau, soit par des conducteurs aériens, soit par des conducteurs souterrains ou placés au niveau du sol et sur lesquels les électro-moteurs viennent recueillir l'énergie électrique au passage.

La seconde est celle dans laquelle la *voiture automobile* ou le véhicule remorqueur portent eux-mêmes leur provision d'énergie emmagasinée dans des accumulateurs. Ce système ne dispense pas évidemment de l'emploi d'une station génératrice, pour la charge des piles secondaires ; mais elle supprime le réseau de canalisations, c'est-à-dire l'intermédiaire entre l'usine et les voitures.

Quel que soit le procédé employé pour amener le courant de la station génératrice aux électro-moteurs des voitures, il est toujours recueilli par des collecteurs, roulettes ou frotteurs, portés par le véhicule et maintenus constamment en contact avec les conducteurs, pendant le déplacement de celui-ci.

236. Conducteurs aériens. — Le système employé peut être à fil aérien unique ou à double fil aérien. Le premier système, qui est de beaucoup le plus usité, comporte un seul fil, suspendu sur la voie du tramway, par des supports appropriés et dont une extrémité est reliée au pôle positif de la station génératrice, tandis que le pôle négatif est relié aux rails.

Les véhicules sont pourvus d'une perche, fixée par un

support articulé sur le toit de la caisse et recueillant le courant sur le fil aérien, soit par une roulette ou *trolley*, soit par un frotteur à cuillère ou en forme d'archet. Du point de contact, le courant est conduit au moteur par un conducteur isolé à l'intérieur de la perche ; il pénètre par un pôle du moteur et sort par l'autre pôle relié au bâti métallique de la voiture, afin de passer, par le contact des roues, dans les rails qu'il emprunte pour faire retour à la station génératrice.

En réalité, le réseau ne peut se réduire au fil de travail et aux rails, car la perte de tension va en croissant de l'origine de la ligne G à son extrémité (fig. 408). Or, on

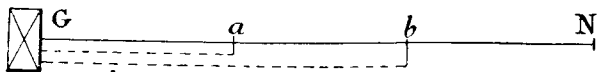


FIG. 408. — Feeders d'alimentation.

ne peut admettre une variation de tension de plus de 10 pour 100 aux bornes du moteur, pour sa bonne marche.

On établira donc un réseau de feeders, partant de l'usine G et aboutissant à différents points de la ligne convenablement choisis, tels que *a* et *b*, où par le moyen de fils pilotes, on peut maintenir une différence de potentiel constante, comme dans les distributions relatives à l'éclairage.

Il convient de fractionner le fil de prise de courant en plusieurs tronçons que l'on puisse isoler aisément l'un de l'autre, en cas d'accident survenu dans l'une des sections. En temps normal, ces tronçons restent réunis par des fils fusibles de sûreté, afin que le courant puisse s'équilibrer dans les diverses parties du réseau. Dans tous les cas, les connexions de feeders avec le fil aérien, se font au moyen de manchons en fonte et par l'intermédiaire de fils fusibles et de parafoudres.

Les fils de prise de courant ou de travail sont suspendus à 7 mètres environ au-dessus du sol, par l'intermédiaire d'isolateurs, à des appuis distants de 35 à 40 mètres en

alignement droit, afin de limiter la flèche qui ne doit pas dépasser 40 centimètres.

Les supports sont constitués, soit par des poteaux en

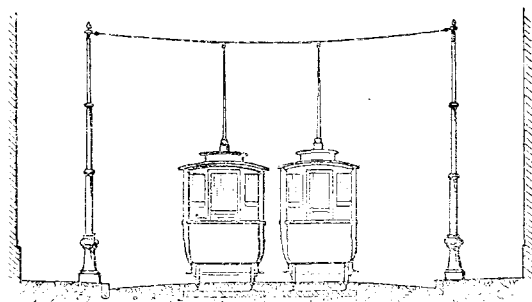


FIG. 409. — Poteau en bordure avec fil tendeur.

acier ou en treillis de fer, placés par paire de chaque côté de la voie (fig. 409) et reliés par des fils transversaux en acier de 5 à 6 millimètres de diamètre, auxquels sont suspendus les

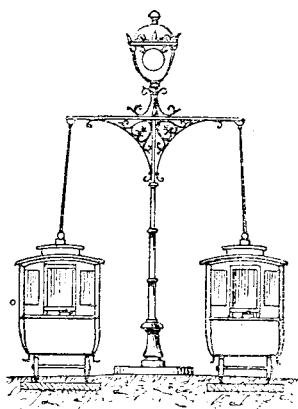


FIG. 410. — Poteau à double console.

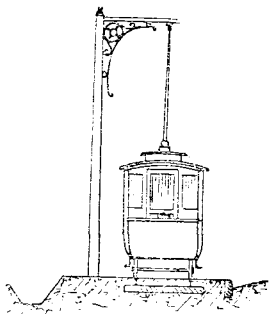


FIG. 411. — Poteau à console simple.

isolateurs portant le fil de travail ; soit par des poteaux à double console placés au milieu de la chaussée (fig. 410) ; soit par des poteaux à simple console (fig. 411).

Les fils d'acier transversaux, tendus entre deux poteaux, y sont attachés par des tendeurs à crochet et œillet isolés, tels que celui représenté par la figure 412 : il comprend deux tiges filetées, dont l'une se termine extérieurement par un crochet C, l'autre par un œillet O noyé dans une substance iso-

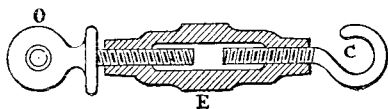


FIG. 412. — Tendeur pour câble transversal

lante et résistante; cet œillet est garni intérieurement d'une bague en cuivre. Le fil transversal s'attache à l'œillet et le tendeur se fixe par le crochet à un collier que porte le poteau. Les filets des deux tiges étant en sens inverse, on produit leur rapprochement et, par suite, la tension des haubans, en agissant sur l'écrou E qui les réunit.

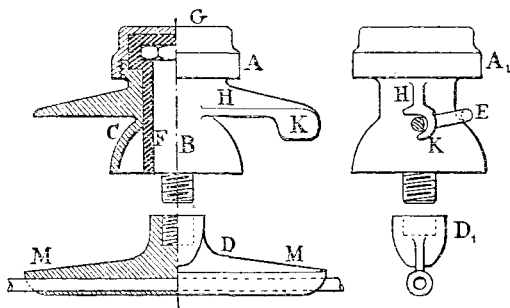


FIG. 413. — Porte-support isolant sur haubans transversaux.

Les isolateurs supportant les fils de travail affectent des formes diverses suivant leur destination.

Quand il s'agit d'une ligne suspendue par des haubans transversaux, on utilise un support isolant tel que celui représenté par la figure 413. Il se compose de deux parties A et D; la première A constituant la pièce isolée où vient se visser le support D du conducteur aérien qui forme la seconde partie. La demi-coupe de A montre que

la pièce se compose d'une sorte de cloche en bronze ou en fonte malléable C, garnie intérieurement d'un cylindre D en matière isolante, ébonite ou micanite D, présentant à la partie supérieure un évasement dans lequel est logée la tête du boulon F; un couvercle G vissé sur la cloche, permet d'enlever facilement le cylindre isolant et le boulon, pour les changer au besoin.

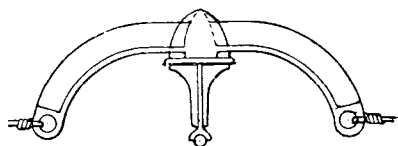


FIG. 414. — Porte-support avec ailes à œillets.

La cloche porte des ailes H, terminées par des appendices chantournés K qui servent à maintenir le fil de suspension E passé autour de la pièce de bronze, comme le montre la figure A.

La seconde pièce est celle qui porte directement le fil de travail; elle est en bronze, et composée d'une douille filetée D, pourvue de deux ailes M en prolongement l'une de l'autre; ces ailes s'épanouissent à la partie inférieure,

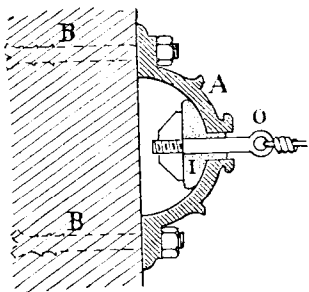


FIG. 415. — Rosace pour hauban tendeur.

de manière à former une sorte de gouttière dont les lèvres peuvent être recourbées, pour servir entièrement le fil. Ce système d'attache est suffisant dans les alignements droits; mais dans les courbes, il convient de souder le fil au support et il est toujours préférable de pratiquer cette opération.

L'isolateur peut encore affecter la forme de la figure 414, dans laquelle les deux ailes recourbées présentent des œillets où viennent s'attacher les demi-haubans tendeurs.

Dans les lignes en courbe, on emploie des isolateurs à une seule aile, tels qu'on les obtiendrait en supprimant

l'aile de droite de l'isolateur de la figure 414, suivant la ligne pointillée.

Dans les rues étroites, où l'on ne peut établir des poteaux, on accroche les haubans tendeurs à des rosaces (fig. 415), scellées dans les murs de façade des constructions. La rosace en bronze hémisphérique A est fixée dans le mur par deux boulons de scellement B; le boulon à œillet O est maintenu à l'intérieur de la rosace par l'intermédiaire d'un bouchon isolant I.

Lorsque les rosaces sont scellées dans les murs de maisons habitées, on doit prendre des dispositions pour éviter que les vibrations sonores du fil de travail se transmettent aux constructions et incommode les habitants. On utilise alors des appareils *antivibrateurs* tel que celui représenté par la figure 416. Dans une cartouche en bronze B est

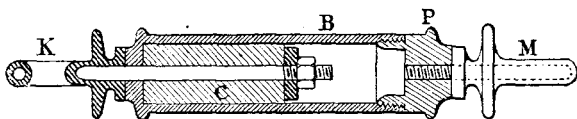


FIG. 416. — Antivibrateur pour haubans fixés aux murs des habitations.

placé un cylindre de caoutchouc C, que traverse suivant son axe, une tige d'acier terminée extérieurement par une boucle K; celle-ci sert à accrocher l'appareil à la rosace. La cartouche est fermée par un couvercle à vis P, muni d'une seconde boucle M, dans laquelle s'engage le hauban tendeur. Sur les deux anneaux sont moulées des couches de matière isolante, protégées à l'intérieur par une bague de cuivre.

Dans le cas de lignes établies avec des poteaux- consoles, suivant le système de la figure 410, on emploie des isolateurs dont les supports sont pourvus de colliers de serrage D, D₁, que l'on fixe sur le bras de la console (fig. 417). La pièce mobile de ces colliers D, présente un appendice g qui pénètre dans un logement ménagé à la

partie supérieure de l'aile H; les deux pièces sont reliées par un boulon B qui permet de fixer l'isolateur sur la console et de l'en détacher au besoin.

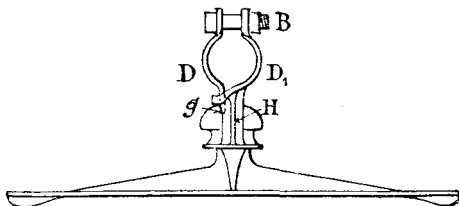


FIG. 417. — Isolateur à colliers pour console.

Pour les bifurcations sur les lignes de trolley, on utilise des pièces de bronze à trois ailes (fig. 418). Le corps de la pièce P forme une sorte de gouttière renversée, à deux oreilles O, où s'attachent les haubans d'acier, comme le montre d'ailleurs la coupe en R.

Le fil conducteur rectiligne n'est pas coupé, il s'engage et est maintenu dans la rainure de l'arête supérieure des ailes *m*, vues en dessous dans le plan. Le conducteur bifurqué se soude également sur l'aile oblique *n* et pénètre

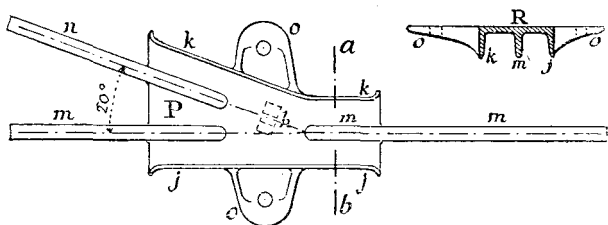


FIG. 418. — Pièce d'aiguillage sur ligne de trolley.

dans l'œillet *h*, où il est maintenu par un retour du fil. Lorsque la voiture entraînant la perche du trolley s'est engagée sur la voie de bifurcation, la roulette quitte le conducteur rectiligne et, guidée par la partie oblique de la

joue K qui l'empêche de s'échapper, s'engage sur le bord de l'aile *n*, pour suivre le nouveau conducteur.

Les croisements de lignes sont pourvus d'appareils analogues à quatre ailes croisées.

Les frotteurs à archet permettent de se passer de ces accessoires. Le moyen le plus simple et en même temps le plus sûr pour éviter le déraillement du trolley, est d'établir sur tout le parcours, deux fils maintenus à 20 centimètres d'écartement sur la voie unique et s'écartant au droit des voies de garage.

Les divers tronçons des fils de ligne sont reliés par des appareils de jonction, qui sont disposés pour assurer la continuité du circuit électrique, tout en permettant le sectionnement facile et automatique, par l'intermédiaire de coupe-circuits fusibles.

La figure 419 représente un de ces appareils, formé de deux ailes en bronze *mm*, portant chacune des bras

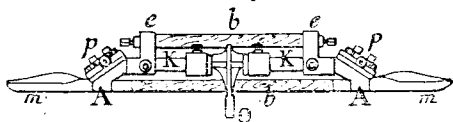


FIG. 419. — Appareil de jonction entre deux sections.

d'équerre *e* pourvus d'un axe isolé K qui présente deux oreilles *o* où s'attachent les haubans tendeurs. Les deux pièces en bronze A sont reliées et maintenues d'une manière rigide par deux lames de bois *b*. La liaison conductrice, entre elles, se fait au moyen de fils engagés dans les paliers *p* et qui vont s'attacher d'autre part aux bornes d'une boîte vissée sur le poteau voisin et contenant le coupe-circuit fusible. Dans le cas où le fil de travail vient à se briser et tombe sur le sol, il se produit un court-circuit et les fils de sûreté fondent, produisant la coupure automatique de la ligne.

Il faut aussi prendre des dispositions pour éviter le contact accidentel des lignes télégraphiques et téléphoniques, qui pourraient tomber sur les fils de travail et mettre

ainsi les appareils en relation avec des potentiels de 5 à 600 volts, qui occasionneraient fatalement leur destruction.

L'un des systèmes de protection consiste à disposer, au-dessus des fils aériens, au droit des lignes téléphoniques ou télégraphiques, des filets ou fils de garde formés de fils de fer tendus par des haubans isolés.

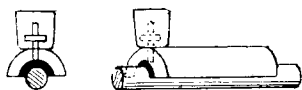


FIG. 420. — Garniture isolante de protection.

On établit aussi une garniture isolante sur le fil de travail, comme il est indiqué dans la figure 420 ; des vis placées aux extrémités,

pour empêcher le fil téléphonique en contact de glisser en dehors de la zone isolée, sont également noyées dans une masse isolante.

Enfin, il faut avoir soin de placer, en divers points de la ligne, des parafoudres, afin d'obvier aux décharges d'électricité atmosphérique.

SUPPORTS DIVERS. — Les poteaux peuvent être en bois, en treillis de fer ou en tubes d'acier.

Les poteaux d'acier, sont formés de deux ou trois tubes cylindriques, dont les diamètres vont en diminuant de la base au sommet et ajustés les uns au-dessus des autres, à la manière des tubes télescopiques. Pour fixer ces tubes d'une manière invariable l'un dans l'autre, on se sert de bagues en fer entrées à force dans le vide annulaire laissé libre entre les deux tubes engagés l'un dans l'autre.

Le tube inférieur est scellé dans un massif de béton de 2 mètres de profondeur environ et pourvu souvent d'un socle décoratif à la base.

Les bras des poteaux-console sont généralement constitués par des tubes de fer, reliés à l'aide de frettes à la colonne. Le type représenté par la figure 421, employé sur la ligne de tramway de Buda-Pesth, se recommande par sa grande simplicité de construction. Le corps de la console est formé d'un tube de fer deux fois recourbé en I et en O : l'extrémité K est articulée sur une bague en fonte

fixée au poteau. Ce tube est maintenu par un tirant fixé, d'une part, à la bague I du tube, d'autre part au chapeau D de la colonne; ce tirant est en deux parties qui sont reliées par un écran tendeur F.

La partie recourbée de la console porte à son extrémité une douille O, munie d'un boulon fileté à écrou e, avec un œillet h; le haut-

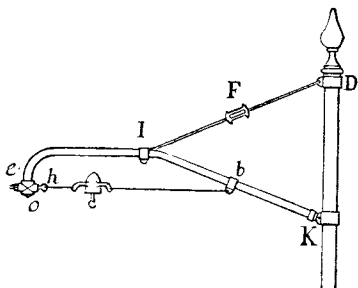


FIG. 421. — Console à suspension élastique.

ban de suspension de l'isolateur est tendu à l'aide du boulon à écrou, entre l'extrémité h de ce boulon, où il est attaché, et la bague b; on réalise ainsi une suspension élastique qui amortit les chocs produits par le passage du trolley.

ECLISSAGE ÉLECTRIQUE. — Il ne suffit pas de relier le pôle négatif de l'usine génératrice aux rails, pour assurer le retour du courant par la voie ferrée. Les tronçons de rails sont en effet reliés bout à bout par des éclisses en fonte maintenues par des boulons; or, le contact ainsi constitué peut être défectueux au point de vue de la conductibilité, soit par suite du défaut de serrage des boulons, soit à cause de l'oxydation des surfaces.

Il faut donc assurer la continuité du circuit conducteur par des liaisons directes entre les rails, au moyen de fils ou de rubans de cuivre. Cette précaution est encore commandée par le souci de prévenir les actions électrolytiques que produisent les courants vagabonds, comme on les appelle quelquefois, qui se dérivent dans le sol, notamment dans le voisinage des éclissages à contact défectueux, et viennent attaquer les conduites d'eau ou de gaz, placées à proximité, dans le sol.

Plusieurs dispositions sont employées pour fixer les conducteurs de cuivre aux rails. La figure 422 montre

l'éclissage employé par la Boston [C^o]; les deux rails à patin P, étant maintenus par l'éclisse *f*, les extrémités recourbées du conducteur de cuivre C sont engagées dans des trous de plus grand diamètre ménagés dans l'âme des rails; le serrage s'effectue alors à l'aide de bouchons coniques *b*.

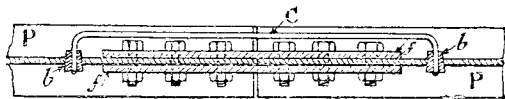


FIG. 422. — Eclissage électrique à bague conique.

ques *b*, que l'on chasse à force dans l'espace annulaire resté libre, entre le conducteur et le métal du rail.

Dans le système Thomson-Houston, dit rail Bond-Chicago (fig. 423), les extrémités du conducteur présentent un renflement K percé suivant son axe; on met d'abord en place cette sorte de douille et l'on chasse à l'intérieur une goupille conique en acier, qui refoule le cuivre et assure la ténacité du joint.

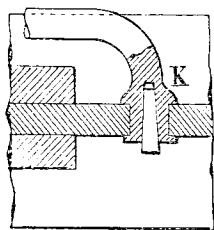


FIG. 423. — Eclissage Bond-Chicago.

Les résistances du cuivre et de l'acier des rails étant dans le rapport de 1 à 8, il suffira, pour que les joints ne donnent lieu à aucune résistance supplémentaire, que la section du conducteur soit le huitième de celle du rail.

Quand le réseau a une grande étendue et que le courant débité est trop considérable pour pouvoir s'écouler aisément par les rails, on place tout le long de la voie, un conducteur en cuivre nu, relié de distance en distance aux rails par des connexions transversales et mis en communication avec les feeders de retour.

237. Perturbations occasionnées par les courants de retour. — Le courant de retour ne peut revenir à l'usine qu'en vertu d'une certaine différence de potentiel entre les divers tronçons des rails constituant la voie; cette différence est

évidemment maximum entre les extrémités de la ligne.

Supposons qu'entre les points *b* et *d* du rail R (fig. 424), il y ait une différence de tension de 10 volts, par exemple, et qu'une conduite en fonte C soit placée dans le voisinage; le courant pourra quitter le rail en *b*, pour atteindre la conduite, la parcourir sans perte de tension sensible, puis retourner au rail en *d*, si le point correspondant de la conduite est à un potentiel plus élevé que cette région du rail.

Mais ce courant traversant deux fois le sol entre le rail et la conduite, est dans les conditions voulues pour décomposer l'eau par électrolyse; de sorte que le métal se trouve attaqué aux points où le courant quitte l'un des circuits conducteurs en présence, rail ou conduite, qui joue le rôle de l'anode dans une cuve électrolytique.

Ces phénomènes ont occasionné, dans certains cas et notamment en Amérique, de graves corrosions ayant amené la destruction complète de conduites d'eau ou de gaz.

Si l'on considère que la décomposition de l'eau dans un voltamètre, exige une tension au moins égale à la force contre-électro-motrice de polarisation, qui est de 2 volts, le courant traversant deux fois la masse électrolytique du sol entre le rail et la conduite, doit avoir une force électro-motrice de 4 volts, augmentée de la chute de tension due à la résistance du circuit dérivé, soit 1 volt, pour un courant très faible. De là cette règle, d'après laquelle la différence de tension entre la section des rails la plus éloignée de la station et celle la plus voisine, ne doit pas dépasser 5 volts.

Mais en réalité, la force électro-motrice de polarisation, dans le cas qui nous occupe, est bien inférieure à 2 volts.

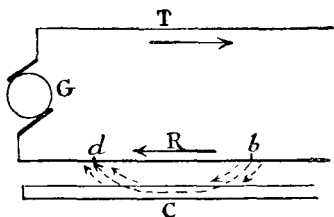


Fig. 424. — Dérivations à la terre.

On peut admettre que le fer commence à être attaqué, dès que son potentiel par rapport au rail placé dans le voisinage dépasse 0,10 volt ; il en est de même pour le plomb. Quant à la fonte, elle pourrait supporter, sans attaque sensible, un excédent de tension de 0^v,30 sur le potentiel de la voie de retour.

Divers procédés ont été préconisés pour prévenir les actions électrolytiques. On a conseillé, en premier lieu, de relier le pôle négatif de l'usine aux rails et aux conduites voisines. Dans ces conditions, la tension des conduites étant égale à la tension minimum ne saurait être supérieure, en aucun point, à celle de la voie ferrée ; le courant ne quitterait plus la conduite pour revenir au rail, mais retournerait directement à la dynamo. Les dangers d'attaque électrolytique disparaîtraient ainsi, puisqu'ils n'existent qu'aux points où le courant quitte la masse métallique. Mais par suite de la suppression même du retour au rail, la force contre-électro-motrice de polarisation est réduite de moitié, et les courants faisant retour par les conduites demeurent plus intenses et augmentent la corrosion des tuyaux au passage des joints.

Le système le plus pratique consiste à relier les diverses sections du fil de travail et des rails, à des feeders d'aller et de retour, en nombre suffisant pour réduire comme il convient la chute de tension, dans l'intervalle compris entre les points de raccordement des feeders au circuit. Dans ces conditions, si l'on a eu soin de donner la même résistance à tous les feeders de retour, on peut admettre que le courant se répartira également entre ces divers feeders et que la différence de tension entre l'usine et les extrémités de ces feeders sera la même pour chacun d'eux. Il n'y aura donc pas de différence de potentiel notable et, par conséquent, d'échange de courants entre les diverses parties de la voie.

Ce procédé est très onéreux dans le cas de lignes étendues, puisqu'il exige l'emploi de feeders présentant des sections d'autant plus fortes que les distances sont plus grandes. Pour pallier cet inconvénient, M. Brown a ima-

giné d'intercaler sur les feeders de retour les plus longs, à leur arrivée à l'usine, de petites dynamos en série sur les dynamos principales, de manière à soutirer pour ainsi dire l'électricité des feeders et à abaisser leur potentiel. On peut ainsi réduire le diamètre des feeders les plus longs, sans augmenter la chute de tension sur leur parcours et maintenir la tension égale aux diverses sections des rails dans des conditions moins onéreuses.

On peut également utiliser le système de distribution à trois fils employé pour l'éclairage électrique. Deux dynamos de 550 volts en série (fig. 425), ont leurs pôles

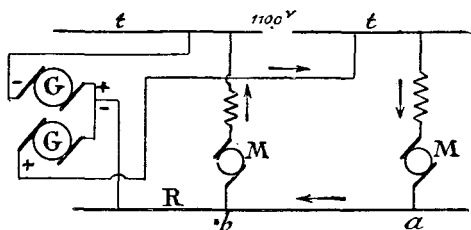


FIG. 425. — Distribution à trois conducteurs.

extrêmes reliés aux deux fils de travail t et leur pôle commun est mis en connexion avec le rail R . La voie remplit le rôle de fil neutre et n'est parcourue d'un bout à l'autre que par la différence des courants traversant les deux fils aériens.

Les électro-moteurs des voitures M sont deux à deux en série sur les divers tronçons des conducteurs de travail et soumis à une tension totale de 1100 volts : les courants de retour n'empruntent le rail que sur le parcours tel que $a b$, correspondant aux sections de fil aérien alimentant les voitures considérées. Dans ces conditions, il ne peut exister de différence de potentiel notable entre les diverses parties de la voie.

L'inconvénient résulte de l'élévation de tension à 1000 et 1100 volts et de la difficulté qui s'ensuit d'isoler les

sections positives des sections négatives, surtout au croisement des fils aériens.

Enfin, les courants alternatifs, biphasés ou triphasés, distribués directement ou après transformation de tension sur les lignes de travail, constituent le procédé le plus efficace, puisque ces courants ne peuvent donner lieu à des effets électrolytiques appréciables.

PERTURBATIONS SUR LES LIGNES TÉLÉPHONIQUES.— Les courants alternatifs traversant les fils de travail, influencent par induction les lignes téléphoniques aériennes tendues parallèlement sur le parcours des tramways, quand le circuit de ces lignes est à simple fil, avec retour par la terre.

Les courants continus occasionnent des perturbations analogues. On remarquera en effet que les courants qui traversent les lignes de travail ont des intensités très variables, résultant des arrêts et mises en marche successifs, ainsi que des efforts très différents développés par les divers moteurs soit en rampe, pente ou palier. Mais c'est surtout le passage des frotteurs, notamment aux points de suspension et de croisement, qui détermine des variations ondulatoires du courant, susceptibles de produire l'induction perturbatrice.

Les perturbations peuvent aussi être dues aux fuites de courants qui se produisent à chaque étincelle d'interruption et à l'augmentation brusque de différence de potentiel aux contacts de la terre des fils téléphoniques, dans le voisinage des lignes de tramways.

Le moyen le plus efficace pour prévenir ces effets consiste à doubler le fil unique de chaque ligne téléphonique, de manière à supprimer toute communication avec la terre, en formant un circuit métallique complet. Il n'est pas même nécessaire de doubler chaque ligne; il suffit pratiquement de relier toutes les lignes à un fil de retour commun, et l'on peut même, sans inconvénient notable, mettre ce fil de retour à la terre au poste central. Une seule terre en effet ne peut occasionner de trouble; elle devient nuisible toutefois quand il se produit une seconde terre accidentelle sur la ligne, car alors la portion de ligne

comprise entre les deux terres se trouve supprimée pour l'anti-induction.

238. Conducteurs souterrains. — Tous les inconvénients signalés plus haut pourraient être évités par une double ligne aérienne comprenant fil d'aller et de retour, sans emprunter les rails. Mais cette disposition, outre qu'elle est plus coûteuse comme installation de ligne, présente l'inconvénient d'exiger deux trolleyes et d'augmenter ainsi les chances de déraillement sur les fils de travail, tout en rendant plus difficile la construction de la ligne, au point de vue de l'isolement des deux conducteurs, principalement aux sections de croisement.

On a donc cherché, au contraire, la solution du problème dans la suppression des fils aériens et leur remplacement par des conducteurs placés sous la chaussée, dans des caniveaux souterrains.

La difficulté réside dans la disposition nécessaire pour donner accès au frotteur à l'intérieur du caniveau et le mettre en contact avec les conducteurs, sans que ceux-ci soient atteints par l'eau de pluie, les boues et débris de toute sorte qui compromettraient l'isolement de la ligne.

CANIVEAU SOUTERRAIN DE BUDAPEST. — L'une des premières installations souterraines a été faite à Budapest par MM. Siemens et Halske (fig 426). Le caniveau qui contient les conducteurs électriques est constitué par un canal en béton, renforcé de distance en distance au moyen de cadres en fonte D de forme ovoïde, qui servent aussi de gabarit pendant la construction.

L'un des couples de rails de la voie roulante s'appuie sur les cadres de fonte et forme la rainure qui donne accès à l'appareil de prise de courant. Ces rails sont solidement boulonnés sur les cadres au moyen d'équerres *e* en acier fondu. Les premiers conducteurs en fer cornière *f* étaient soutenus par des isolateurs horizontaux en porcelaine, engagés dans des logements ménagés dans la fonte même du cadre. Cette disposition avait l'inconvénient de retenir les boues tombées accidentellement sur les isolateurs; elle

a été ultérieurement remplacée par l'emploi de conducteurs en fer à T, soutenus par des supports verticaux isolés, fixés sous l'un des rails. Chacun de ces isolateurs est placé sous un regard en fonte qui permet de visiter aisément et réparer au besoin les supports des conducteurs.

Des dispositions sont prises pour éviter que l'eau puisse séjourner et s'accumuler dans le caniveau: à cet effet, le canal présente une légère pente et se trouve mis au point bas, en communication avec les égouts de la ville, par un tuyau d'évacuation. Il importe d'ailleurs de

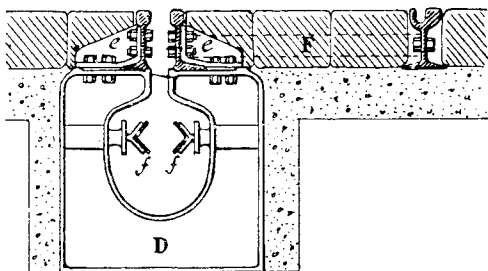


FIG. 426. — Conducteurs en caniveau de Budapest.

nettoyer le caniveau de temps en temps, en y faisant passer un hérisson qui ramène les boues dans des chambres d'où l'on peut les retirer aisément.

Il convient que, même sous les lourdes charges qui circulent dans les rues, et sous la poussée des revêtements de la chaussée, les rails des ornières restent indéformables, que les bords ne se rapprochent pas pour rétrécir la rainure et ne présentent pas des ondulations irrégulières. C'est pourquoi, les fers sont assez rigides pour résister à la flexion latérale; en outre, l'écartement de deux files de rails est maintenu d'une manière invariable par des entretoises en fer plat F, posées de champ et boulonnées sur les joues intérieures.

Le système de caniveau de Washington (fig. 427) ne diffère essentiellement du précédent, qu'en ce que la rai-

nure est formée par des fers spéciaux du type Zorès, C, et placée entre les deux files de rails D; toute l'assiette de la voie est d'ailleurs établie sur des chaises en fonte B assez larges pour supporter les rails de la voie roulante. Ce système vaut celui de Budapest, mais présente l'inconvénient de trois ornières pour chaque voie, au lieu de deux.

Ces divers systèmes comportent un conducteur d'aller et un conducteur de retour, afin d'éviter l'emploi des rails qui occasionnent les perturbations étudiées précédemment.

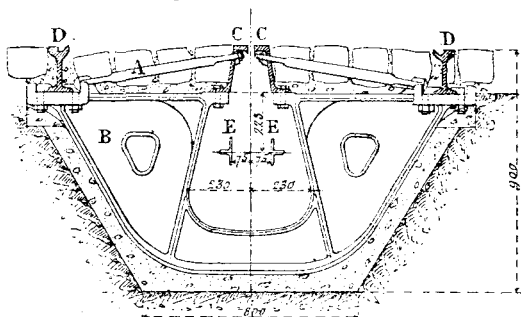


FIG. 427. — Caniveau de Washington.

On peut toutefois combiner simultanément le conducteur souterrain unique avec le retour par rails; tel est le système de Hurde, mais on perd alors le bénéfice le plus important du caniveau, relatif à la suppression des effets d'électrolyse.

GRAND CANIVEAU. — Pour obvier aux difficultés de nettoyage et d'entretien que présentent les *petits caniveaux*, on a préconisé l'emploi du *grand caniveau* qui serait de dimensions telles qu'un homme pourrait y circuler aisément dans un charriot, pour procéder sans difficulté aux réparations nécessaires, même durant l'exploitation.

Le caniveau visitable est une véritable galerie de forme elliptique, de 1^m70 de haut sur 1^m40 de large à la partie supérieure (fig. 428). Des poutrelles transversales *p* sou-

tiennent des voûtes en briques *b* s'appuyant sur leur aile inférieure. Sur ces mêmes appuis sont rivées les pièces d'acier découpées *a* qui forment les caniveaux proprement dits.

Dans l'évidement des plaques, passent les conducteurs *c* en fer à U, reliés par des fils souples aux feeders *F*. Les conducteurs de travail sont portés par des isolateurs fixés aux poutrelles par de petites consoles de fonte. Le cani-

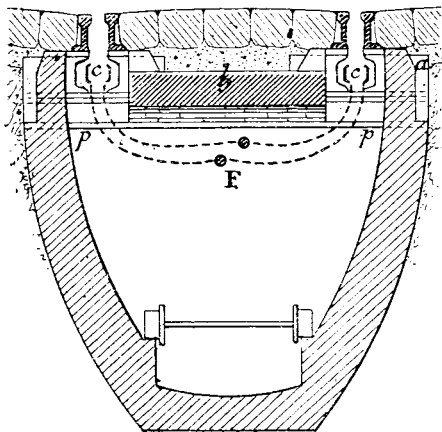


FIG. 428. — Grand caniveau visitable.

veau pour double voie présente deux ornières qui constituent, en même temps, les rails intérieurs de deux voies roulantes.

On a disposé à la base du caniveau, un rebord muni de fers cornières qui forme une voie de circulation pour un wagonnet, mu par l'électricité, en vue de transporter les ouvriers rapidement, sur les points exigeant des réparations toujours urgentes.

Ce système qui paraît être plus coûteux que tout autre présente aussi de sérieuses difficultés de construction dans l'intérieur des villes, par suite de la présence des égouts et

des multiples canalisations d'eau, de gaz et même d'électricité qui encombrent le sous-sol des voies publiques.

239. **Conducteurs sectionnés, à contacts superficiels.** — Les conducteurs aériens, qui correspondent d'ailleurs à l'exploitation la plus économique, présentent de grands inconvénients et des dangers : l'induction sur les lignes téléphoniques ; l'encombrement des trottoirs par les supports et l'enlaidissement de l'aspect des voies publiques ; les accidents de personnes ou de chevaux dans le cas de chute accidentelle d'un fil de trolley sur le sol ; les causes d'incendie des postes télégraphiques et téléphoniques, ensuite d'un contact fortuit entre les divers lignes.

Les caniveaux souterrains, d'autre part, ont pour principal inconvénient de coûter généralement plus cher que les lignes aériennes ; ils donnent lieu à des frais d'entretien et de nettoyage assez onéreux et occasionnent souvent des courts-circuits qui arrêtent ou gênent l'exploitation.

On a donc songé à établir des conducteurs superficiels alimentés par des distributeurs, soit du système électromagnétique, soit du système purement électrique.

La condition principale à remplir est que les contacts au niveau du sol ne soient électrisés, c'est-à-dire mis en communication avec les câbles électriques de transport, qu'au moment même où le frotteur placé sous la voiture et la voiture elle-même, par conséquent, les recouvrent ; dès que celle-ci est passée, les contacts abandonnés doivent être séparés automatiquement de la source d'électricité. S'il n'en était pas ainsi, en effet, le public et les animaux circulant sur la chaussée seraient exposés à recevoir des chocs électriques qui, pour les chevaux notamment, ont occasionné plusieurs fois le foudroiement ou des accidents graves.

Nous décrirons trois des principaux systèmes employés : Westinghouse, Claret-Vuilleumier et Diatto.

SYSTÈME ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE WESTINGHOUSE. — Ce système comporte des contacts établis par couples disposés transversalement sur l'axe de la voie. La figure 429 rend compte du procédé d'alimentation employé. L'équipe-

ment de la voiture comprend une batterie d'accumulateurs A de six éléments, montée en parallèle avec l'électromoteur M ; les extrémités libres du circuit intérieur aboutissent aux frotteurs F_1 et F_2 actuellement en contact avec les plots superficiels P_1 , P_2 .

Chacun des couples de plots est commandé par un électro-aimant E , pourvu d'un enroulement à fil fin et d'un enroulement à gros fil. Le premier est relié au plot P_1 , qui, en réalité, n'est pas en avant de P_2 comme l'in-

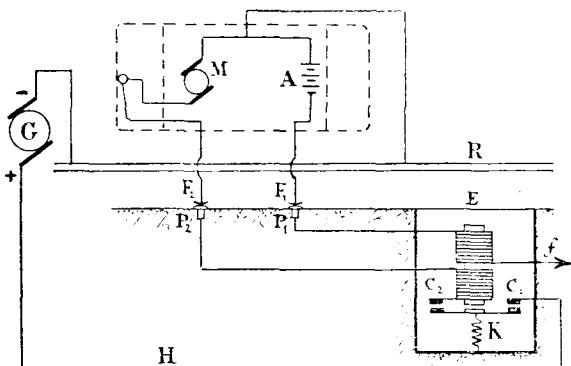


FIG. 429. — Distribution du système Westinghouse.

dique la figure pour plus de clarté, mais sur le même alignement transversal que lui ; l'autre extrémité libre de la bobine est mise à la terre.

L'enroulement à gros fil est connecté avec le plot P_2 et est terminé à l'extrémité libre par un contact fixe C_2 . Un second contact fixe C_1 en dérivation sur le conducteur d'alimentation positif H , est dans une position symétrique de C_2 . Une armature K , pourvue d'un ressort antagoniste, porte également deux contacts correspondant aux contacts fixes précités.

Les frotteurs étant en relation avec les deux plots superficiels, le circuit des accumulateurs et de la bobine à fil fin se ferme par la terre, l'armature est aussitôt

attirée et le circuit de l'électro-moteur se trouve fermé par le rapprochement des contacts; en outre le courant traversant la bobine à gros fil renforce l'attraction de l'électro et assure la bonne communication des contacts.

Dès que la voiture avançant a quitté les plots P_1 et P_2 , l'électro n'étant plus excité, l'armature se dégage sous l'action du ressort antagoniste et les communications sont rompues.

Le distributeur (fig. 430) est placé sous le trottoir ou sous la chaussée; il est renfermé dans une boîte en fonte E, munie d'un couvercle C garni de bitume ou de pavés en bois. Il est protégé contre l'accès des eaux par une cloche K qui repose sur une cuvette inférieure D remplie d'huile, formant joint hydraulique. L'électro-aimant est établi sur un

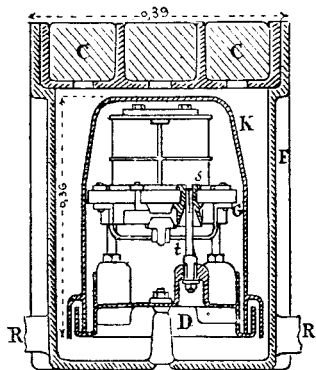


FIG. 430. — Appareil distributeur Westinghouse.

plateau G, supporté par la partie supérieure de la cloche. Les conducteurs reliant l'appareil aux touches superficielles et au conducteur de l'usine pénètrent dans la boîte et sous la cloche par des tubulures R établies à la partie inférieure; ils viennent aboutir à des tiges isolées t , fendues et formant ressort à la partie supérieure, qui viennent s'introduire à frottement dans les douilles s en relation avec les extrémités des bobines. Cette disposition permet de changer très aisément l'électro-aimant au besoin, les connexions se rétablissant d'elles-mêmes quand on remplace la cloche sur son socle.

Les plots de contact superficiels sont simplement des boutons en acier, vissés sur des boulons en fer soudés à l'extrémité des conducteurs venant du distributeur. L'ensemble est noyé dans un bloc isolant et résistant qui ne

laisse déborder le bouton que de 1 centimètre à la surface du sol.

Ce bloc est d'ailleurs maintenu et protégé dans une boîte en fonte pourvue d'une tubulure d'entrée du conducteur.

Le reproche le plus important que l'on puisse adresser à ce système, c'est le nombre considérable de distributeurs électro-magnétiques qu'il met en œuvre; il en faudrait 5000 pour une ligne à double voie de 10 kilomètres, à raison d'un appareil par couple de boutons sur chaque voie, tous les 4 mètres.

SYSTÈME À DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE CLARET-VUILLEUMIER.
— Le nombre des distributeurs est notablement réduit dans ce procédé, chacun d'eux commandant une série de vingt contacts superficiels distribués de 2^m50 en 2^m50

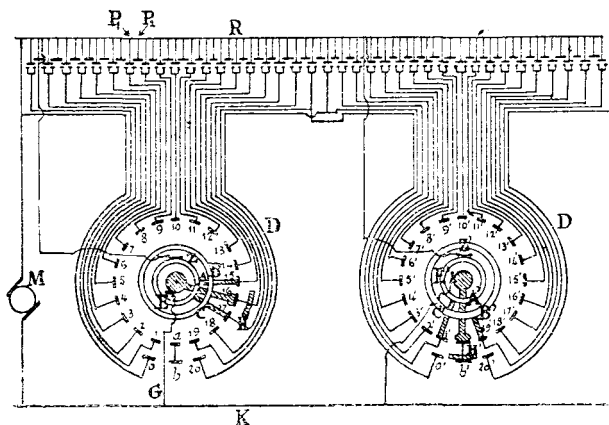


FIG. 31. — Distribution Claret-Vuilleumier.

sur l'axe de la voie; mais en revanche, ces appareils sont plus complexes que les précédents.

Le distributeur figure 431, consiste en un commutateur circulaire dont les touches sont reliées respectivement aux contacts superficiels qui sont ici constitués par

des pavés en fonte rectangulaires, groupés deux par deux, de telle sorte que chaque groupe correspond à une touche du distributeur.

Trois couronnes concentriques, reliées mécaniquement, mais isolées l'une de l'autre, portent trois frotteurs A B C. Le premier est maintenu constamment en communication avec le câble principal K et les deux autres sont réunis au rail R, qui forme le conducteur de retour, par l'intermédiaire de l'appareil qui produit le mouvement de rotation du système (fig. 431).

Le jeu des touches du distributeur est complété par trois contacts *a*, *b*, *20*, placés concentriquement en dehors du premier cercle et sur lesquels vient passer le frotteur supplémentaire H, qui fait partie intégrante de l'organe mobile du distributeur.

Dans la situation représentée sur le schéma, le curseur de prise de courant de la voiture P, étant sur le couple de pavés n° 16 et le frotteur A étant supposé placé sur la touche correspondante du distributeur, le courant venant de K passe par ce frotteur, la touche 16, le conducteur aboutissant au couple en contact, l'électro-moteur et le rail de retour.

Un moment après, le curseur de la voiture vient dans la position où il atteint le premier pavé du groupe suivant n° 17; ce contact et le frotteur C auquel il se trouve relié sont ainsi mis en communication avec le câble principal K par le circuit G A R C, et puisque le frotteur C est en communication avec le rail, ainsi que nous l'avons dit plus haut, un courant dérivé s'établit sur le circuit précité.

Ce courant, comme nous le verrons tout à l'heure, fait avancer d'un cran le système des frotteurs qui se déplacent d'un seul bloc, en même temps. Le frotteur A se porte sur la touche 17 et alimente la voiture arrivée sur le groupe de pavés correspondant; le curseur de prise de courant envoie ensuite une dérivation sur le contact 18 et le distributeur tourne d'un second cran et ainsi de suite.

Lorsque le frotteur A est arrivé sur le plot neutre *a*, qui est d'ailleurs en connexion conductrice avec *b*, le frotteur

Il couvre b et 20 , mettant ainsi en communication avec le câble principal, le couple de contacts ($20-1'$) qui est lui-même relié à la touche $1'$ du distributeur suivant D' ; un courant dérivé est ainsi lancé dans ce distributeur dont la partie mobile tournant d'un cran porte le frotteur A' sur la touche $1'$, de telle sorte que le distributeur D étant maintenant au repos, le distributeur D' recommence un cycle analogue et maintient à son tour le mouvement continu de la voiture.

La figure 432 représente le distributeur. On voit que le courant dérivé par la touche 17 suit le trajet $Cp_1X_1L_1ZR$; il excite en passant l'électro-aimant L_1 qui attire

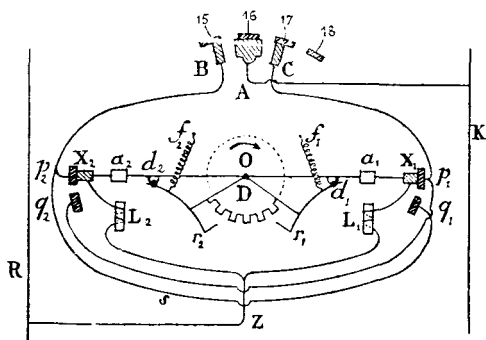


FIG. 432. — Appareil moteur du distributeur.

l'armature a_1 d'un levier $X_1 X_2$ monté fou sur l'axe o de rotation de la partie mobile du distributeur; sur ce même axe est calée une roue dentée D . Le levier porte en outre deux cliquets r_1 et r_2 articulés en d_1 et d_2 et soutenus par des ressorts antagonistes f_1 et f_2 ; enfin il se termine par deux frotteurs X_1 et X_2 reliés invariablement aux électros L_1 et L_2 .

Lorsque l'armature a_1 est attirée, le cliquet r_1 vient en prise avec une dent de la roue D et lui imprime un mouvement de rotation; mais avant que le frotteur A se soit placé sur la touche 17 , la manette C aura quitté cette

touche, en même temps que la manette B sera venue en contact avec la touche 16; à ce moment, le frotteur X_1 s'est mis en relation avec le plot q_1 et reçoit le courant du balais B qui, ayant atteint 16 avant que le large frotteur A l'ait quitté, reçoit le courant de A par l'intermédiaire de cette touche et le conduit à L_1 par p_2 & q_1 ; l'attraction et le mouvement de bascule du levier $X_1 X_2$ sont ainsi continués jusqu'à ce que le frotteur A soit arrivé au milieu de la touche 17.

Pour la marche arrière, c'est le frotteur B qui agit en premier lieu de la même façon que le frotteur C, sur l'électro-aimant L_2 ; le cliquet r_2 entre alors en jeu et fait tourner la roue D, avec les frotteurs qui en sont solidaires, en sens inverse du mouvement précédent.

Les conducteurs qui relient les diverses touches de chaque distributeur aux contacts superficiels, sont isolés et réunis dans un tuyau en fonte qui les amène jusque dans l'entre-voie; ils se séparent ensuite du faisceau pour venir alimenter respectivement les pavés de contact correspondants.

SYSTÈME DIATTO AVEC CONTACTS A DISTRIBUTION DIRECTE.
— Dans ce système, remarquable par sa grande simplicité, chaque touche métallique se met pour ainsi dire d'elle-même en communication avec le câble de distribution; la barre d'un électro-aimant suspendu sous la voiture, passe au-dessus des plots superficiels en fer doux et ceux-ci aimantés au passage, attirent une sorte de gros clou, flottant dans le mercure, qui vient former un trait d'union conducteur entre le câble d'alimentation et la touche de contact.

La figure 433 résume les derniers perfectionnements apportés dans l'ensemble du système par M. Rodet, ingénieur de la Société de traction électrique. L'électro-aimant droit primitif a été remplacé par un système magnétique comprenant outre la barre de prise de courant B, deux autres barres de fer symétriques G. Ces trois barres sont reliées par des électro-aimants transversaux à double fer à cheval A; il se développe ainsi deux circuits magnétiques

dont les lignes de force émanant de B traverseront l'appareil inférieur et viendront se fermer par les barres G.

Cet électro, qui pèse environ 350 kilogrammes, est suspendu au-dessous de la voiture par un support vertical S et deux ressorts latéraux R que l'on règle de manière à ce que la suspension soit déchargée et que tout le poids porte sur eux. D'autres tendeurs sont disposés, dans l'axe, en avant et en arrière, pour limiter le balancement de l'élec-

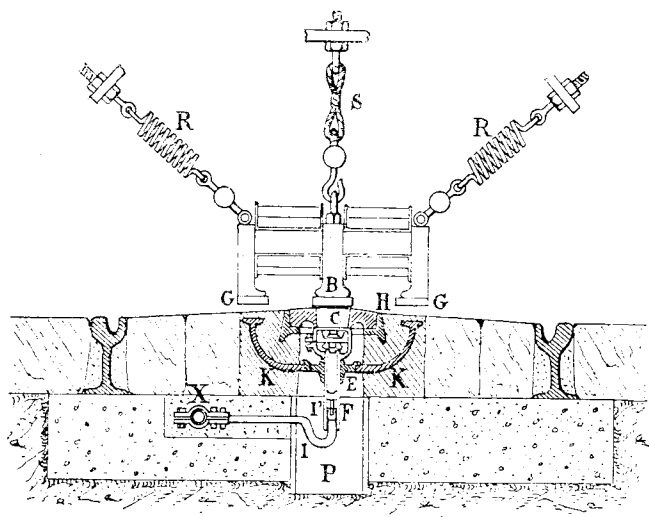


FIG. 433. — Prise de courant et contact Diatto.

tro et aider l'appareil à se soulever quand il rencontre un obstacle sur la voie.

Le système de mise en contact est placé sous la chaussée, dans une boîte M constituée par un pavé d'asphalte évidé et placé au-dessus d'un puits P, ménagé dans une couche de béton qui sert d'assise à la voie roulante. Dans la masse fondue du pavé d'asphalte est incorporée une sorte de cuvette en fonte K, pourvue de deux ailes F qui

se relèvent et vont en s'épanouissant à la partie supérieure qui affleure presque la surface du pavé.

Dans le centre découpé se pose une traverse en fonte E qui sert de support à la boîte à mercure. L'évidement du pavé d'asphalte est fermé par un couvercle de fonte dont la partie centrale contient le contact de fer C, en saillie de 20 millimètres au-dessus du sol; ce couvercle repose dans un cadre anti-magnétique qui est encastré dans la masse du pavé.

La boîte à mercure (fig. 434) est en ébonite et comprend trois parties principales démontables: le corps tubulaire N contenant le mercure où plonge le clou de fer doux; une chambre S où est logée la tête du clou recouverte d'un chapeau c en charbon pur qui vient buter, au moment de l'attraction, contre une cuvette d de même substance, dans laquelle la tête du clou s'adapte exactement: un pareil contact ne donne lieu à aucune adhérence rémanente et à aucune étincelle. Le couvercle qui porte la cuvette de charbon et une vis V, est assujéti sur la boîte au moyen de trois boulons facilement démontables.

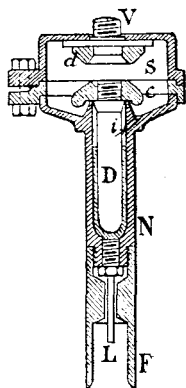


FIG. 434. — Détail du connecteur.

Le chapeau en charbon du clou D repose sur les bords en saillie du réservoir tubulaire; un orifice *i* placé dans le fond de la chambre permet au mercure qui pourrait être projeté hors du tube, à la retombée du clou, d'y rentrer afin d'éviter toute perte de ce fait.

La troisième partie est encore un tube en ébonite F qui vient se visser à la partie inférieure du tube à mercure; il donne passage à la tige de cuivre L vissée dans le bouchon métallique qui forme le fond du tube N et est en contact permanent avec le mercure.

C'est par la tige L que se fait la connexion de l'appar-

reil de prise de courant avec le conducteur d'alimentation.

A cet effet, le fil de dérivation I (fig. 433) jonctionné au feeder X, porte à l'extrémité de la partie recourbée, à l'intérieur du puits P, un petit godet à mercure I' où vient plonger l'extrémité de la tige L. Si, dans ces conditions, on suppose que l'eau ayant pénétré dans ce puits a pu atteindre le bord inférieur du tube F, celui-ci joue alors le rôle d'une cloche à air et l'eau ne peut pénétrer à l'intérieur du tube.

On voit maintenant aisément comment le flux magnétique, envoyé du pôle *nord* B de l'électro, pénètre par la pièce de contact en fer doux C, traverse le clou en l'attirant, et se divise en deux faisceaux dans la traverse E, pour se répandre de part et d'autre dans les ailettes F et se refermer par les barres de polarité sud de l'électro; le circuit est ainsi presque entièrement fermé à travers la fonte et le fer.

Des systèmes de prise de courant semblables sont établis, tous les 5 mètres, dans l'axe de la voie. La barre de prise du courant doit être plus longue que cette distance, de manière à ne pas abandonner un pavé métallique, avant d'avoir atteint le suivant.

Dès que le frotteur a quitté le pavé considéré, le clou retombe en coupant le circuit; pour éviter la production d'étincelles au contact des charbons, on a recourbé les extrémités de la barre glissante, de telle sorte que celle-ci cesse d'être en contact avec le pavé, alors qu'elle influence encore le clou, qui ne retombe qu'après la rupture du courant.

La figure 435 donne le schéma des connexions des dynamos à la barre de prise de courant et aux rails qui servent de conducteur de retour. On voit que les électro-aimants sont à double enroulement; l'un à fil fin, *a*, est en dérivation sur une petite batterie d'accumulateurs A. Au moment de la mise en marche, le circuit des accumulateurs est fermé par l'appareil de manœuvre ou *combineur*, et les bobines excitées développent assez d'aimanta-

tion pour amener l'attraction du clou, au passage de la barre d'électro.

Le second enroulement *b* est dans le circuit des dynamos et il est traversé par le même courant que celles-ci : il détermine une attraction supplémentaire qui applique

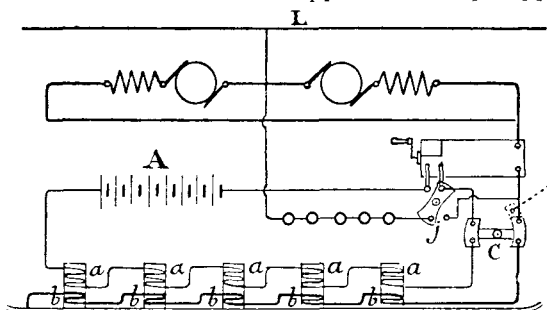


FIG. 435. — Schéma des courants et connexions de la voiture.

le clou sur son siège, d'autant plus fortement que l'intensité du courant est plus grande.

Le commutateur *C* sert à couper le circuit des électros et à connecter les dynamos au fil de trolley, dans les lignes mixtes à contacts superficiels et à conducteur aérien ; le circuit des accumulateurs est commandé par le commutateur *j* qui sert aussi à fermer le circuit des lampes *L*, dans la soirée.

Ce système a été établi, à Tours, sur une longueur de 12 kilomètres environ ; le succès obtenu dans cette exploitation a décidé l'application du système Diatto sur diverses lignes de tramways rétrocédées par la ville de Paris.

240. **Divers systèmes de frotteurs de prise de courant.** — Les systèmes précédents sont *non autonomes*, c'est-à-dire qu'ils sont tous tributaires d'une usine génératrice avec laquelle ils sont mis en communication par des canalisations métalliques : ils comportent donc des appareils de prise de courant que nous allons passer rapidement en revue.

A l'origine on employa comme organe de prise de cou-

rant un curseur en forme de navette glissant à l'intérieur d'un conducteur tubulaire aérien, lequel présentait à la partie inférieure une fente étroite qui laissait passage à la pièce d'entraînement de la navette. La ligne des tramways de Vevey-Montreux, en Suisse, et celle de Clermont-Ferrand ont été établies d'après ce système.

L'appareil le plus employé aujourd'hui est le *trolley* ou collecteur à roulette. La figure 436 montre la disposition adoptée par la Société Thomson-Houston.

La roulette *r* est montée entre les branches d'une four-

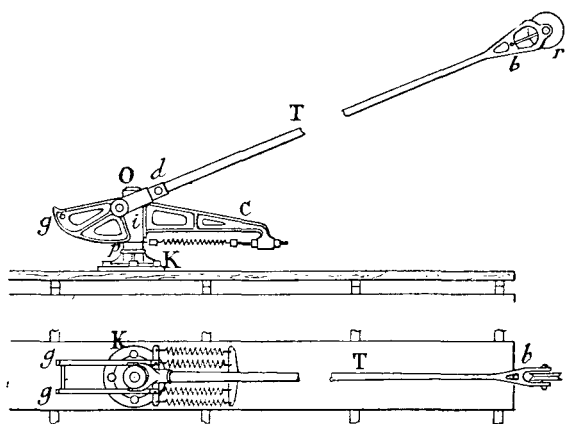


FIG. 436.—Prise de courant à roulette de trolley.

che qui termine la perche en bois ou en acier *T* : celle-ci est fixée dans une douille *d* qui peut osciller avec elle dans un plan vertical, autour de l'axe *O* porté par un manchon *i* qui est enfilé sur l'axe vertical du support *K*.

Ce même manchon porte une console *C* dont l'extrémité sert de point d'attache fixe à des ressorts qui viennent se tendre d'autre part sur des secteurs *g*, calés sur l'axe *O* de rotation de la perche. Par suite des dispositions indiquées, les ressorts tendent à appliquer constamment la roulette contre le fil de travail, avec une force qui reste à peu près

constante, quelle que soit l'inclinaison de la perche, par suite du profil elliptique du secteur g , qui fait varier son bras de levier de op à og .

En outre, tout le système peut effectuer une révolution complète autour de l'axe vertical i , pour changer le trolley de place, aux terminus. Ce mouvement permet également au trolley de suivre les courbes et toutes ondulations de la ligne. Il est toutefois nécessaire que le fil de travail soit maintenu à peu près exactement dans l'axe de la voie, car la roulette venant à se placer trop brusquement sur ce fil, déraillerait facilement.

Ce défaut de souplesse inhérent à ce système de trolley nécessite l'emploi de nombreux supports et d'une véritable toile d'araignée de haubans, dans les parties en courbe ; une pareille sujétion n'existe pas pour les autres systèmes tels que le trolley Dickinson et le frotteur à archet.

Dans le trolley Dickinson (fig. 437), l'axe de rotation de la roulette est monté sur un arbre C dont l'extrémité inférieure P forme tourillon à l'intérieur de la branche K du levier à sonnette DL , pivoté en D ; la roue peut donc s'incliner en tournant autour de l'axe de la perche.

Le bras du trolley peut également se déplacer dans le plan vertical, par le moyen du basculateur DL précité et dans le plan horizontal, par l'axe B pivotant dans la douille A .

Cette disposition permet non seulement de ne pas faire suivre exactement à la ligne les circonvolutions de la voie, mais même d'établir le fil de trolley complètement en dehors et même à quelques mètres de distance des rails de roulement. Ainsi la voie étant sur la chaussée, le fil pourra être tendu sur des poteaux à consoles, placés sur

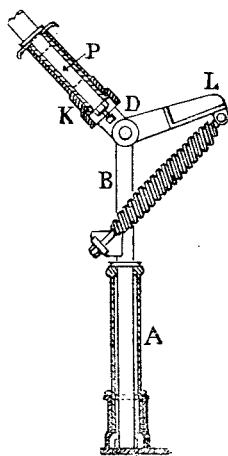


FIG. 437. — Support du trolley Dickinson.

l'alignement des arbres des promenades latérales et se trouver ainsi presque dissimulé par les plantations.

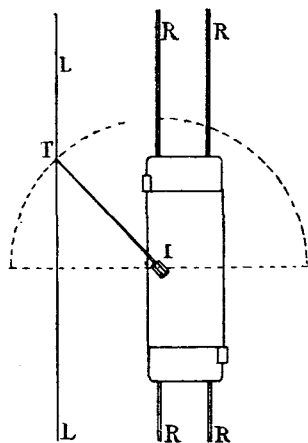


FIG. 438. — Pivote ment du trolley Dickinson.

La figure 438, rend compte de la disposition de l'appareil, établi sur l'impériale, au bord de la voiture, et pouvant maintenir sa roulette en contact avec le fil, sur tous les points de son arc de pivotement de 180° .

La prise de courant à *archet* préconisée par la maison Siemens et Halske (fig. 439) consiste en un cadre métallique M N, dont la partie supérieure légèrement courbe est encastrée dans les flasques d'une gouttière en aluminium, *a b*,

que l'on remplit de graisse consistante pour réduire l'usure de frottement. Ce frotteur, ayant une largeur de

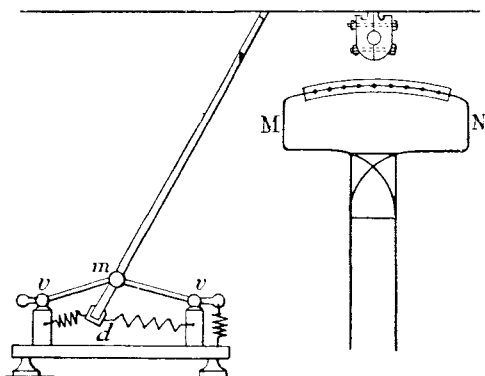


FIG. 439. — Prise de courant à archet.

1 mètre 50 centimètres environ, permet un déplacement

du fil de trolley, de 75 centimètres de chaque côté de l'axe de la voie. Le système a donc l'avantage de réduire haubans et supports dans les passages en courbe où le fil de trolley peut être tendu suivant les côtés rectilignes d'un polygone inscrit dans l'axe de la voie.

La figure de gauche montre le système de suspension articulé de la perche de trolley. L'extrémité de la tige porte une pièce d'articulation *d*, attaquée par deux ressorts antagonistes. Dans la position indiquée, la voiture circulant de droite à gauche, le ressort à droite est tendu et l'autre comprimé. Si l'on fait marcher la voiture en sens inverse, l'archet se coince sous le fil de travail, l'articulation *d* s'abaisse et quand la

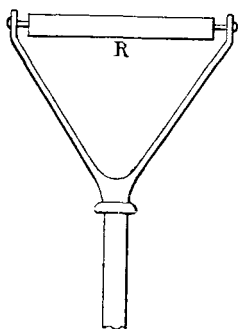


FIG. 440. — Trolley à rouleau de Walker.

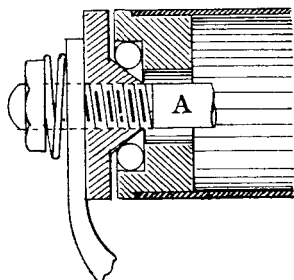


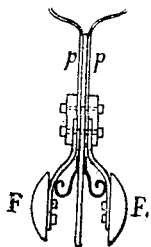
FIG. 441. — Détail du montage du rouleau.

tige a dépassé la position verticale, elle s'incline en sens inverse et les ressorts maintiennent de nouveau la roulette contre le fil. Le petit ressort vertical agissant sur les bielles articulées *u m v*, permet à la perche de s'élever ou de s'abaisser suivant les niveaux variables de la ligne aérienne.

Dans le système Walker (fig. 440), la partie frottante est remplacée par un rouleau R dont l'axe de rotation A est monté sur billes, suivant la disposition indiquée dans la figure 441. Les surfaces de contact changent constamment

dans le frottement de roulement et l'usure est ainsi beaucoup plus régulière et moins rapide que pour l'archet, dont le contact comporte un frottement de glissement. La tige est d'ailleurs montée sur support articulé, comme dans les autres systèmes.

Les prises de courant pour lignes en caniveaux sont placées en dessous de la voiture; leurs formes varient nécessairement suivant la disposition des conducteurs souterrains. Un des types les plus simples, est celui employé par la General Electric Company (fig. 442).



Il consiste en un chariot dont l'armature est constituée par deux plaques en acier *p*, rivées sur trois réglettes qui maintiennent entre les plaques l'espace suffisant pour loger les conducteurs amenant le courant aux moteurs. Sur chacune des faces de l'armature sont fixées les semelles de contact en fonte *F*, montées sur des ressorts en acier qui déterminent une pression suffisante des frotteurs contre les conducteurs d'alimentation.

Ces appareils de prise de courant sont introduits à l'intérieur du caniveau, par des ouvertures longitudinales, formant sur certains points des élargissements de l'ornière, au moyen de plaques mobiles que l'on remet en place, après l'introduction de l'appareil.

Les prises de courant sur les lignes à contacts superficiels sont des sabots métalliques, ou de simples barres de fer suspendues sous la voiture et glissant à la surface du sol.

TROLLEY AUTOMOTEUR DE LOMBARD-GERIN. — Ce trolley imaginé tout récemment par cet ingénieur-électricien et qui a été soumis à l'essai pour la première fois en janvier 1900, sur une ligne d'expérience d'un kilomètre, établie à Issy, est destiné à alimenter d'électricité les voitures automotrices routières.

Il faut remarquer en effet que toute voiture électrique

qui n'est pas astreinte à suivre une ligne ferrée, doit pouvoir dévier de sa direction et, par suite, s'écarter plus ou moins à chaque obstacle, ou rencontre d'autres véhicules, des conducteurs aériens qui l'alimentent. Cette obligation est incompatible avec l'emploi d'un trolley à tige rigide ou d'un trolley à navette glissant dans un conducteur tubulaire et relié au véhicule par câble souple, car même dans ce dernier cas, une traction oblique détermine des

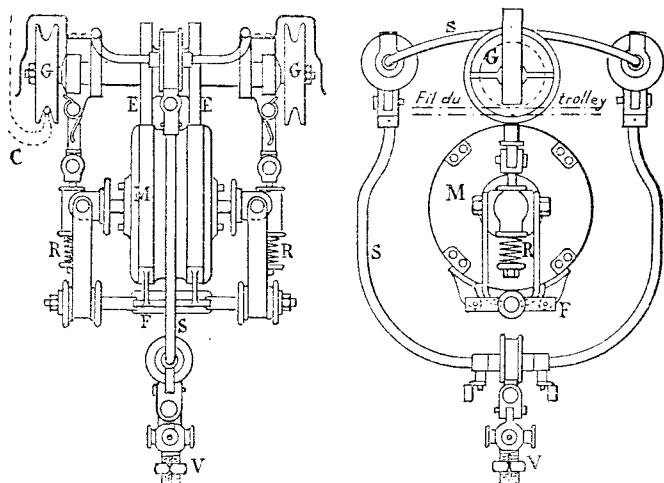


FIG. 443. — Trolley automoteur. — Vue de face. — Vue latérale.

coincements qui rendent impossible le fonctionnement du trolley.

Le nouveau système met en œuvre un trolley automoteur dont la vitesse reste toujours proportionnelle à celle de la voiture, tout en étant légèrement supérieure à celle-ci; il en résulte que ce trolley se maintient toujours en avant, en donnant au câble souple qui le réunit à la voiture une tension convenable, limitée par les glissements possibles du système sur les câbles conducteurs.

L'appareil (fig. 443) se compose d'un chariot supporté

par deux galets métalliques G qui roulent sur les câbles d'alimentation aériens d'aller et retour et jouent en même temps le rôle de double trolley, pour recueillir le courant conduit à la voiture par le câble souple de connexion. Les conducteurs aériens prennent leurs points d'appui en dessus des branches verticales de consoles recourbées C, profilées de manière à laisser libre passage à la jante creuse des galets de roulement.

En dessous de l'essieu des galets est placé un petit moteur M à courants triphasés, soutenu par des tiges de suspension élastiques qui sont elles-mêmes suspendues sur l'axe, entre les roues porteuses. Sur la partie moyenne du même essieu sont montés deux galets de friction en fibre E, qui viennent frotter sur des bandes annulaires en acier M, disposées sur la périphérie de l'induit mobile du moteur et transmettent le mouvement de celui-ci aux galets de roulements, qui peuvent ainsi progresser sur les câbles conducteurs. Les ressorts R permettent de régler la pression des galets D, contre la jante de l'induit, pour assurer l'entraînement du trolley.

L'appareil est complété par un frein électro-magnétique F, muni de quatre sabots agissant sur la périphérie du moteur et qui peut être commandé électriquement de la voiture. Ce frein est utilisé en cas d'arrêt sur les rampes qui solliciteraient le trolley à glisser en arrière.

Enfin le câble souple de connexion du trolley à la voiture est porté par le cadre S, suspendu également sur l'axe, par une articulation qui lui permet d'osciller dans le plan vertical perpendiculaire à l'essieu; le câble vient se fixer à la base de ce cadre par un joint à la Cardan, afin d'éviter que, par l'effet d'une traction oblique, le trolley ne soit renversé et séparé des conducteurs.

Le courant triphasé qui alimente le petit moteur du trolley, à induit à cage d'écureuil, est engendré par le moteur même de la voiture qui présente la disposition d'une machine polymorphique, recevant par le collecteur ordinaire le courant continu, employé pour la plus grande partie à la traction de la voiture auto-motrice, et débitant,

d'autre part, une fraction de cette énergie, sous forme de courant triphasé. A cet effet, sur l'arbre de l'induit sont disposées trois bagues isolées, reliées à trois points de l'enroulement induit, distants l'un de l'autre du tiers de l'arc embrassé par deux pôles consécutifs de même nom. Le courant triphasé ainsi engendré est conduit aux inducteurs du petit moteur du trolley par trois fils câblés avec le conducteur souple de connexion.

Il se développe ainsi dans le moteur triphasé, un champ tournant de fréquence et d'intensité variables, de sorte que le trolley suit synchroniquement toutes les variations de la vitesse de la voiture, avec un léger excédent de vitesse, corrigé par le glissement des diverses parties frottantes, l'une par rapport à l'autre.

La voiture auto-motrice est pourvue d'un *combinateur* comprenant les résistances variables à introduire dans le circuit du moteur série, l'interrupteur de commande du frein et un commutateur de marche du trolley, qui peut inverser les connexions de deux des trois fils d'alimentation, afin de changer au besoin le sens du mouvement du chariot.

Le câble de connexion est attaché à l'extrémité d'une perche portée par la voiture, à 4 mètres au-dessus du sol ; un tendeur spécial lui permet de s'allonger ou de se raccourcir, suivant que la voiture s'éloigne ou se rapproche de la ligne aérienne. Le câble se relie à la perche par une prise de courant à six contacts amovible, de telle sorte que deux voitures allant en sens inverse, peuvent échanger leurs appareils de prise de courant qui sont tous identiques, et continuer leur route, chacune dans le sens voulu.

241. Tramways à accumulateurs. — Ce système de traction électrique constitue la seconde catégorie de notre classification, qui est caractérisée par ce fait que la voiture automotrice transporte elle-même l'énergie qui alimente ses électro-moteurs.

C'est, suivant l'expression admise, un système *autonome*, comparable aux procédés de traction avec chaudières à

vapeur, ou à eau chaude et réservoirs à air comprimé. Les avantages de la traction par accumulateurs peuvent se résumer comme suit :

Les conducteurs aériens ou souterrains sont totalement supprimés, et avec eux, tous les inconvénients et les causes d'insécurité qu'ils comportent.

La transformation de la traction, sur des lignes de tramways à chevaux ou à moteur mécanique, se fait sans difficulté par l'emploi des accumulateurs, sans qu'il soit besoin de modifier la voie primitive.

Ce système assure la complète indépendance des divers véhicules qui ne sont plus arrêtés par des accidents survenus, soit sur les lignes, soit à l'usine génératrice, à moins d'interruption prolongée dans la marche de l'usine.

Les machines génératrices fonctionnent toujours à pleine charge et ne sont pas soumises aux variations brusques de débit qui se produisent dans les procédés de distribution directe; leur débit étant régulier, elles n'auront pas besoin d'être aussi puissantes, et leur rendement sera notablement plus élevé, en raison des meilleures conditions dans lesquelles s'effectue leur travail.

Les frais de premier établissement de l'usine génératrice sont ainsi diminués de ce fait, et l'économie qui en résulte, ajoutée à celle provenant de la suppression des conducteurs, qui est d'autant plus sensible que la ligne est plus étendue, peut compenser les dépenses supplémentaires relatives à l'achat des accumulateurs.

Le plus grand reproche que l'on peut faire à la traction par accumulateurs, comme à tous les systèmes autonomes d'ailleurs, est de comporter un poids considérable d'appareils, qui vient charger la voiture et absorber en pure perte une fraction notable de l'énergie de transport.

Cette considération montre que l'application des accumulateurs à la traction, n'est vraiment rationnelle que sur les lignes qui ne présentent que des parcours en palier, ou seulement de faibles pentes ne dépassant pas 2 à 4 pour 100, la moindre rampe venant augmenter considérablement le coefficient de traction.

EXEMPLE. — Il est facile de se rendre compte de l'influence prépondérante des rampes, par l'exemple numérique suivant que nous empruntons à l'ouvrage d'Éric Gérard.

Soit à calculer le poids d'accumulateurs que doit transporter avec elle une voiture pesant 4 tonnes, pour gravir une rampe de 3 pour 100, à la vitesse de 10 kilomètres à l'heure ou de 2 m. 78 par seconde.

Appelons F la force totale de traction que doit développer l'électro-moteur, p le poids total en kilogrammes du véhicule avec sa charge, γ compris le poids inconnu des accumulateurs, f le coefficient de traction et i la rampe par mètre. La force F aura pour expression (§ 234) :

$$F = p \times (f + i)$$

D'autre part, le travail pour une vitesse v , c'est-à-dire pour un chemin de longueur v parcouru dans une seconde, sera :

$$W = p \times (f + i) \times v \text{ kilogrammètres.}$$

Et comme chaque kilogrammètre produit par seconde équivaut à 9,81 watts, la puissance électrique s'exprimera par :

$$W = p \times (f + i) \times v \times 9,81 \text{ watts.}$$

Appliquons maintenant cette formule à l'exemple numérique ci-dessus énoncé.

Nous avons vu (§ 209) que les accumulateurs donnaient à la décharge une force électro-motrice de 1,8 volts par élément et que le débit ne pouvait guère dépasser, d'une manière normale, 2 à 3 ampères par kilogramme ; ces conditions correspondent à une puissance spécifique maximum de 5 watts environ par kilogramme. Si donc nous désignons par x le nombre de kilogrammes des accumulateurs, nous devons avoir :

$$W = 5 \times x$$

D'autre part, le poids p se décompose en deux, le poids π de la voiture et de sa charge d'une part, et le poids x des accumulateurs ; on aura donc dans le cas actuel :

$$p = \pi + x = 4000 + x$$

Portant ces relations dans la formule précédente il vient :

$$5 \times x = (4000 + x) \times 2,78 \div (10,012 + 0,03) \times 9,81$$

d'où :

$$x = (4000 + x) \times 0,228$$

Ce qui peut s'écrire :

$$x = 4000 \times 0,228 + x \times 0,228$$

Et comme on peut retrancher $(x \times 0,228)$ de chaque côté, sans compromettre l'égalité :

$$x \times (1 - 0,228) = 912$$

et enfin :

$$x = \frac{912}{0,772} = 1181 \text{ kilogrammes}$$

soit près de 1,2 tonnes d'accumulateurs.

Si le parcours était en palier, le terme i serait nul et la relation précédente deviendrait :

$$x = (4000 + x) \times 0,065$$

D'où :

$$x = \frac{260}{0,935} = 280 \text{ kilogrammes environ.}$$

RÉCUPÉRATION. — Lorsque le profil du parcours des voitures à accumulateurs est accidenté, on peut récupérer dans les pentes l'énergie ou plutôt une partie de l'énergie dépensée pour gravir les rampes. En effet, si la pente est assez forte, pour que la composante de la force de la pesanteur qui sollicite le véhicule à descendre soit supérieure à l'effort résistant de traction, la dynamo est actionnée par l'essieu, comme une machine génératrice par l'arbre d'un moteur et elle transforme en énergie électrique le travail moteur dû à la chute du véhicule; cette énergie est emmagasinée dans les accumulateurs qui la restitueront ensuite à l'électro-moteur.

Il est facile de se rendre compte approximativement de la valeur de cette récupération. En effet, le travail de la pesanteur est employé, en partie, à vaincre l'effort de résistance à la traction, soit 13 kilogrammes par tonne, par exemple, et le reste constitue l'énergie disponible T transmise à la dynamo; on aura donc, en désignant par P le poids en tonnes de la voiture avec sa charge, par l la longueur de la pente supposée uniforme et par n l'inclinaison de la voie en millimètre par mètre :

$$T = P \times l \times (n - 13)$$

Toutefois, l'électro-moteur ne récupère pas la totalité de ce travail, puisqu'une fraction notable est absorbée par le freinage pour l'arrêt et le ralentissement et l'on ne peut guère compter que sur les 0,85 de ce travail.

Si l'on tient compte en outre du rendement des moteurs agissant comme génératrice, soit 75 pour 100 ; du rendement des accumulateurs qui ne dépasse pas 70 pour 100 ; et du coefficient de l'utilisation par les mêmes moteurs de l'énergie emmagasinée et transformée en travail mécanique, on voit que le travail disponible n'est en réalité que :

$$T < 0,85 \times 0,75 \times 0,70 \times 0,75 = T \times 0,33$$

Dans ses expériences à ce sujet, M. Sarcia a trouvé que le *coefficient de récupération*, ou le rapport de l'énergie récupérée à celle dépensée, croît avec la pente et diminue quand le coefficient de traction augmente. Ainsi, pour une pente de 20 millimètres, le coefficient de récupération varierait de 0,70 à 0, quand l'effort de traction augmente de 0 à 20 kilogrammes par tonne ; pour la rampe de 40 millimètres, la récupération ne deviendrait nulle que pour un effort de traction de 40 kilogrammes par tonne.

En faisant la comparaison de l'énergie dépensée pour parcourir un même profil dans le cas du fil aérien et dans celui de la récupération par accumulateurs, on trouve que les poids d'accumulateurs donnant l'égalité de dépense d'énergie, varient, pour la même charge, de 0,9 à 2,53 tonnes, quand la pente s'élève de 20 à 50 millimètres.

On arrive donc, en définitive, à des poids considérables d'accumulateurs, et comme, à d'autres points de vue, on préfère les réduire en pratique, la dépense d'énergie est toujours plus grande qu'avec le système de fil aérien. La récupération ne peut d'ailleurs se faire convenablement qu'en employant des dynamos schunt qui, agissant comme réceptrice ou génératrice, tournent toujours dans le même sens ; or les moteurs en série ont des avantages marqués sur l'autre système, pour la traction des tramways.

SYSTÈME MIXTE A FIL AÉRIEN ET ACCUMULATEURS. — Puisque la traction par accumulateurs est généralement plus chère que par le système aérien, on réalisera une économie en employant simultanément les deux procédés. Il arrive en effet que dans beaucoup de villes on ne tolère pas la pose des fils de trolley, du moins dans les quartiers du centre, où

s'élèvent les monuments; les Compagnies concessionnaires sont alors obligées d'adopter le système mixte utilisant les accumulateurs dans l'intérieur de la ville et le fil aérien à l'extérieur.

Pour que le système soit avantageux, il faut que le sectionnement de la ligne soit tel que les accumulateurs puissent se recharger en marche sur la ligne de trolley, de manière à reprendre sur ce parcours l'énergie dépensée sur l'autre partie du trajet.

Le type d'accumulateurs mis en œuvre, devra être à charge rapide, de telle sorte que la batterie puisse être chargée en une dizaine de minutes. Il faut, pour résister à ce régime, un type d'accumulateurs robuste; le nouveau modèle de pile secondaire Tudor entre autres, construit spécialement pour le service des tramways, paraît répondre aussi bien que possible à ces exigences. Les plaques négatives à pastilles sont du genre Faure; les plaques positives en plomb pur, rainées pour augmenter la surface de débit, sont à formation Planté.

La capacité d'un élément de 15 kilogrammes de plaques est de 32 ampères-heures, au régime de charge rapide; l'intensité des courants de charge et décharge peut atteindre en effet et dépasser au besoin 15 à 18 ampères par kilogramme de plaque.

En charge et décharge normale, on peut compter sur une capacité utilisable de 8 à 4 ampères-heures suivant le régime du courant; celui-ci est d'ailleurs très variable et peut aux démarrages, notamment, dépasser cinq à six fois l'intensité du courant en cours de marche.

D'une façon générale on peut admettre que les accumulateurs, pour traction, peuvent fournir 10 à 20 watts-heures par kilogramme de poids total.

Voici, à titre d'exemple, la spécification d'un élément du système Fulmen :

Débit par kilogramme	3 ampères.
Puissance utile par kilogramme . . .	5,3 watts.
Capacité spécifique par kilogramme .	14,6 ampères-heures.

Energie utile par kilogramme . . .	26 watts-heure.
Poids spécifique par kilowatt . . .	190 kilogrammes.
Poids spécifique par kilowatt-heure . .	37.5 kilogrammes.
Différence de potentiel utile moyenne.	1.9 volts.

CHARGE DES ACCUMULATEURS. — On peut employer deux procédés pour la charge des accumulateurs, soit le système à charge lente, soit celui à charge rapide dont nous avons parlé plus haut.

Le premier système est mis en œuvre dans le cas où les batteries sont chargées dans la station centrale, sur des barres entre lesquelles circulent les voitures automobiles; les batteries épuisées rentrées au dépôt sont ainsi remplacées par les batteries qui ont été chargées pendant que les premières dépensaient leur énergie pour la traction.

Ce procédé comporte donc l'emploi de deux batteries par voiture, ce qui constitue un matériel de piles secondaires très considérable. D'autre part, la manipulation des accumulateurs occasionne des frais de main-d'œuvre qui viennent grever notablement les dépenses d'exploitation.

On évite ces inconvénients, en employant la charge rapide qui permet d'effectuer l'opération dans les voitures mêmes, sans déplacer la batterie. A cet effet, des feeders partant de l'usine génératrice, conduisent le courant aux stations terminus où la charge est faite pendant l'arrêt, en 10 ou 15 minutes, la charge rapide peut encore s'effectuer comme nous l'avons vu, en cours de marche, sur le fil de trolley.

Les éléments sont généralement groupés dans des boîtes placées dans la caisse de la voiture, le plus souvent sous les banquettes des voyageurs; on les a aussi disposés dans des caissons suspendus sous la voiture, entre les deux essieux.

Les trépidations du roulement de la voiture tendent à faire détacher les matières actives que portent les plaques des accumulateurs; celles-ci sont ainsi plus ou moins rapidement détériorées. Les plaques qui résistent le mieux

par conséquent à ces causes de destruction, sont celles du type Planté dont les couches d'oxyde formées par l'électrolyse, sont beaucoup plus adhérentes que les pastilles de matière active rapportées.

D'après les résultats obtenus dans l'exploitation des tramways du système mixte de Hanovre, la durée des plaques a dépassé 40.000 kilomètres-voitures correspondant à l'exploitation d'une année, sans être en rien détériorées.

Il convient de prendre des précautions pour éviter les projections du liquide hors des vases pendant la marche : pour cela, on ferme les bacs avec un couvercle non attaqué par l'acide, en caoutchouc par exemple, en ménageant une ouverture pour le passage des gaz. Lorsque la charge est faite par le fil de trolley en cours de route, on doit assurer l'aération des caisses contenant les accumulateurs par des ventilateurs ou des tuyaux débouchant sur le toit du véhicule, afin d'expulser les gaz provenant de l'électrolyse du courant de charge.

242. **Moteurs des Tramways.**— On emploie généralement des moteurs série, dont la construction est plus simple que celle des moteurs shunt et qui sont susceptibles de

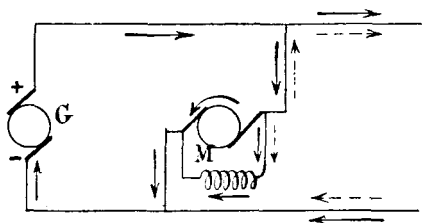


Fig. 444. — Récupération de l'énergie.

développer l'effort le plus considérable au démarrage : de plus, ils sont mieux asservis pour ainsi dire à la main du conducteur qui peut à volonté faire varier la vitesse du véhicule, suivant les circonstances. Les moteurs en dérivation sont de construction plus complexe, donnent lieu

aux tensions de 500 volts à des réactions de self-induction très intenses, et sont très sensibles aux variations de tension sur la ligne.

Toutefois, dans le cas de l'exploitation mixte par trolley et accumulateurs, on emploiera une dynamo schunt, comme nous l'avons vu précédemment; il en sera de même si l'on veut récupérer une partie de l'énergie à la descente. Dans ce cas, le moteur M (fig. 444), entraîné par les essieux de la voiture, sous l'action de la pesanteur, développe une force contre-électromotrice plus grande et agit comme une génératrice qui ajoute son courant à celui des génératrices G de la station, pour alimenter les moteurs des autres voitures qui ne se trouvent pas en même temps sur des pentes. La loi de la réversibilité montre que cette opération exige l'emploi d'une machine schunt, car il est nécessaire que la polarité des inducteurs reste la même, quelle que soit la fonction de la dynamo, comme moteur ou génératrice.

On peut encore couper les connexions du moteur avec la ligne et fermer le circuit de l'induit, soit sur une résistance, soit sur des accumulateurs qui absorberont l'énergie produite.

Dans ces différents cas, l'électromoteur agit comme un *frein électrique*, remplaçant avantageusement les freins mécaniques qui, outre qu'ils absorbent l'énergie de la pesanteur en pure perte, déterminent l'usure inégale des bandages des roues, par le frottement des sabots et le glissement des roues calées, sur les rails.

Comme les moteurs sont généralement placés sous les trucks hors de la vue et de la portée des mécaniciens, on ne peut faire varier pratiquement le calage des balais. Pour réduire les étincelles du collecteur, lors des variations brusques d'intensité qui se produisent notamment aux arrêts et aux démarrages, on utilise d'une part des dynamos à faible réaction d'induit, et d'autre part, des balais en charbon que l'on cale invariablement sur la ligne neutre, perpendiculaire à l'axe des pôles. On atténue ainsi les étincelles, sans pouvoir les éviter d'une manière absolue.

Le rhéostat que l'on introduit au démarrage ou à l'arrêt dans le circuit, comme nous l'avons vu, soit pour réduire l'intensité du courant, soit pour atténuer les effets de self-induction à la rupture des circuits, a l'inconvénient d'absorber une quantité assez considérable d'énergie en pure perte.

Les résistances du rhéostat agissent en réduisant la différence de potentiel avec bornes, ce qui permet de faire varier le couple moteur de la dynamo. On arrivera au même résultat, d'une manière plus avantageuse, en faisant varier l'excitation des inducteurs. A cet effet, l'enroulement est divisé en diverses sections que l'on peut grouper à l'aide du *combineur*, soit en parallèle, soit en série. Enfin on combine également le couplage des moteurs, lorsque la voiture comporte deux machines, en les associant en série, au démarrage, et en quantité, lorsque la force contre-électromotrice a acquis sa valeur normale.

Les moteurs de tramways doivent être construits de manière à pouvoir supporter pendant 1 heure une surcharge de 25 pour 100, sans échauffement notable. Les enroulements induits et inducteurs doivent être particulièrement bien isolés; les trépidations et les chocs auxquels sont soumis les moteurs amèneraient rapidement la destruction d'une isolation mal soignée et insuffisante.

La vitesse de rotation des moteurs est généralement plus élevée que celle des essieux; pour la réduire, on emploie des machines multipolaires qui, pour un moins grand nombre de tours, peuvent donner la force électromotrice voulue; la transmission de mouvement du moteur à l'essieu se fait d'ailleurs au moyen d'engrenages intermédiaires de réduction de vitesse.

La disposition la plus répandue pour fixer le moteur sur le véhicule est celle qui consiste à faire porter la dynamo sur l'essieu moteur, par deux paliers faisant partie intégrante de la machine; sur le côté opposé, une oreille venue de fonte avec le bâti, permet de suspendre le moteur à une traverse flexible ou à une barre rigide par l'intermédiaire d'un ressort.

C'est la disposition adoptée par la General Electric Company dont le moteur est représenté par la figure 445.

La machine est complètement fermée dans une boîte en acier, dont les deux parties sont raccordées par une char-

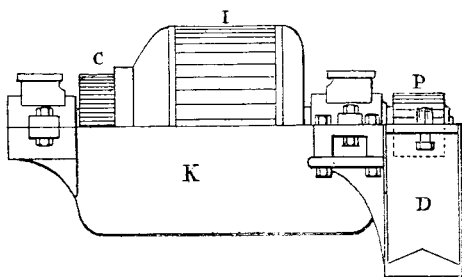


FIG. 445. — Moteur électrique de la General Electric Company.

nière : on peut donc découvrir aisément l'induit, pour l'examiner et le réparer au besoin. On voit les deux paliers qui sont enfilés sur l'arbre moteur : à gauche et à droite, le collecteur C, l'induit I et le pignon P fixé sur l'arbre

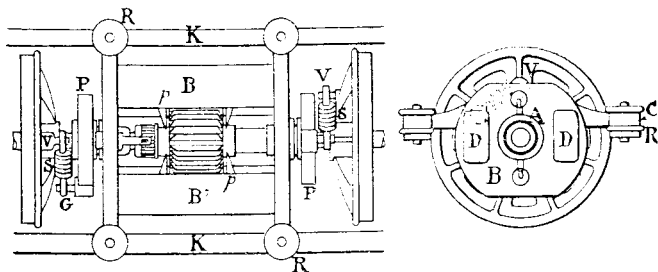


FIG. 446. — Moteur Schott-Raffard.

de l'armature qui doit engrener la roue dentée portée par l'essieu moteur : ces engrenages se trouvent dans une caisse D remplie d'huile que l'on voit à droite, en avant.

Dans le cas de véhicules à grande vitesse, tels que les locomotives électriques, pour lesquelles il n'est pas besoin

de réduire le nombre de tours, entre le moteur et l'essieu, l'induit est placé concentriquement à celui-ci et actionne directement les roues, sans transmission intermédiaire. Telle est la disposition imaginée par MM. Schort et Raffard, connue sous le nom de *moteur sans réduction de vitesse*.

L'arbre creux A (fig. 446) tourne dans des paliers portés par la carcasse même du moteur; l'essieu traverse ce manchon en laissant un jeu suffisant entre lui et la surface intérieure de l'arbre creux. La carcasse B pourvue des inducteurs D repose sur les longerons K du truck, par les oreilles C et les ressorts de caoutchouc R.

Le mouvement de rotation de l'arbre est transmis, non à l'essieu, mais aux roues, par un système de liaison élastique qui consiste en une poulie P, munie d'un bouton G qui tire sur un ressort S, fixé à l'autre extrémité à un tourillon V porté par la roue; on évite ainsi les chocs qui seraient transmis au moteur au moment du démarrage.

Les pièces polaires p sont placées latéralement et induisent les parties de l'enroulement de l'armature, tendues sur les bases de l'anneau.

Cette disposition a pour but d'éviter le frottement des pôles contre l'armature, en cas d'usure des paliers; elle permet également de réduire la vitesse angulaire en augmentant le diamètre.

243. Conduite des voitures. Combinateur. — Le conducteur doit avoir en main un appareil, sorte de servo-moteur lui permettant de commander la manœuvre de la voiture, comme le cocher dirige son cheval. Cet appareil, auquel on a donné le nom de *combinateur*, ou *controller* suivant l'appellation américaine, doit réaliser toutes les combinaisons de connexions nécessaires, pour le démarrage, la marche à vitesse normale, l'accélération, le ralentissement, l'arrêt, le renversement de marche et le freinage électrique au besoin.

Le démarrage exige l'introduction d'un rhéostat dans le circuit; lorsqu'il y a deux moteurs on les relie en série, pour augmenter la résistance totale, ce qui permet

de réduire la résistance additionnelle du rhéostat qui absorbe de l'énergie en pure perte.

La première disposition de la figure 447 montre la résistance R , les induits A , A_1 et les inducteurs correspondants B et B_1 reliés tous ensemble en série.

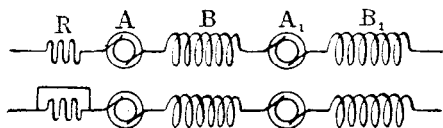


FIG. 447. — Disposition au démarrage.

Dans la deuxième disposition, le rhéostat a résistance variable a été totalement supprimé, pour permettre à la voiture de prendre sa vitesse normale.

Le groupement des moteurs en série a non seulement l'avantage de limiter l'intensité du courant, mais encore celui de réduire de moitié la différence de potentiel aux bornes de chacun d'eux. *Or la vitesse varie comme le voltage aux bornes* (§ 217): ce procédé permet donc de réduire et régler l'allure du véhicule.

Ces considérations nous montrent encore que, si l'on veut augmenter la vitesse, on n'aura qu'à grouper les

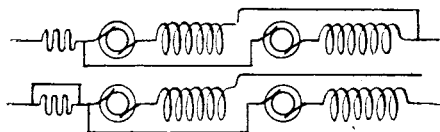


FIG. 448. — Couplage en dérivation.

moteurs en dérivation (fig. 448). On commence par insérer la résistance sur le circuit des dynamos; puis on accroit encore la vitesse en supprimant la résistance, comme il est indiqué dans la seconde disposition de la figure.

Pour obtenir la vitesse maximum on met à profit ce

principe de la théorie des moteurs que nous avons exposée précédemment (§ 217), à savoir que *la vitesse augmente lorsque le champ magnétique inducteur diminue d'intensité*. On réalisera cette condition, en schuntant les inducteurs des dynamos comme l'indique la figure 449 : le cou-

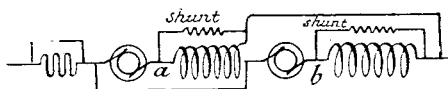


FIG. 449. — Schuntage des inducteurs.

rant en *a* et *b* se divisera entre l'enroulement inducteur et le schunt, en raison inverse des résistances de chacun d'eux ; les ampères-tours seront aussi réduits et par suite l'intensité du champ magnétique.

Les combinateurs de formes très variées suivant les constructeurs, sont établis généralement en double, à l'avant de chacune des plates-formes de la voiture.

Le controller Thomson-Houston, par exemple, se compose de deux cylindres verticaux, un grand et un petit, placés dans un coffre fermé. Le premier commandé par une manivelle mobile sert à effectuer toutes les manœuvres établissant les diverses connexions pour la marche avant ; le second sert à renverser la marche, en inversant le courant dans les moteurs ; cet inverseur ne peut d'ailleurs être manœuvré, grâce à un verrouillage spécial, que lorsque le combinateur principal a coupé le circuit.

Les cylindres portent des lames de cuivre, isolées à l'amiante et tournant devant des frotteurs en cuivre reliés aux divers conducteurs de connexion ; ces lames enroulées à différentes hauteurs sur le cylindre et embrassant une partie plus ou moins grande de la circonférence, établissent ainsi, par leurs longueurs et leurs positions respectives, les connexions voulues entre les divers circuits.

La figure 450 présente la disposition générale des con-

nexions de la voiture Thomson-Houston. Le courant arrivant du fil aérien par le trolley L, est porté aux deux extrémités de la voiture par le conducteur C C, pourvu de deux commutateurs C qui permettent de couper le circuit de chacune des plates-formes. Il traverse ensuite le parafoudre F relié d'autre part à la terre, puis une bobine de self-induction dont la réaction s'oppose à l'accès des décharges atmosphériques jusqu'aux machines; un coupe-circuit fusible précède ce système protecteur.

Le courant se rend ensuite en *i*, par l'un des conducteurs compris dans le câble Y, au premier balai du controller n° 1; les connexions intérieures le font passer

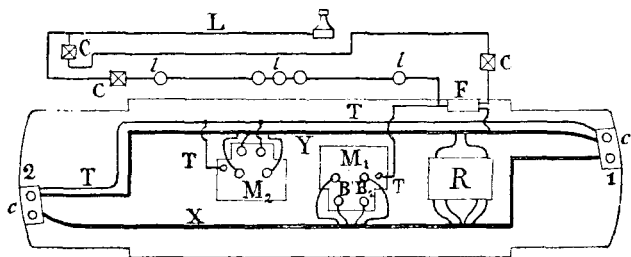


Fig. 450. — Connexions de la voiture Thomson-Houston,

dans un second balai qui le dirige sur les résistances R; il retourne à l'appareil qui l'envoie par un troisième balai dans les inducteurs B B₁ de la dynamo M¹; nouveau retour au controller, qui établit la connexion du circuit sur l'induit de ce moteur. Le courant revient alors à un quatrième balai, d'où il est dirigé, par le même système de circuits partiels revenant chaque fois au combinateur, dans les inducteurs et dans l'induit de la dynamo M₂; à sa sortie, il suit le fil de terre relié aux rails de retour du courant par le conducteur R qui est rattaché à la carcasse du moteur et mis ainsi en communication avec les essieux et les roues du véhicule.

Les autres manœuvres s'effectuent en faisant tourner la manette du cylindre qui, par son mouvement de rotation,

fait varier les contacts des lames et des balais et établit ainsi les connexions voulues.

La figure indique encore la disposition des lampes servant à l'éclairage de la voiture; elles sont placées au nombre de cinq généralement en série, sur un circuit / en dérivation sur le trolley et le fil de terre du parafoudre; un interrupteur est placé à l'origine du circuit.

Pour la conduite de la voiture, il est à recommander au conducteur de n'utiliser des freins pour les arrêts, que le moins possible, en utilisant la vitesse acquise par le véhicule pour atteindre le prochain stationnement, après avoir ouvert le circuit par la manœuvre du combinateur, en temps utile.

Sur les tramways à accumulateurs, il est facile de faire varier le potentiel aux bornes des moteurs, en divisant la batterie en plusieurs sections que l'on relie à l'aide du combinateur, soit en série, soit en quantité, suivant la vitesse plus ou moins grande que l'on veut obtenir.

Quand il s'agit de dynamos en dérivation qui, pour une construction donnée, sont des moteurs à vitesse constante, on peut néanmoins faire varier la vitesse, en modifiant le circuit inducteur par l'introduction de résistances, de manière à faire varier l'excitation.

244. Chemins de fer électriques. — La vitesse des locomotives à vapeur est limitée par la puissance des moteurs et surtout des chaudières qui ne peuvent dépasser des proportions déterminées, sous peine de surcharger les roues et compromettre la stabilité de la machine. On n'a pas encore dépassé les vitesses maxima de 120 à 140 kilomètres et la vitesse moyenne, sur un parcours de grande étendue, de 85 à 80 kilomètres.

La pression dans la chaudière étant maintenue à sa valeur maximum, on ne peut faire varier la puissance, suivant les besoins, qu'en augmentant l'admission de la vapeur et faisant travailler le moteur à faible détente, aux dépens du rendement. Enfin on reproche aux locomotives, qui sont pourvues de moteurs à mouvement alternatif, d'occasionner par l'oscillation des pistons et des bielles,

des mouvements de galop, de roulis et de lacet qui incommode les voyageurs, détériorent les voies et augmentent le coefficient de traction.

L'emploi des moteurs électriques permet de porter la puissance des locomotives à une valeur qui n'a pour ainsi dire de limite que la puissance de la station génératrice fixe, alimentant les conducteurs d'alimentation.

Les moteurs des usines génératrices fixes peuvent fonctionner toujours dans les conditions de rendement maximum, leur vitesse étant indépendante de celle des trains électriques; de plus, les chaudières fixes utilisent mieux le combustible et peuvent brûler des charbons de qualité inférieure, qui ne seraient pas admissibles pour les foyers des locomotives.

Enfin, les machines électriques constituant des moteurs rotatifs, transmettent directement leur mouvement de rotation aux essieux moteurs, sans le secours des organes de transformation de mouvement.

Les locomotives électriques sont spécialement indiquées, pour le service des galeries de mine et sur les lignes de chemin de fer comportant de longs parcours en tunnels, pour éviter les fumées et les buées qui rendent l'air irrespirable au passage des locomotives à vapeur dans les souterrains.

On a proposé deux systèmes, comme pour la traction des tramways: l'un par distribution du courant aux locomotives, au moyen de conducteurs alimentés par des usines fixes; l'autre comportant des locomotives indépendantes, remorquant avec elles leurs générateurs d'électricité.

Le premier procédé, qui paraît le plus pratique d'ailleurs, comporte l'installation d'un certain nombre d'usines génératrices, réparties dans les diverses sections du parcours et produisant des courants à haute tension, qui seront réduits, dans des sous-stations échelonnées le long de la ligne, à la tension convenable pour alimenter les moteurs des locomotives électriques.

Comme conducteurs, on peut utiliser le système aérien

de même que sur les lignes de tramways ; mais il est également facile d'installer les conducteurs économiques au ras du sol, puisque la voie des chemins de fer a une destination exclusive et n'est pas accessible au public.

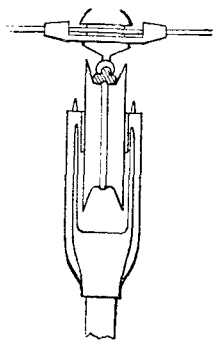


FIG. 451. — Fil de trolley en trèfle.

Les conducteurs aériens comportent de fortes sections, car ils doivent laisser passer les courants très intenses nécessaires pour actionner les trains de plusieurs centaines de tonnes.

A cet effet, on a employé la disposition indiquée par la figure 451. Le conducteur présente une section en trèfle et la roue du trolley est profilée de manière à épouser la forme de la partie en contact du conducteur : les surfaces en prise sont ainsi plus étendues, comme il convient pour le cas de courants très intenses.

Sur les voies spéciales où le public n'a pas accès, on a

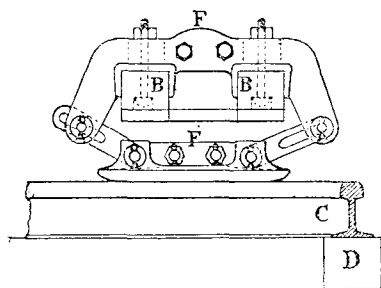


FIG. 452. — Prise de courant du Métropolitain de Chicago.

intérêt à établir les conducteurs au niveau du sol. Le circuit est alors formé généralement par des rails en acier, posés sur des traverses ou des longrines en bois imprégné à chaud de paraffine. Une pareille

voie établie par Hopkinson, en Angleterre, a présenté une résistance d'isolement de 600 ohms par kilomètre, par les temps les moins favorables.

La disposition indiquée dans la figure 452 est celle du

Métropolitain aérien de Chicago. Les rails de prise de courant en acier C sont fixés de chaque côté de la voie roulante, sur des cubes de bois D imprégnés de paraffine. Les joints sont pourvus d'éclissages en cuivre qui assurent la continuité du circuit conducteur.

Les appareils de prise de courant, devant présenter une grande surface de contact, sont constitués par des sabots en fonte articulés F, qui sont fixés au nombre de quatre sur des supports transversaux B; les sabots pèsent librement sur les rails C pour assurer un bon contact en cours de marche. Les diverses sections des rails sont alimentées par 18 feeders partant de l'usine génératrice et constitués également par des rails disposés comme les conducteurs de contact.

La force motrice nécessaire pour la traction des trains de 200 à 800 tonnes et plus, se compte par centaines de chevaux et peut aller jusqu'à 2000 unités de puissance. Voici quelques chiffres relatifs à cette question.

Locomotive de la Compagnie de Baltimore :

Poids.	90 tonnes
Puissance répartie en 6 moteurs de 225 kilowatts	1.600 chevaux
Effort de traction maximum	27.000 kilogrammes
Effort moyen	15.000 —
Coefficient de traction par tonne sur rampe de 5 millimètres.	11 $\frac{1}{2}$ à 6
Vitesse maximum à l'heure	15 kilomètres
Rendement total en pour 100 . . .	60 à 65
Courant maximum au démarrage pour un train de 800 tonnes, à la tension de 625 volts.	1800 à 2000 ampères
Courant en marche normale	800 ampères

Locomotive électrique de Sprague et Duncan :

Poids.	55 tonnes
Puissance totale pour quatre moteurs. .	1600 chevaux
Effort maximum	13.600 kilogrammes
Vitesse normale à l'heure	56 kilomètres
Courant normal à 800 volts	250 ampères

Locomotive de la banlieue Ouest de Paris :

Poids.	53 tonnes
Effort de traction total réparti sur	
4 moteurs	8000 kilogrammes
Vitesse moyenne de marche	45 à 50 kilomètres

Comme, on le voit, ces vitesses sont relativement faibles. Il ne faut pas perdre de vue, d'ailleurs, que le plus sérieux obstacle à l'obtention des grandes vitesses, tant pour les nouvelles locomotives Compound à vapeur perfectionnées, qui peuvent prétendre à dépasser aisément la vitesse de 100 kilomètres, que pour les locomotives électriques, c'est l'insuffisance de stabilité et surtout les difficultés du profil des tracés des lignes actuelles.

On estime que pour modifier une ligne de 1000 kilomètres telle que celle de Paris-Lyon-Marseille, pour l'adapter à la traction électrique, il faudrait dépenser, y compris les stations génératrices, 500.000 francs en moyenne par kilomètre, soit 500 millions en totalité.

LOCOMOTIVES INDÉPENDANTES. — Ces difficultés ont suggéré la pensée de recourir aux locomotives indépendantes, portant avec elles leurs sources d'électricité et qui n'exigent par conséquent aucune modification de la voie ordinaire, si l'on veut toutefois s'en tenir aux vitesses communément admises.

Les locomotives à accumulateurs ne pourront être employées que dans des cas particuliers et sur des lignes de faible parcours, tant que la capacité et la puissance spécifique n'auront pas été suffisamment améliorées pour réduire le poids des batteries nécessaires au-dessous de celui des locomotives à vapeur.

Dans la catégorie dont il s'agit rentre la locomotive Heilman qui procède d'une combinaison toute spéciale, consistant à établir sur la locomotive elle-même la station génératrice à vapeur qui fournit la puissance aux électromoteurs placés sur les essieux de la machine.

M. Heilman revendique pour son système la suppression des couples mécaniques perturbateurs et des vibrations

produites dans les locomotives ordinaires, par l'emploi de ses moteurs à vapeur équilibrés; le fonctionnement de ces moteurs maintenu constamment dans les meilleures conditions d'utilisation de la vapeur et en même temps tous les avantages qui résultent de l'emploi des moteurs électriques.

Pour obtenir ces résultats, l'inventeur a dû établir sur sa locomotive 6 lignes de cylindres à vapeur doubles du système Willans, d'une puissance totale de 1350 chevaux; 2 dynamos génératrices débitant 2000 ampères à 455 volts, actionnées par ces machines; une dynamo excitatrice de 140 ampères à 115 volts et 2 lignes de cylindres à vapeur doubles qui la commandent; enfin 8 électromoteurs en série, disposés sur les 8 essieux. Le tout, avec la chaudière de 185 mètres carrés de surface de chauffe, porte le poids de la locomotive à 132 tonnes.

D'après les expériences faites par M. Drouin, la locomotive Heilman développerait, à la vitesse de 100 kilomètres à l'heure, en palier, un effort aux jantes des roues motrices de 2700 kilogrammes; sur ce chiffre, 924 kilogrammes, soit le tiers de l'effort total, sont absorbés par la locomotive pour se remorquer elle-même; tous calculs faits, la machine pourrait entraîner un train de 253 tonnes avec un rendement mécanique de 47 pour 100.

Quels que soient les résultats déclarés, on ne peut dire qu'ils dépassent pratiquement ceux que l'on a obtenu des locomotives à vapeur à grande vitesse et, en définitive, la locomotive Heilman ne paraît pas avoir répondu aux espérances que son inventeur avait fait concevoir.

245. Stations génératrices pour la traction électrique.— Les dynamos génératrices ainsi que les moteurs qui les actionnent doivent remplir des conditions particulières, quand il s'agit de la distribution du courant sur le réseau des lignes de tramways.

La puissance absorbée par les voitures est en effet très variable à chaque instant, non seulement par suite des arrêts fréquents et des démarrages, mais encore en raison des variations de la vitesse et des efforts sur les diverses

sections plus ou moins accidentées du parcours. La puissance maximum au démarrage ou dans les rampes peut atteindre facilement le triple de la valeur de la puissance moyenne.

Pour des voitures de 32 à 50 places, on compte sur une moyenne de 450 à 770 watts-heure par voiture-kilomètre; ces chiffres correspondent à 70 ou 90 watts-heure par tonne-kilomètre, pour des voies présentant des déclivités faibles ou moyennes.

D'après ces données, on comprend que les valeurs momentanées de la puissance à l'usine présenteront des écarts d'autant plus grands que le nombre des voitures en service sur la ligne sera plus faible; dans une grande exploitation au contraire, il se produit une certaine compensation entre les diverses voitures, qui tend à rendre constants la demande d'énergie et le débit des dynamos génératrices.

Il s'ensuit que l'on doit choisir des types de génératrices très robustes, capables de suffire à des accroissements brusques de consommation et de maintenir la différence de potentiel à peu près constante sur les conducteurs d'alimentation, malgré la variation du débit. A ce dernier point de vue, on devra utiliser des dynamos à *excitation Compound*, et même, dans le cas de réseaux étendus, des *dynamos hypercompoundées* qui élèvent assez la tension, aux bornes de la station, pour la maintenir constante à l'extrémité des feeders.

Les moteurs doivent être pourvus de volants très lourds et de régulateurs efficaces, pour parer aux variations de vitesse qui peuvent résulter des augmentations de consommation ou des réductions brusques de la charge sur le réseau.

La salle des dynamos devra être pourvue d'un tableau de distribution comprenant les appareils de mesure et de manœuvre électriques, soit: un rhéostat de champ magnétique pour régler l'excitation des dynamos; un interrupteur permettant de mettre ces génératrices en circuit, lorsque leur tension a atteint le voltage normal; un

volt-mètre et un ampère-mètre; un parafoudre au départ des conducteurs aériens.

Il convient également d'installer sur le tableau un *interrupteur automatique* coupant le courant, lorsque par suite d'un court-circuit accidentel ou d'un accroissement exceptionnel de courant provenant du démarrage simultané d'un grand nombre de véhicules, le courant pourrait prendre une intensité dangereuse pour la conservation des machines.

EMPLOI D'UNE BATTERIE D'ACCUMULATEURS.— Le meilleur moyen de parer aux variations considérables qui se produisent dans les petites exploitations, consiste à utiliser une batterie d'accumulateurs qui jouera au point de vue de la régularisation du courant engendré par les dynamos, le même rôle que le volant dans le fonctionnement des moteurs à vapeur.

On peut ainsi réduire la puissance des dynamos génératrices à celle qui correspond au régime moyen; si la demande de consommation dépasse cette moyenne, le supplément est fourni par la batterie; si elle descend en dessous, l'énergie disponible est au contraire emmagasinée dans les accumulateurs; un réducteur de charge automatique fait varier le nombre des éléments en circuit, suivant que leur force électro-motrice doit être réduite ou relevée.

La figure 453, donne le schéma de la disposition adoptée par M. Pirani à la station électrique de Fontainebleau. La batterie d'accumulateurs, est en dérivation sur les bornes B D de la dynamo génératrice G, dans le même circuit dérivé est intercalé l'induit V d'une dynamo auxiliaire jouant le rôle de *survolteur*. Son inducteur porte deux enroulements produisant des excitations opposées; l'un K en dérivation sur les bornes de la batterie, avec une résistance R; l'autre H en série sur l'un des conducteurs principaux.

En charge normale, les deux champs magnétiques se font équilibre, et l'action différentielle est nulle; les choses sont alors combinées pour que l'accumulateur n'intervienne ni passivement ni d'une manière active. Si la ligne

est surchargée, le courant intense traversant la bobine en série H rend l'excitation de celle-ci prépondérante : la force électro-motrice que cette excitation produit dans l'induit du survolteur vient s'ajouter à celle des accumulateurs qui se déchargent dans le réseau, pour venir en aide aux dynamos. Si au contraire la consommation diminue, c'est l'enroulement en dérivation K dont l'effet est supérieur ; la force électro-motrice du survolteur change de sens et vient renforcer celle des génératrices, pour

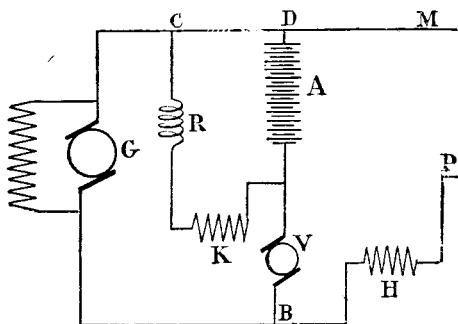


FIG. 453. — Disposition de M. Pirani.

charger la batterie. La résistance R est réglée une fois pour toutes, de manière à mettre au point les effets relatifs des deux enroulements.

Lorsque les stations génératrices sont très éloignées du réseau à desservir, comme cela se produit notamment dans le cas d'usines hydrauliques, on utilise les courants à haute tension qui sont ensuite convertis, dans des sous-stations en courants à 500 volts, pour l'alimentation des lignes de tramways.

On peut ainsi transformer des courants de haute tension soit continus, soit alternatifs simples, soit polyphasés, en courants continus à la tension qui convient aux électromoteurs des voitures automobiles.

COURANTS TRIPHASÉS. — On a également employé les cou-

rants triphasés, directement à l'alimentation des lignes de tramways : c'est ainsi que se fait la distribution de la ville de Lugano, en Suisse.

Le courant triphasé primaire à la tension de 5000 volts est transporté, par trois fils de cuivre de 5 millimètres de diamètre, jusqu'à la sous-station située à 12 kilomètres de l'usine hydraulique ; là il traverse un transformateur à trois phases qui réduit la tension à 400 volts. La ligne aérienne est double et le troisième conducteur est fermé par les rails de la voie roulante ; on peut donc considérer que le courant triphasé arrive par les fils aériens aux deux trolleys que porte la voiture et qu'après avoir traversé le moteur, son retour se fait par les rails.

246. Coût de la traction électrique. — Frais d'établissement.
— Nous résumons ici les chiffres relevés dans les ouvrages spéciaux pour servir à l'établissement d'un devis d'installation d'un réseau de tramways et à l'estimation des frais d'entretien et d'exploitation.

Etablissement de la voie ferrée :

Prix du kilomètre de voie simple en rails Vignole de 26 kilogrammes, sur accotement de route	25 000
Voie Broca avec rails de 36 kilogrammes, dans une chaussée déjà pavée	26.000
Même voie avec pavage neuf dans l'entre-rails et sur 50 centimètres de chaque côté	60 000
Même voie, avec rails de 44 kilogrammes, sur fondation en béton, avec pavage neuf	85.000
Voie Marsillon, avec rails de 41 kilogrammes, dans les mêmes conditions que la précédente	96 000

Équipement électrique d'une ligne aérienne :

Prix du kilomètre de ligne simple avec poteaux ordinaires en bois	8.000
Prix du kilomètre de ligne double avec poteaux ordinaires en bois	12.000
Prix du kilomètre de ligne simple avec poteaux métalliques	20.000
Prix du kilomètre de ligne double avec poteaux métalliques	25.000

Prix du kilomètre de ligne simple avec poteaux consoles	17.000
Prix du kilomètre de ligne double avec poteaux consoles	21.000

Équipement électrique des lignes à conducteurs souterrains :

Prix du kilomètre de ligne simple	95.000
— — — double	190.000
— — — de grand caniveau visi- table	230.000

Équipement électrique des lignes à conducteurs superficiels :

Prix du kilomètre de ligne simple, système Wes- tinghouse	60.000
Prix du kilomètre de ligne simple, système Vuil- leumier Claret	22.000
Prix du kilomètre de ligne simple, système Diatto.	30.000

Les dépenses afférentes à l'installation des feeders ne sont pas comprises dans les chiffres ci-dessus exposés.

Voitures et moteurs électriques :

Prix moyen d'un électro-moteur de 25 chevaux	4.000
— d'une voiture à 30 places avec un moteur de 25 chevaux	11.000
— d'une voiture à 30 places avec 2 mo- teurs de 25 chevaux	15.000
— d'une voiture à 50 places avec 2 mo- teurs de 25 chevaux	17.000

Usines génératrices. — La puissance génératrice de l'usine doit varier de 30 à 20 chevaux par voiture de 30 places, suivant le nombre de groupes de 5 voitures en service, le dernier chiffre s'appliquant au delà du nombre total de 25 voitures :

Coût de l'usine par cheval, y compris les bâtiments, pour les puissances extrêmes de 100 chevaux et de 1000 chevaux :

Moteurs et chaudières	300 à 150
Matériel électrique.	250 à 200
Fondations et bâtiment	250 à 150

Soit un total de 800 à 500 francs, auquel il faut ajouter 3000 à 4000 francs par voiture pour les installations accessoires, telles que remises, magasins, gares, bureaux et habitations.

DÉPENSES D'EXPLOITATION. — Ces dépenses se divisent généralement en deux catégories distinctes, l'une se rapportant aux frais de *traction proprement dite*, l'autre comprenant les frais divers et généraux.

Les frais de traction comportent : la production du courant; l'entretien de l'usine, du matériel roulant et des dépôts; l'entretien des connexions électriques et le salaire des conducteurs des voitures.

Dans son ouvrage sur les tramways électriques, M. Maréchal donne le prix de traction moyen ci-après, par kilomètre-voiture.

	Fr.
Entretien de la ligne et de l'usine centrale.	0,015
Force motrice	0,061
Entretien du matériel roulant	0,066
Personnel de conduite.	0,066
TOTAL.	<u>0,208</u>

Il est prudent toutefois de tabler sur un prix de traction de 25 centimes par voiture-kilomètre.

Les prix ci-dessus ne comprennent pas les dépenses d'entretien des voies, ni les frais de perception, qui devront être ajoutés aux frais généraux résultant des charges financières de l'entreprise, pour avoir le chiffre total des dépenses. On arrivera ainsi à un prix variant de 40 à 60 centimes par kilomètre-voiture.

Ce prix, d'après M. Maréchal peut se décomposer comme suit :

	Fr.
Dépenses de traction proprement dite . . .	0,25
Entretien de la voie	0,03
Frais de perception	0,07
Frais divers et généraux	0,10
TOTAL.	<u>0,45</u>

Voici d'autre part des chiffres relatifs à l'exploitation de la ligne d'Oullins à Lyon :

	Fr.
Frais de traction.	0,108
Dépenses supplémentaires.	0,022
Entretien du matériel	0,050
Intérêt et amortissement du capital.	0,090
TOTAL.	<u>0,270</u>

Les dépenses d'exploitation du tramway de Boston sont ainsi présentées :

	Fr.
Frais de traction proprement dite	0,132
Conducteur mécanicien, entretien de la voie et charges diverses.	0,132
Charges d'intérêts et d'amortissement	0,266
TOTAL.	<u>0,530</u>

Pour les tramways du Havre et de Marseille, les dépenses par voiture-kilomètre se sont élevées respectivement à 0 fr. 450 et 0 fr. 500.

Les frais de traction dans les exploitations à conducteurs souterrains ne paraissent pas sensiblement différents de ceux relatifs aux tramways à lignes aériennes; malgré les frais d'amortissement notablement plus élevés résultant de la construction des canaux. Sur le réseau de Budapest, ces frais sont évalués à 0 fr. 420 seulement.

Les tramways avec voitures automotrices, à accumulateurs, donnent lieu à des dépenses plus élevées, résultant notamment de l'entretien et de la manutention de ces appareils. Avec le système de batteries à charge rapide, qui supprime la main-d'œuvre du déplacement des batteries, le prix d'exploitation, non compris les frais d'amortissement et l'intérêt du capital engagé, peut être réduit à 0 fr. 400 par kilomètre-voiture.

Il est intéressant de comparer ces dépenses avec celles afférentes aux autres systèmes de traction.

Les frais de traction exclusivement, pour la traction animale, s'élèvent à des prix variant de 0. fr 500 à 0 fr. 600.

La traction mécanique à vapeur ou à air comprimé comporte des dépenses respectives de 0 fr. 400 et 0 fr. 440 en moyenne: enfin pour les tramways à gaz le prix est sensiblement égal à celui correspondant à l'air comprimé.

Autres applications mécaniques de l'énergie électrique.

247. **Telphérage.** — Ce système, imaginé par M. Fleeming Jenkin, sert, comme son nom l'indique, à transporter rapidement des wagonnets, par le moyen de l'électricité (fig. 454 et 455).

Les lignes aériennes comportant un câble d'aller et un câble de retour, servent en même temps à supporter les

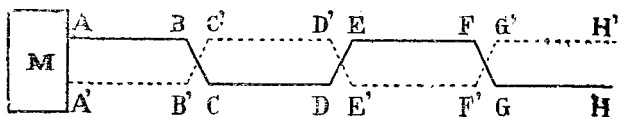


FIG. 454. — Plan de la ligne pour telphérage.

trains de wagonnets allant respectivement dans chaque sens.

Le train (fig. 455) est composé de wagonnets suspendus au-dessous d'un chariot à deux roues à gorge qui roulent sur les câbles et servent également de prises de courant; ces poulies sont donc disposées comme les roulettes de trolley et sont par suite isolées des chariots qu'elles supportent. Le chariot moteur est placé au milieu du train et relié aux deux roues extrêmes d'avant et d'arrière.

Si nous considérons un train roulant sur le câble A'H en s'éloignant de la station génératrice M, le courant arrivant par la roue d'arrière, par exemple, traversera le moteur, sortira par la roue d'avant qui devra alors être

en communication avec le câble de retour; or cette communication ne pourrait se faire qu'en établissant un pont conducteur entre la roue d'avant et le câble A II'.

Le problème paraît difficile à résoudre, mais la difficulté a été tournée par la disposition très ingénieuse imaginée par l'inventeur du *telphéage*.

Ainsi que l'indique le plan de la figure 454, les câbles conducteurs sont formés de sections consécutives qui sont alternativement en relation avec chacun des pôles par les fils de connexion transversaux tels que B C et B' C'. Les

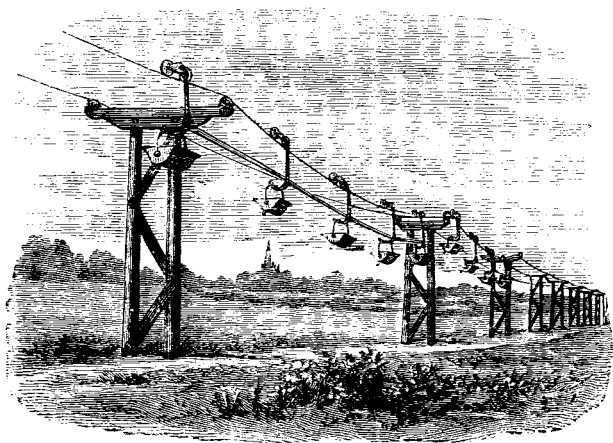


FIG. 455. — Train du telphéage.

longueurs de ces sections doivent être légèrement inférieures à celle des trains, de telle sorte que les roues d'avant et d'arrière ne soient jamais sur la même section et que l'une soit sur le pôle positif, tandis que l'autre est en relation avec le négatif.

Cette disposition exige nécessairement que les divers tronçons d'un même câble, tels que A' B', C D, E' F', soient isolés l'un de l'autre, sans toutefois qu'il subsiste des solutions de continuité sur la voie de roulement, c'est

pourquoi les intervalles $B'C$, $D'E'$ et autres sont fermés par des brins de câbles isolés.

Le train étant à cheval sur les deux premiers tronçons AB' et CD , le courant reviendra à la station par le tronçon CD , la liaison oblique CB et le tronçon AB : puis le chariot avançant, les roues d'avant et d'arrière passeront respectivement sur les tronçons isolés $B'C$ et $D'E'$; le courant sera un moment interrompu, mais le train franchira ces intervalles en vertu de la vitesse acquise et viendra chevaucher les sections CD et $E'F'$. Le courant pénétrera de la section positive $E'F'$ dans la roue d'avant et reviendra à la station par le même chemin que tout à l'heure : il traverse aussi le moteur, en sens inverse, mais comme le renversement se fait à la fois dans l'inducteur et l'induit, le sens de rotation du moteur n'est pas changé et le mouvement se continue ainsi jusqu'au bout de la ligne.

On peut faire circuler plusieurs trains à la fois sur le câble d'aller et sur le retour : les moteurs comme on le voit sont alimentés en dérivation et l'on maintient à cet effet une différence de potentiel constante aux bornes de la dynamo génératrice. Il faut prendre des précautions pour éviter qu'un train puisse atteindre ceux qui le précèdent sur le même câble ; à cet effet, chaque électromoteur est pourvu d'un régulateur à force centrifuge qui rompt le circuit, dès que la vitesse prend une valeur supérieure au taux normal.

248. Diverses applications mécaniques de l'électricité. —

L'une des applications les plus intéressantes de l'électricité, au point de vue industriel, est celle qui se rapporte à la transmission du mouvement aux machines-outils d'un atelier.

Les transmissions mécaniques comportent un attirail souvent considérable d'arbres principaux et intermédiaires, de poulies, courroies et roues d'engrenage, qui absorbent en pure perte, dans des frottements multiples et continus, une grande fraction de l'énergie développée par la machine motrice. Lorsque les ateliers sont très étendus

et présentent des salles distinctes plus ou moins éloignées, les transmissions se compliquent encore davantage par des dispositions d'engrenages d'angle, de câbles télédynamiques et d'appareils multiples de débrayage. On est souvent obligé de répartir la force motrice entre plusieurs machines, avec chaudières séparées et transport de vapeur, non sans pertes sensibles, dans les divers locaux de l'usine.

Tous ces inconvénients et ces complications disparaissent avec la transmission électrique. La puissance totale de l'usine peut être concentrée dans une salle unique de

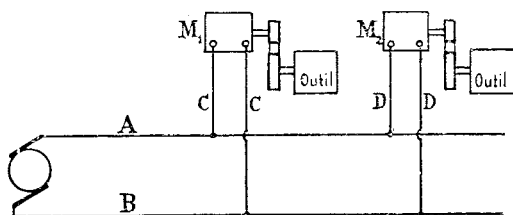


FIG. 456. — Plan d'une transmission électrique.

machines alimentées par la chambre de chauffe des chaudières contiguës. Cette puissance absorbée par une ou plusieurs dynamos génératrices, réunies dans la même salle, est alors transportée par de simples fils sur tous les points où la force motrice doit être utilisée.

Les conducteurs remplacent ainsi les arbres et les courroies des transmissions électriques. Dans la disposition représentée par la figure 456, chaque machine-outil est commandée par un moteur spécial M_1, M_2 qui vient recueillir l'énergie nécessaire par des fils de dérivation C.D branchés sur les conducteurs principaux A.B.

On pourrait encore adopter une solution mixte consistant à établir dans chaque salle un moteur électrique qui commande un arbre général actionnant les divers outils du même atelier; cette disposition permet d'utiliser les anciennes installations en remplaçant simplement les

moteurs à vapeur qui existaient précédemment par des moteurs électriques; ce qui a pour effet de supprimer les conduites de vapeur, en leur substituant des conducteurs de courant.

Des expériences comparatives faites par M. Hartman sur les transmissions électriques et mécaniques, il résulte en faveur des premières des économies variant de 12 à 33 pour 100 à pleine charge, de 17 pour 100 aux $\frac{3}{4}$ de charge et de 18 pour 100 aux $\frac{2}{3}$ de la charge maximum. Ces chiffres se rapportent à des transmissions électriques par groupes, utilisant les installations existantes, mais sur une transmission purement électrique par moteurs indépendants, l'économie peut atteindre de 48 à 62 pour 100.

Le rendement industriel d'une transmission de petits moteurs d'une puissance d'un quart de cheval environ peut être calculé en comptant des rendements successifs de 0,70 au maximum pour l'électro-moteur, 0,90 pour la ligne, 0,90 pour la dynamo génératrice et pour la transmission du moteur électrique à la machine-outil; on arrive ainsi à un rendement total de 51 pour 100.

Dans les transmissions à deux degrés comportant un arbre principal actionné par la dynamo et sur lequel les outils viennent recueillir leur force motrice, on peut admettre un rendement de 40 pour 100, mais avec une *durée d'utilisation* des machines-outils supposée égale à la durée totale de marche des transmissions.

Les résultats seraient évidemment supérieurs avec des moteurs d'un cheval et au-dessus, et l'avantage des transmissions électriques par moteurs isolés serait encore plus marqué par rapport à l'autre procédé.

Quoi qu'il en soit, tout système de transmission électrique améliore considérablement le rendement de l'installation, car les pertes dans les transmissions exclusivement mécaniques s'élèvent généralement aux taux de 40 à 70 pour 100.

Aujourd'hui on s'applique à établir les machines-outils spécialement en vue de la commande électrique, et chaque outil est accompagné de son électro-moteur spécial, placé

à côté de l'outil, ou fixé même sur le bâti de la machine dont il fait partie intégrante. Ces dispositions sont adaptées à tous les outils mécaniques, machines à percer, à raboter, meules, treuils, ascenseurs, monte-charges, cabestans, pompes, ventilateurs, machines à coudre et autres.

La transmission du mouvement du moteur électrique à l'outil se fait par courroies, engrenages, ou galets de friction agissant sur la jante du volant garnie de cuir.

L'installation doit être pourvue de dispositions mécaniques de débrayage et d'un *commutateur-rhéostat* pour la mise en marche et les changements de vitesse et de sens de rotation.

Nous donnerons quelques renseignements plus détaillés sur les ascenseurs et les ventilateurs électriques, qui exigent des dispositions spéciales au point de vue électrotechnique.

ASCENSEURS ÉLECTRIQUES. — Les systèmes employés sont de deux sortes; l'un met en œuvre un treuil électrique qui agit directement sur le câble de suspension de la cabine, l'autre une pompe commandée par un moteur électrique et qui refoule l'eau sous pression dans un réservoir supérieur, pour qu'elle soit utilisée dans un ascenseur hydraulique.

A la première catégorie appartient l'ascenseur du système Guyenet, représenté dans la figure 457. La cabine A, dirigée par les montants-guides B, est équilibrée par un contre-poids qui glisse entre les guides D et est soutenue par les cordes passant sur les deux poulies placées directement au-dessus de la cabine et dont les axes sont fixés sur la charpente métallique du beffroi C.

Les câbles moteurs de la cabine passent sur les trois poulies de renvoi placées latéralement sur le beffroi, et vont s'enrouler sur le tambour du treuil E, par l'intermédiaire des chariots directeurs I qui sont établis sur des consoles fixées sur le devant du bâti.

La dynamo F, boulonnée sur la partie antérieure du socle commun, actionne le pignon du train d'engrenage

par une vis sans fin qui forme le prolongement de l'arbre de l'armature. On voit, sur la face latérale de la machine, l'appareil de mise en marche comprenant un commutateur avec un rhéostat. L'axe du commutateur porte une poulie de commande sur laquelle passent les câbles II; ceux-ci sont amenés par des poulies de renvoi dans l'intérieur de

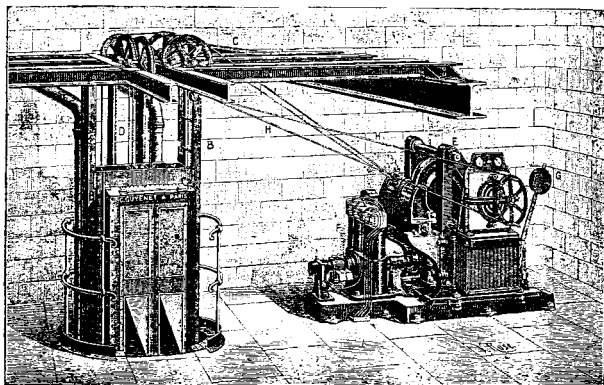


FIG. 457. — Ascenseur électrique Guyenet.

la cabine et sont ainsi à la portée de la main, pour actionner le rhéostat de manœuvre.

Enfin l'appareil comporte un frein automatique G placé à l'arrière et destiné à produire l'arrêt instantané de l'ascenseur.

Il existe actuellement un grand nombre de types d'ascenseurs, parmi lesquels il convient de citer spécialement les systèmes Edoux et Otis. Ces deux appareils comportent toujours un treuil électrique, un commutateur avec résistances graduées pour régler le courant au démarrage et à l'arrêt et une corde de manœuvre traversant la cabine et régissant sur toute la hauteur du parcours, de manière à ce qu'on puisse commander le commutateur, soit de l'intérieur de la cage, soit de tout autre point en dehors. L'ins-

tallation doit aussi être pourvue d'un frein efficace pour arrêter rapidement la cage à volonté.

Les ascenseurs mixtes, à eau et à l'électricité, comportent au lieu et place d'un treuil, une pompe de refoulement mue par l'électricité; l'eau sous pression qui a servi à une ascension, est rejetée dans une citerne d'où elle est aspirée par la pompe et élevée dans un réservoir établi dans les combles de la maison. Ce système a l'avantage de pouvoir s'appliquer sans modifications coûteuses aux installations hydrauliques existantes; il paraît être plus en faveur en France que le système à treuil électrique qui, lui, est presque exclusivement employé en Amérique.

VENTILATEURS. — Les moteurs électriques semblent tout spécialement destinés à actionner des ventilateurs; il suffit en effet de caler sur l'arbre de la dynamo les hélices ou les palettes de l'appareil, pour leur imprimer le mouvement rapide de rotation qui est celui même de l'organe

mobile de l'électro-moteur.

Les ventilateurs peuvent se répartir en deux classes: les ventilateurs d'appartements et les appareils industriels pour usines et ateliers.

Les premiers, qui s'appliquent

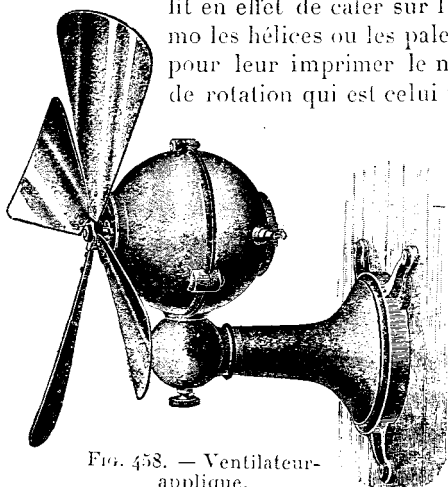


FIG. 458. — Ventilateur-applique.

contre les parois ou sont suspendus au milieu des pièces, ne sont à proprement parler que des agitateurs d'air, jouant simplement le rôle d'éventail. ils ne renouvellent pas l'air de la salle, ils ne font que brasser le même air vicié et ne produisent qu'une fraîcheur factice.

L'installation d'un véritable ventilateur comporte l'éta-

blissement d'ouvertures d'aspiration et de refoulement de l'air extérieur; l'appareil doit donc être fixé en face d'une baie ménagée dans la paroi de la pièce ou bien être pourvu de conduits d'aspiration et de refoulement faisant communiquer l'extérieur avec la salle à ventiler.

L'imagination des inventeurs a créé de nombreux types de ventilateurs, surtout des types de la première catégorie,

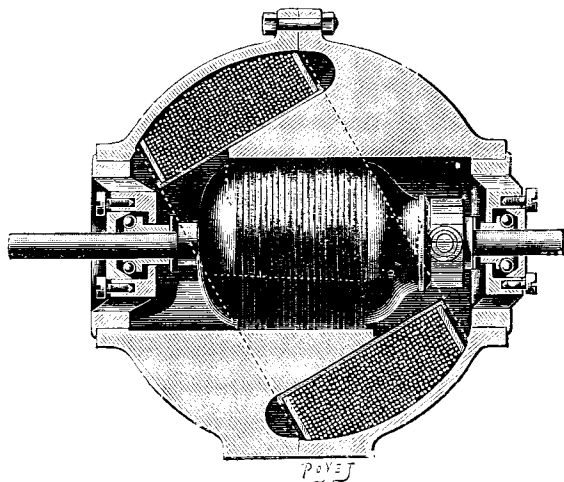


FIG. 459. — Coupe du moteur sphérique Lundell.

ventilateurs montés sur pieds ou sur applique; ventilateurs de plafond à grandes ailes, tournant autour d'un axe vertical rigide, ventilateurs suspendus par des chaînes; ventilateurs montés sur support animé d'un mouvement de giration ou ventilateurs-cyclones.

La figure 458 représente un ventilateur-applique actionné par un petit moteur sphérique de Lundell, qui, par sa grande simplicité de construction, mérite une description spéciale.

Comme le montre la figure 459, l'inducteur est formé de deux demi-sphères juxtaposées et ajustées par des brides

reliées par des boulons; chacune des parties de la carcasse sphérique porte l'une des pièces polaires; ces pièces sont venues de fonte, de telle manière que la bobine inductrice unique qui les entoure se trouve disposée suivant une inclinaison de 45 degrés sur l'axe de l'induit; il est ainsi très aisé, en ouvrant la carcasse magnétique, de visiter cette bobine et de la retirer au besoin.

L'armature de l'induit en tambour est formée de tôles minces et pourvue de rainures longitudinales où sont encastrés les fils induits; l'arbre tourne dans des paliers à billes, portés par la carcasse même de l'induit. Les balais, formés de deux crayons de charbon, sont maintenus en contact avec le collecteur par des ressorts à boudin, logés dans les douilles porte-balais.

Les ventilateurs électriques proprement dits, avec aspiration et refoulement, ne diffèrent pas généralement des ventilateurs ordinaires, mus par des moteurs mécaniques; ces derniers sont simplement remplacés par le moteur électrique. Toutefois, la plupart du temps, la commande se fait directement, les arbres de la dynamo et des ventilateurs étant placés en prolongement et raccordés par un manchon d'accouplement. Il arrive souvent aussi que le moteur électrique est fixé sur le bâti même du ventilateur qui doit être disposé spécialement à cet effet.

L'industrie fournit des ventilateurs pouvant atteindre des puissances de plusieurs chevaux et qui sont capables de débiter un très grand volume d'air, sous des pressions de colonnes d'eau de 15 à 130 millimètres. On peut compter sur un débit de 100 mètres cubes d'air par minute environ, aux vitesses angulaires de 800 à 2000 tours, par cheval électrique.

Parmi les autres applications mécaniques de l'énergie électrique, nous ne citerons que pour mémoire l'utilisation qui en est faite pour les usages domestiques; machines à coudre, à nettoyer les couteaux, à frotter les parquets, à cirer les chaussures, et beaucoup d'autres qui montrent avec quelle facilité les moteurs électriques se prêtent aux opérations mécaniques les plus diverses.

CHAPITRE XV

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

249. Radiations lumineuses et électriques. — Quand on élève la température d'un corps solide, il rayonne d'abord de la chaleur, puis au fur et à mesure que la température augmente, le corps devient de plus en plus lumineux. A 45 degrés l'objet émet déjà une faible lumière et les radiations lumineuses vont ensuite en croissant avec une extrême rapidité jusqu'à l'incandescence. Ainsi, on estime que la lumière émise par un solide incandescent est 46.000 fois plus intense à la température de 1200 degrés qu'à celle de 600 degrés.

La nature et la couleur des radiations lumineuses varient à mesure que la température s'élève, depuis le rouge naissant qui apparaît vers 500 degrés, jusqu'au blanc éblouissant qui correspond à la température de 1500 degrés.

On peut obtenir cette incandescence des solides de plusieurs manières, soit par les flammes éclairantes comme celles du gaz, qui résultent de l'incandescence des particules de carbone provenant de la décomposition des gaz carburés : soit en maintenant dans une flamme non éclairante par elle-même, un corps solide, tel qu'un bâton de chaux et de magnésie, comme dans la lampe Drumond, ou un manchon d'oxydes réfractaires, comme dans le cas du bec Auer; enfin le corps solide peut être porté à l'incandescence par le passage du courant électrique.

Dans la théorie moderne *des ondulations*, on admet que la lumière est le résultat des mouvements infiniment petits, mais très rapides, qui sont transmis à distance par l'intermédiaire d'un milieu parfaitement élastique, l'*éther* qui remplirait l'espace non occupé par la matière, dans toute l'étendue de l'univers et jusque dans le vide intermoléculaire.

Un ébranlement produit au sein de ce milieu élastique par une source d'énergie lumineuse, sera transmis de distance en distance par ondes successives, d'après un procédé analogue à celui de la propagation du son dans l'air, milieu beaucoup plus dense que l'éther et dont l'inertie ne se prêterait pas à la transmission des ondes lumineuses beaucoup plus rapides.

Le foyer lumineux joue donc vis-à-vis de l'éther le même rôle qu'une lame vibrante par rapport à l'air. Si l'ébranlement issu de la source d'énergie se produit dans un milieu indéfini, le mouvement vibratoire se propagera dans tous les sens, suivant des nappes sphériques dont le foyer sera le centre.

Pendant la durée ou *la période* d'un mouvement vibratoire, les couches d'éther ébranlées sont animées de mouvements alternatifs dont les vitesses varient d'une manière analogue aux courants des alternateurs et peuvent être représentées par des courbes semblables.

Dans la première partie de la période, la couche d'éther voisine de la source excitatrice est refoulée, par exemple, ou *condensée* suivant l'expression admise; dans la demi-période suivante, cette couche revient en arrière, formant une *onde dilatée*, grâce à son élasticité. Ces deux phases du mouvement vibratoire se développent sur l'étendue très limitée où se déplace chacune des masses *éthérées* qui se communiquent de proche en proche le choc initial du foyer vibratoire. C'est la longueur du champ d'évolution de chacune de ces masses vibrantes, dans la direction de la propagation du mouvement, à laquelle on donne le nom de *longueur d'onde*.

D'autre part, la décomposition de la lumière blanche

par le prisme nous montre dans le spectre solaire des radiations diversement colorées dont la vitesse de propagation dans l'espace est évidemment la même, puisque leur réunion forme un faisceau de rayons progressant ensemble pour constituer cette lumière blanche.

Leurs vibrations diffèrent cependant par l'amplitude ou la longueur d'onde; comme la distance de propagation, dans un temps donné, se compose de la somme des longueurs d'onde des ondulations progressives de l'éther, il est évident que le nombre des ondulations ou vibrations sera d'autant plus grand que les amplitudes ou longueurs d'ondes seront plus petites; or, c'est la fréquence plus ou moins grande de ces vibrations qui nous donne la perception des différentes couleurs.

Les longueurs d'onde des vibrations lumineuses sont infiniment petites, leur valeur s'exprime en *microns* ou millièmes de millimètre.

On a pu mesurer ces amplitudes, qui varient de 0,688 à 0,393 microns, en suivant toutes les raies du spectre du rouge au violet.

La vitesse de propagation de la lumière étant de 300.000 kilomètres environ par seconde, on en déduit facilement la fréquence ou le nombre de vibrations correspondant à chacune des radiations simples, en cherchant combien de fois la longueur d'ondulation correspondante est comprise dans ce chiffre commun à toutes les radiations; on trouve ainsi pour le rayon rouge, 435 trillions et pour le rayon violet, 764 trillions de vibrations par seconde.

Les ondulations de l'éther qui engendrent la chaleur ne diffèrent des ondulations lumineuses que par la longueur d'onde et le nombre des vibrations. La durée des ondulations calorifiques est trop lente pour faire vibrer la rétine, qui n'est sensible qu'aux vibrations rapides de l'éther. C'est donc l'œil qui fait lui-même une sélection parmi les nombreuses radiations du spectre, dont les unes dites *infra-rouges* ne manifestent que des effets calorifiques, les autres dites *ultra-violettes* des effets chimiques exclusivement, tandis que les radiations de moyenne réfrangibi-

lité constituent les seuls rayons lumineux visibles pour l'organe de la vue.

La lumière des lampes électriques n'est pas engendrée directement par le courant; celui-ci développe dans la résistance du conducteur qu'il traverse une quantité de chaleur relativement considérable, eu égard au faible volume dans lequel celle-ci est concentrée; il s'ensuit une grande élévation de température, qui détermine l'émission de radiations calorifiques obscures et de radiations lumineuses.

La somme des radiations calorifiques et lumineuses correspond à l'énergie totale dépensée dans la lampe; *le rapport de l'énergie des rayons lumineux à celle des radiations totales donne la mesure de l'utilisation de l'énergie dépensée*; on a trouvé, par l'emploi successif de calorimètres opaques et transparents, que ce rapport, dans le cas des lampes à arc voltaïque est environ de 0,1, tandis qu'il n'est que de 0,003 pour les flammes éclairantes.

Ces chiffres montrent la supériorité de l'éclairage électrique sur les autres sources de lumière artificielle; il n'en est pas moins vrai que la transformation de l'énergie électrique en énergie lumineuse est encore bien imparfaite, puisque les neuf dixièmes se dissipent en chaleur obscure, sans profit pour l'utilisation que l'on a en vue.

L'idéal serait donc de produire de la lumière sans dégagement sensible de chaleur, c'est-à-dire à basse température. La nature paraît avoir réalisé ces conditions, dans les phénomènes de *luminescence* remarqués chez la luciole cubaine dont le corps émet des lueurs correspondant aux radiations jaunes et vertes purement lumineuses, sans mélange de radiations de chaleur parasites.

Or, ensuite des expériences de Hertz et de Tesla, dont nous parlerons tout à l'heure, on peut prévoir que l'on arrivera à résoudre ce problème, d'amener les ondulations électriques des courants alternatifs à un degré de fréquence tel que ces ondes deviennent susceptibles d'impressionner la rétine, c'est-à-dire de produire directement des ondes lumineuses.

TUBES DE GEISSLER ET DE CROOKES. — Ces phénomènes de luminescence ont été produits tout d'abord dans les tubes de Geissler. Ces tubes, de formes variées, contiennent des gaz dont la pression a été réduite à quelques millimètres de mercure; à chaque extrémité sont soudés, dans l'épaisseur du tube, deux fils de platine dont le coefficient de dilatation est le même que celui du verre. Ces fils pénètrent en partie à l'intérieur de l'appareil; si l'on réunit les extrémités extérieures aux deux bornes de l'enroulement secondaire d'une bobine de Ruhmkorff, le tube s'illumine d'une clarté générale, qui paraît toutefois se concentrer plus particulièrement vers le pôle positif.

Le pôle négatif est entouré d'une auréole violette séparée du reste du milieu par un espace obscur. Pour un degré de vide déterminé, la masse lumineuse se découpe en bandes alternativement obscures et brillantes, formant ce que l'on désigne sous le nom de *lumière stratifiée*.

Cette luminescence a la propriété d'exciter la fluorescence des corps doués de cette propriété, tels que le verre d'urane et les solutions d'azotate d'urane et de sulfate de quinine.

Plusieurs savants, et parmi eux Crookes notamment, ont imaginé de pousser le vide, à l'intérieur des tubes fermés, de manière à amener les gaz intérieurs à un degré de raréfaction tel qu'ils paraissent être doués de propriétés nouvelles, résultant de la distance relativement grande qui sépare les molécules gazeuses; la matière raréfiée serait alors dans un quatrième état, différent de l'état gazeux et que Faraday a désigné sous le nom d'*état radiant*.

Les tubes de Crookes se présentent généralement sous la forme d'ampoules de verre plus ou moins allongées, pourvues d'un certain nombre d'électrodes de platine pénétrant à l'intérieur et pouvant se rattacher extérieurement aux pôles positif et négatif d'une bobine d'induction.

Ce qui caractérise principalement l'état radiant de la matière raréfiée, c'est que la décharge électrique de la bobine d'induction, au lieu de se propager comme dans les tubes de Geissler d'une électrode à l'autre, s'échappe du

pôle négatif ou *cathode* et traverse le milieu raréfié en ligne droite, comme le montre le pinceau lumineux qui illumine le chemin rectiligne de la décharge. Si l'on termine l'électrode négative par une petite calotte sphérique *a* (fig. 460), les rayons électro-lumineux partent normalement à cette surface et vont frapper directement en ligne droite la paroi opposée du tube.

Si l'on intercale sur l'axe de ce trajet rectiligne un écran *b*, en forme de croix de saint André, par exemple,

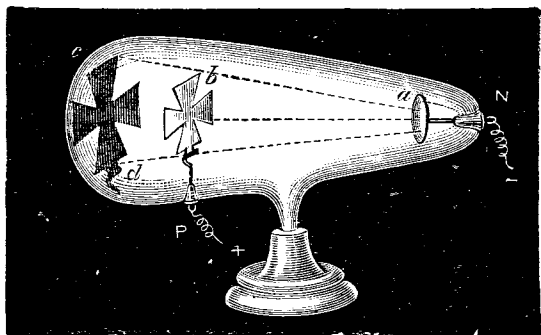


FIG. 460. — Ombre d'un écran portée par les rayons cathodiques.

on voit l'ombre *d* de cette croix se détacher en sombre sur le fond de l'ampoule, comme si elle était éclairée par un foyer lumineux placé en *a*.

Quand on fait basculer l'objet monté à charnière sur l'électrode positive recourbée à l'intérieur du tube, la partie de la paroi du verre soustraite précédemment à l'action des *rayons cathodiques* issus du pôle négatif, reste plus sensible à ces rayons que les parties voisines, et sa phosphorescence étant excitée d'une façon plus intense, une croix blanche apparaît, se détachant sur le fond plus sombre des parties avoisinantes.

Les rayons cathodiques ont la propriété de porter à une haute température les parois du tube ou les écrans de platine qu'ils viennent frapper dans leur trajet. Ils peuvent

produire également des mouvements mécaniques, comme on le démontre en plaçant à l'intérieur du tube une petite roue à palette dont l'axe roule sur deux rails parallèles, en s'éloignant de la cathode, sous l'action du souffle électrique qui en émane pour ainsi dire.

RAYONS DE RÖNTGEN OU RAYONS X. — C'est de la surface du verre ou de celle d'un écran en aluminium frappé par les rayons cathodiques, qu'émanent ces mystérieuses radiations découvertes par le Dr Röntgen et baptisées par lui du nom de *Rayons X*.

Ces radiations se propagent en ligne droite dans toutes les directions, à l'extérieur du tube; ils ont la faculté de provoquer la décharge des corps électrisés et d'exciter la phosphorescence de certains sels, tels que le tungstate de calcium et le platinocyanure de baryum; mais leur propriété la plus remarquable est celle de traverser des corps réputés opaques pour les rayons ordinaires et notamment les tissus purements organiques.

Nous avons vu que les rayons cathodiques étaient arrêtés par les corps dits opaques; en outre, ces rayons sont déviés à l'intérieur du tube, en présence des pôles d'un aimant; ceux-ci au contraire n'ont aucune action sur les rayons X émis par la paroi du verre rencontrée par les rayons cathodiques.

Enfin les rayons X sont doués, comme les rayons ultraviolets du spectre, de la faculté d'impressionner les plaques photographiques. C'est sur ces données que sont basées les opérations de la *radiographie* dont on a fait une si heureuse application à l'exploration du corps des animaux et notamment du squelette humain.

Que l'on interpose la main ouverte entre le tube de Crookes en activité et une plaque sensible, les rayons X seront plus ou moins interceptés par les os du squelette qui, grâce aux substances minérales qu'ils contiennent, sont beaucoup moins transparents pour ces rayons; les muscles seront au contraire facilement traversés par les radiations de Röntgen qui projetteront sur la plaque photographique l'ombre du squelette; on obtiendra donc, au

développement de la plaque sensible, la silhouette des os de la main, en gris sur le fond noir du tableau.

On a beaucoup amélioré la puissance radiographique des rayons X, en construisant des tubes de Crookes dits *focus*, dans lesquels la cathode sphérique et concave concentre les rayons cathodiques à l'intérieur du tube, sur un écran de platine où aboutit l'anode; les rayons X émanent comme d'un foyer de ce corps métallique qui, plus que tout autre, est capable de transformer ainsi les radiations cathodiques.

OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES. *Expériences de Hertz et de Tesla.* — Les masses gazeuses raréfiées à l'intérieur du tube de Crookes, semblent jouer un rôle analogue à celui des couches d'éther ébranlées par une source d'énergie vibratoire. Celle-ci est constituée, dans l'espèce, par les décharges successives des électrodes reliées aux bornes de la bobine secondaire de Ruhmkorff. Suivant l'hypothèse admise, ces oscillations électriques se communiqueraient à la matière radiante dont les molécules lancées comme de petits projectiles, venant se heurter entre elles ou se buter contre les parois du tube, déterminent, par cette sorte de *bombardement moléculaire*, une élévation de température qui porte les parois du tube et les molécules elle-mêmes à l'incandescence radiante.

On peut imaginer que si ces molécules étaient animées de mouvements vibratoires d'une fréquence comparable à celle des vibrations lumineuses, les phénomènes observés dans les tubes de Crookes prendraient une intensité beaucoup plus grande; le milieu radiant étant supposé capable de vibrer suivant la même loi que la décharge excitatrice, il faudrait multiplier les interruptions de manière à produire des courants alternatifs à très haute fréquence.

Pour obtenir ce résultat, Hertz a mis à profit les propriétés des décharges oscillatoires des condensateurs. On peut comparer les deux armatures d'un condensateur chargé, présentant entre elles une différence de potentiel déterminée, aux capacités de deux vases remplis jusqu'à des niveaux différents. Si l'on réunit les deux vases par un

tuyau, le vase à niveau le plus élevé se déchargera dans l'autre et il s'établira un courant qui, suivant les circonstances, pourra être continu et de même sens jusqu'à ce que l'égalité des niveaux soit établie, ou au contraire oscillera, entre les deux réservoirs, alternativement dans un sens et dans l'autre, pour arriver à l'équilibre final.

Lorsque le tuyau de communication oppose une résistance suffisante à l'écoulement du liquide, en raison de sa forme et de ses dimensions, que la viscosité du liquide est de nature à retarder le mouvement, en même temps que la grandeur de la capacité tend à maintenir le régime régulier de l'écoulement, l'équilibre s'établit sans oscillation ; mais si la fluidité du liquide et la faible résistance du tuyau facilitent le mouvement, pour des réservoirs qui présentent d'autre part une faible capacité, le liquide pourra prendre une telle accélération qu'il dépassera le niveau d'équilibre dans le second vase et celui-ci se trouvera ainsi plus chargé que le premier ; il s'ensuivra donc une décharge inverse par laquelle le liquide dépassera encore le niveau normal dans le premier vase et ainsi de suite, jusqu'à ce que l'équilibre soit établi.

Pour les condensateurs, la résistance du tuyau, la viscosité du liquide et la capacité sont remplacées par la résistance du circuit extérieur de connexion entre les deux armatures, par la self-induction de ce circuit et par la capacité du système.

Le phénomène électrique de la décharge est cependant plus complexe que dans le cas des décharges hydrauliques, car il dépend en réalité des valeurs relatives de la capacité et de la self-induction par rapport à la résistance du circuit.

On démontre que la fréquence ou le nombre n d'oscillations par seconde est donné par la relation :

$$2\pi \times n = \sqrt{\frac{1}{C \times L} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

formule dans laquelle C est la capacité du condensateur exprimée en farads, R la résistance du circuit en ohms, et L l'inductance en henrys. Les deux termes sous le signe de la racine carrée se retranchant l'un de l'autre, il est évident que n sera nul et par suite que la décharge sera continue, non oscillatoire, si ces termes sont égaux, de telle sorte que l'on ait :

$$\frac{1}{C \times L} = \frac{R^2}{4 L^2} \text{ ou } R = \sqrt{\frac{4 L}{C}}$$

D'autre part, le terme négatif $\frac{R^2}{4 L^2}$ doit toujours rester inférieur au premier, pour que n ait une valeur réelle, car il n'existe pas de racine carrée d'un nombre négatif ; en conséquence, il se produira des oscillations, si l'on a :

$$R \text{ plus petit que } \sqrt{\frac{4 L}{C}}$$

et les oscillations seront nulles, c'est-à-dire que la décharge se fera d'une manière régulière et continue pour le cas où

R l'emporterait sur $\sqrt{\frac{4 L}{C}}$

Dans le cas de la décharge vibratoire, les oscillations vont constamment en s'atténuant, de telle sorte que la décharge est complète après un certain nombre d'oscillations de plus en plus faibles.

Le nombre des oscillations de la décharge par seconde et par suite la période, dépendent donc des trois quantités C, L et R. En faisant varier convenablement les valeurs respectives de ces quantités, Hertz a pu élever le nombre des oscillations à 30 billions par seconde et de nouveaux expérimentateurs ont atteint 50 billions. Inversement, en employant des condensateurs de grande capacité, Lodge a réduit le nombre à 400, de manière à ramener les oscillations dans la limite des vibrations sonores, c'est-à-dire perceptibles à l'ouïe ; les étincelles de la décharge oscillante émettaient alors une onde musicale.

La figure 461 montre la disposition employée par Hertz pour produire des décharges oscillantes de grande fréquence, mais le fait dominant des expériences de Hertz

consiste en ceci, que ces décharges produisent dans le milieu ambiant un ébranlement vibratoire dû à des ondes électriques jouissant de propriétés analogues à celles des radiations calorifiques et lumineuses.

L'appareil consiste en deux sphères A et B pouvant coulisser sur deux tiges métalliques, terminées aux extrémités en regard par deux petites boules conductrices; les deux tiges sont reliées respectivement aux pôles secondaires d'une bobine de Ruhmkorff; ce système a reçu le nom de *vibrateur* ou d'*excitateur*.

A chaque émission de courant, les sphères A et B sont chargées et portées à des potentiels différents, une étin-

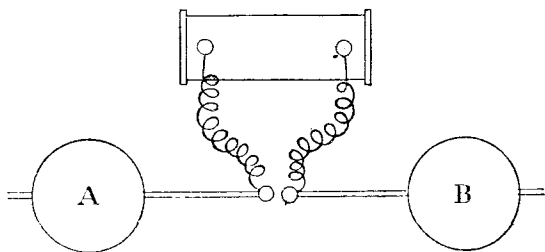


FIG. 461. — Expériences de Hertz.

celle jaillit entre les boules de l'excitateur et ouvrent la voie aux étincelles suivantes de la décharge oscillante.

Pour déceler les ondulations que ces oscillations électriques provoquent dans le milieu ambiant, Hertz se servit d'un appareil très simple, qu'il nomma *résonnateur* et qui consistait en un fil métallique contourné en forme d'anneau brisé, dont les extrémités rapprochées à faible distance, sont terminées par deux boules analogues à celles du vibreur.

Si l'on dispose le résonnateur dans le voisinage du vibreur et suivant un plan perpendiculaire à l'étincelle oscillante, on n'observe aucun phénomène; mais si on l'oriente dans un plan passant par les tiges du vibreur et notamment de telle sorte que la ligne joignant les deux

boules du résonnateur soit parallèle à l'étincelle excitatrice, on voit jaillir sans interruption entre les deux extrémités de l'appareil explorateur, des étincelles induites qui correspondent aux ondes électriques se propageant perpendiculairement au déplacement des étincelles excitatrices.

En fait, ce sont des ondes électro-magnétiques qui sont rayonnées dans le milieu ambiant par le courant oscillatoire, les ondes électriques étant accompagnées d'ondulations magnétiques qui engendrent des courants et des étincelles induites dans le résonnateur.

De pareilles ondes sont interceptées par des écrans métalliques, placés en face du vibreur, et le résonnateur disposé derrière cet écran n'est pas plus affecté par les ondes électriques, qu'un corps quelconque n'est éclairé par les rayons d'un foyer lumineux interceptés par un écran opaque; au contraire les ondes électriques traversent les corps isolants, tels qu'un écran d'ébonite ou les murs en pierre de la salle contenant le vibreur.

Bien que ces ondulations aient encore une longueur d'onde bien plus grande que les vibrations lumineuses, leur vitesse de propagation est la même que celle de la lumière et elles possèdent les mêmes propriétés, étant susceptibles d'être réfléchies, réfractées, polarisées et interférées.

Quand on dispose un fil métallique perpendiculairement à l'axe du vibreur, on constate que tout se passe comme si les ondes électriques se propageaient, non dans l'intérieur du fil, mais tout le long de celui-ci et dans l'air qui l'entoure. Ainsi la conductibilité du conducteur n'intervient plus dans la propagation des courants à grande fréquence et, à ce point de vue, la résistance d'un conducteur de cuivre de gros diamètre, est comparable à celle du trajet dans l'air: c'est pourquoi ces phénomènes comportent en même temps l'emploi de très hautes tensions.

Tesla a cherché à obtenir des courants alternatifs de grande fréquence et de haute tension par le dispositif suivant (fig. 462). Celui-ci comporte un transformateur I: un

excitateur e , à boules s ; deux condensateurs Co ; un second transformateur Tr' et un excitateur ou vibreur E .

On lance un courant alternatif de fréquence ordinaire dans le circuit primaire Al du premier transformateur; le courant secondaire induit traverse l'espace ss des premiers excitateurs sous forme d'une étincelle que l'on brise à l'aide d'un soufflé d'air ou du soufflé magnétique d'un puissant électro-aimant; ces ruptures très rapides multiplient ainsi la fréquence; mais à chaque interruption, le courant passe dans les condensateurs Co qui se chargent et se déchargent dans le circuit primaire du second transformateur, lequel est relié en A et B aux armatures extérieures des condensateurs.

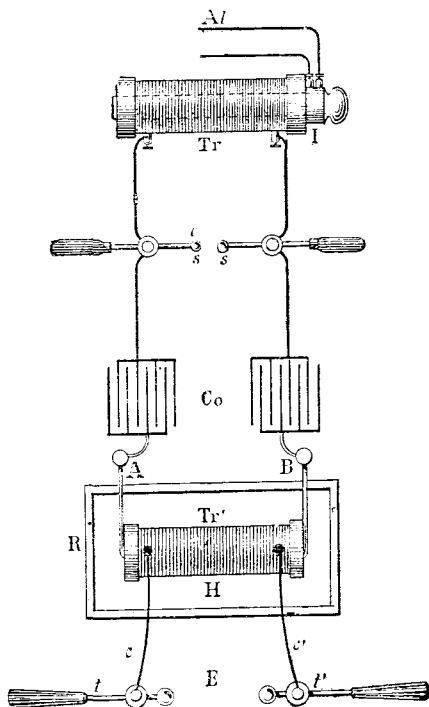


FIG. 462. — Appareil de Tesla pour l'obtention de courants de grande fréquence et de haute tension.

Les décharges oscillantes à grande fréquence traversant la bobine primaire de Tr' développent par induction dans le circuit secondaire des courants ondulatoires à

très haute tension et d'une fréquence considérable.

Ces courants ondulatoires très rapides produisent des phénomènes physiologiques et physiques des plus remarquables; ces vibrations peuvent exciter l'électrode d'une lampe à incandescence constituée par un simple crayon de charbon et mise en communication avec l'un des pôles de la bobine à grande fréquence; ces lampes unipolaires sont portées à l'incandescence par les vibrations directes qui les pénètrent.

Un observateur peut, sans en éprouver aucune sensation perceptible, se mettre en rapport avec les deux pôles de la bobine; une série de lampes intercalées entre deux observateurs, respectivement en communication avec chacun des pôles, s'illumine sous l'influence des ondulations rapides.

Tesla imagine un tube droit sans électrodes où le vide est poussé jusqu'à l'état radiant des tubes de Crookes; cet appareil tenu d'une main par un observateur touchant de l'autre l'un des pôles de la bobine, s'illumine d'une manière éclatante.

On peut même déterminer l'illumination de tubes de Geissler, de Crookes ou de Tesla, sans qu'ils soient mis en communication même indirectement avec la bobine, en les plaçant dans le champ ondulatoire créé par une plaque horizontale reliée à l'un des pôles de la bobine, entre cette plaque et le sol.

On voit par cette étude les analogies évidentes qui existent entre les vibrations électriques et les vibrations lumineuses; les lampes unipolaires jouent pour ainsi dire le rôle de transformateurs de fréquence, et l'on pourra se passer de cet intermédiaire lorsqu'on sera arrivé à produire, par des moyens électriques ou autres, des ondulations aussi rapides que les vibrations lumineuses.

250. Lampes à incandescence. — L'éclairage électrique par incandescence est basé sur la transformation, dans un conducteur relativement résistant, de l'énergie d'un courant électrique en énergie calorifique portant le conducteur à la température du blanc éblouissant.

Il faut donc que le conducteur lumineux soit suffisamment réfractaire pour ne pas fondre à cette température ; qu'il ne soit pas susceptible de se désagréger à la chaleur et qu'il soit doué en même temps d'un pouvoir émissif très élevé.

On a essayé d'utiliser le platine pour la fabrication des lampes, mais ce métal se désagrège rapidement à haute température.

Le corps le plus employé est le charbon, sous forme de filament très ténu ; il a été appliqué pour la première fois à la fabrication des lampes par Edison, qui eut l'idée de substituer aux fils métalliques un filament de bambou calciné à une température élevée.

Depuis, d'autres matières premières ont été utilisées ; le procédé général consiste à carboniser en vase clos, c'est-à-dire à l'abri du contact de l'air, des fibres de cellulose naturelle ou artificielle.

Les filaments, au sortir du creuset, sont soumis à l'opération du *nourrissage* ou *renforcement* qui consiste à faire passer un courant dans le filament placé dans un flacon où l'on maintient un vide partiel, après l'avoir plongé préalablement dans une atmosphère d'hydrocarbure gazeux. A la haute température développée par le passage du courant, les hydrocarbures absorbés se décomposent et le carbone se dépose principalement sur les parties du fil de plus faible section dont la température est plus élevée, en raison de leur résistance plus grande ; on obtient ainsi un filament de section régulière, présentant une surface dure et homogène.

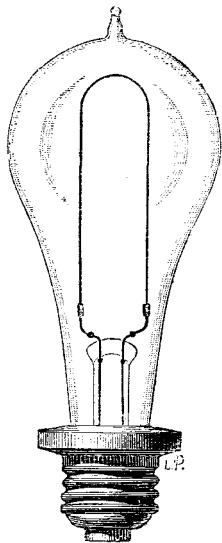


FIG. 463. — Lampe Edison.

Le charbon incandescent brûlerait rapidement à l'air en se transformant en acide carbonique, il faut donc l'enfermer dans une ampoule de verre, où le vide est fait jusqu'à la pression réduite de $0^{\text{mm}}01$ à $0^{\text{mm}}02$ de mercure (fig. 463).

Pour donner plus de rigidité au filament et en même temps pour répartir l'intensité lumineuse dans un foyer plus compact, on donne généralement au filament une forme courbe; dans la lampe Edison le fil de charbon affecte celle d'un U renversé.

Le filament ainsi préparé est soudé à deux fils de platine par divers procédés; dans les premières lampes Edison la

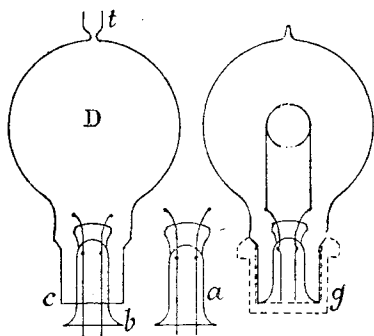


FIG. 464. — Construction de la lampe.

soudure s'obtenait par un dépôt galvanoplastique de cuivre; on peut encore employer le même procédé que pour le nourrissage, en plongeant les parties en connexion dans un hydrocarbure liquide et faisant arriver un courant, de part et d'autre des points de jonction, à l'aide de pièces métalliques; le plus généralement, on enrobe le joint d'une pâte charbonneuse qui est ensuite séchée, puis carbonisée.

Les fils de platine ont seulement la longueur nécessaire pour traverser le tube de verre *a* qui doit servir de support au filament (fig. 464); ils sont empâtés dans la partie supérieure du tube qui est écrasé après avoir été ramolli à la lampe; les fils de platine sont prolongés à l'extérieur par des fils de cuivre qui servent à établir la connexion entre le filament et le circuit de distribution.

Le tube élargi à la base *b* est ensuite soudé à la lampe sur les bords *c* de l'ampoule D; celle-ci est surmontée d'une tubulure *t* que l'on met en communication avec la machine pneumatique destinée à effectuer le vide dans l'appareil. Pendant que l'on procède à l'extraction de l'air, on soumet le filament à un courant progressivement croissant, dans le but d'expulser l'air occlus dans les pores du filament et qui aurait l'inconvénient, non seulement de brûler en partie le charbon, mais encore de le désagréger en faisant éclater les couches superficielles sous l'effet de la dilatation.

La base de l'ampoule est scellée dans une capsule de laiton *g* avec du plâtre que l'on coule à l'intérieur. Cette capsule porte latéralement une vis estampée qui viendra se visser dans une douille filetée, ou bien elle est pourvue simplement de deux tenons permettant de fixer la lampe dans une douille à baïonnette. Dans le premier cas, les fils de cuivre en prolongement des fils de platine, sont soudés l'un à la capsule, l'autre à un plot de laiton noyé dans le plâtre et isolé de la première partie.

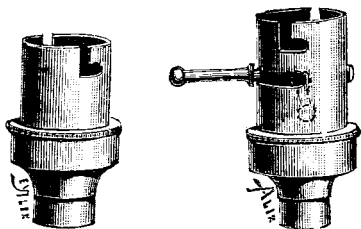


FIG. 465.— Supports à baïonnette.

Le support à baïonnette (fig. 465) comporte deux contacts à ressort qui pressent respectivement contre deux plots isolés à la base de l'ampoule et qui, par leur pression, maintiennent en même temps celle-ci dans le joint à baïonnette. La disposition de la figure de droite constitue une douille à clef ou à interrupteur permettant d'allumer et d'éteindre la lampe à volonté.

M. Bernstein a imaginé des lampes à faible résistance et par suite à bas voltage destinées à être alimentées sur des circuits en série (fig. 466). Le filament *a* est constitué par un crayon de pâte de charbon; il est soutenu hori-

zontalement par des tiges métalliques $b\ b$, qui servent de conducteurs au courant.

Comme ces lampes sont destinées à être disposées en grand nombre sur un seul circuit, il convient de parer aux conséquences de l'extinction de l'une d'elles. A cet effet, les tiges du support sont continuellement sollicitées à se rapprocher par un ressort r isolé des tiges en $f\ f_1$. Si le crayon de charbon vient à se briser, le circuit se ferme par le contact qui s'établit immédiatement en K .

Les lampes à incandescence le plus généralement employées ont des intensités lumineuses variant de 1 à 20

bougies ; mais on a construit des lampes de grande intensité pouvant atteindre 100 bougies et plus ; telles sont les lampes Sunbeam, qui peuvent donner de 200 à 1500 bougies. Ces lampes à grande intensité sont peu employées, car elles sont généralement plus fragiles que les lampes de faible et moyenne intensité, et leur rendement est toujours inférieur aux lampes à arc, qui fournissent le même éclairage à un prix bien plus économique.

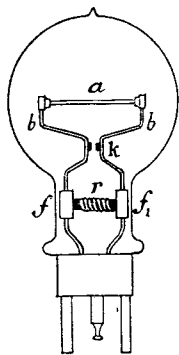


FIG. 466. — Lampes
Bernstein.

Nous ne parlerons que pour mémoire des lampes portatives qui, ne pouvant être en communication avec un réseau de fils conducteurs, doivent demander leur énergie à un réservoir électrolytique ou pile faisant partie intégrante de l'appareil ; la satisfaction de s'éclairer à l'électricité n'est pas une compensation suffisante du prix élevé et des dangers pouvant résulter de l'épanchement des liquides corrosifs qui sont inhérents à cet éclairage.

Il convient toutefois de citer la lampe Trouvé qui présente des dispositions bien étudiées et très ingénieuses pour réaliser l'allumage et l'extinction automatique de la lampe, ainsi que pour la protéger et éviter le renversement de l'appareil.

Ce système peut être employé comme lampe de sûreté pour pénétrer dans les locaux contenant des matières inflammables et notamment pour la recherche des fuites de gaz. La lampe peut fournir l'éclairage d'une bougie pendant 15 heures ou de trois bougies pendant 5 heures.

LAMPE A INCANDESCENCE DE NERNST. — Le professeur Nernst reprenant un essai fait par Jablochhoff, lors de l'Exposition de 1881, est parvenu à réaliser une lampe pratique à rendement très élevé, en substituant au filament de charbon une tige de matière réfractaire telle que la magnésie.

Un pareil corps n'est pas conducteur à la température ordinaire, mais, contrairement à ce qui se passe pour le charbon, sa conductibilité augmente à mesure qu'on le chauffe.

Il faut donc soumettre la tige de magnésie à un chauffage préalable qui s'obtient à l'aide d'une spirale de platine entourant la tige réfractaire, et qui reçoit le courant initial. Lorsque le rayonnement calorifique a porté cette tige à une température suffisante, le courant la traverse à son tour et un électro-aimant écarte la spirale de platine de manière à dégager complètement le corps rayonnant.

La lampe Nernst fonctionne à plus haut voltage que les lampes ordinaires, ce qui permet de réduire les sections des conducteurs et par suite de réaliser des économies sur l'établissement du réseau de distribution. La tige de magnésie, comme toutes les matières réfractaires, peut d'ailleurs supporter des températures très élevées, qui amèneraient rapidement la destruction des filaments de charbon; son rendement lumineux est donc notablement plus considérable et son éclairage plus économique.

251. Lampes à arc voltaïque. — Lorsque deux conducteurs reliés respectivement aux deux pôles d'une source d'électricité sont placés bout à bout, le courant électrique ne peut s'établir, tant que ceux-ci n'ont pas été amenés en contact, du moins dans les conditions de voltage ordinaires; il faut

en effet des milliers de volts pour faire franchir à l'étincelle électrique un intervalle d'air si faible soit-il.

Cependant les lampes à arc voltaïque sont basées sur la production d'une étincelle jaillissant en trait lumineux continu entre deux pointes de charbon, laissant entre elles un espace de quelques millimètres, sans que la tension employée soit supérieure à 50 volts.

Pour se rendre compte de ce phénomène, il suffit d'analyser l'expérience de Davy qui le premier, en 1813, fit jaillir l'étincelle électrique entre deux conducteurs de charbon. Ce savant ayant préalablement mis en contact deux crayons de charbon de bois reliés aux pôles d'une pile puissante, constata, en écartant progressivement les charbons, que les extrémités en contact s'échauffaient de plus en plus et qu'une fois la séparation faite, le courant se maintenait en franchissant l'intervalle, sous forme d'une étincelle ou plutôt d'un flux de gaz incandescent, présentant sous l'action du courant d'air chaud ascendant, une arcade très prononcée qui lui fit donner le nom d'*arc voltaïque*.

Par suite de la résistance notable que présente le contact imparfait des charbons, les extrémités des crayons sont portées à la température de l'incandescence et même de la volatilisation du carbone. L'espace ambiant s'échauffe par la chaleur rayonnée, et l'air devenant plus conducteur en ce point peut livrer passage à l'électricité, après que l'écartement a amené la rupture du circuit.

Mais à ce moment un nouveau phénomène vient encore améliorer la conductibilité entre les pointes des charbons. On constate en effet un transport très actif de particules de charbon, arrachées du charbon positif, vers le charbon négatif : cette poussière de carbone incandescent et réduite même à l'état de vapeur, établit un pont relativement conducteur entre les extrémités des électrodes de charbon en regard.

Le charbon de bois a été remplacé plus tard, sur les indications de Foucault, par des baguettes taillées dans les blocs du *charbon de cornue* qui se dépose sur les parois intérieures des cornues pendant la distillation de la

houille. Ce charbon est plus dur, plus compact, meilleur conducteur, et s'use moins vite que le charbon de bois.

Aujourd'hui on préfère des charbons obtenus artificiellement, en calcinant à haute température une pâte composée de charbon de coke en poudre et de noir de fumée, agglomérés par un sirop de gomme et de sucre très concentré.

L'aspect de l'arc varie suivant qu'il est alimenté par un courant continu ou par un courant alternatif. Dans le premier cas, le charbon positif que l'on place généralement à la partie supérieure, se creuse en forme de *cratère* (fig. 467) : le négatif au contraire, à la partie inférieure, se taille en tronc de cône ; ces circonstances sont dues au transport beaucoup plus abondant des particules de carbone dans le sens du courant, c'est-à-dire du charbon positif au charbon négatif.

M. Violle estime que la température du cratère est invariable, quelle que soit l'intensité du courant et qu'elle peut être évaluée à 3.500° , chiffre qui correspond au point de vaporisation du carbone.

L'arc a une température encore plus élevée que M. Rosetti évalue à 4.800° , et cependant son intensité lumineuse est très faible, car le pouvoir émissif des gaz et des vapeurs est très inférieur à celui des corps solides. Aussi, l'on estime que, sur la quantité totale de lumière fournie par

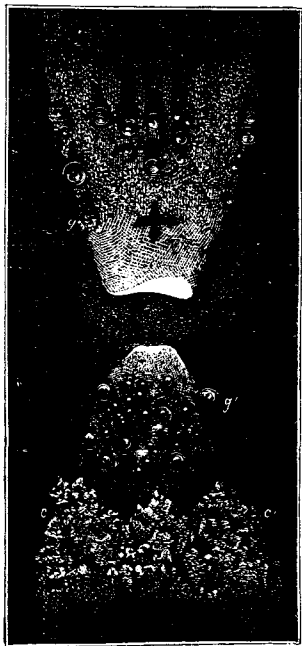


FIG. 467. — Arc voltaïque.

la lampe à arc, 5 pour 100 seulement sont dus à l'arc lui-même, 10 pour 100 au crayon négatif, et le reste, soit 85 pour 100 au cratère positif.

La différence de potentiel minimum à appliquer entre les deux charbons est de 25 à 30 volts, mais avec une tension ainsi réduite l'écartement ne dépasse pas 1/2 millimètre et l'arc devient très instable ; en effet, le champignon qui se forme à la pointe négative ne peut se consumer, le trop grand rapprochement ne permettant pas l'accès suffisant de l'air, et les charbons ne tardent pas à se souder, puis une rupture intervenant, les crayons s'écartent brusquement et le fonctionnement de l'éclairage est pratiquement impossible.

Un arc, pour être stable, doit avoir une longueur de 2 millimètres, qui exige une différence de potentiel aux bornes de la lampe de 40 à 45 volts.

On constate que cette tension E n'est pas proportionnelle à l'intensité du courant et à la résistance de l'arc ; elle se répartit en deux chutes de tension, l'une résultant de l'application ordinaire de la loi d'Ohm, l'autre qui est constante, quelle que soit la longueur de l'arc, et qui paraît employée à faire équilibre à une certaine force contre-électro-motrice e , ayant son siège dans l'arc lui-même ; on pourra donc écrire :

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

Cette expression se met souvent sous la forme :

$$E = e + b \times l$$

en désignant par l la longueur de l'arc en millimètres et par b la chute de tension par millimètre de longueur.

Cette force contre-électro-motrice, qui joue le même rôle que la force électro-motrice de polarisation dans les piles, serait due, d'après Thompson, à la chute de potentiel correspondant au travail, absorbé par le passage du carbone de l'état solide à l'état gazeux ; mais les savants ne sont pas encore bien fixés sur la cause véritable de cette force contre-électro-motrice.

On peut admettre qu'en moyenne, pour un arc de 4 à 5 millimètres de longueur, avec une intensité de courant de 8 à 10 ampères, la différence de potentiel aux bornes est de 42 volts; dans ces conditions, l'usure totale des charbons est de 4 à 5 centimètres à l'heure.

Les lampes à arc à faibles courants, de 1 à 2 ampères, exigent des mécanismes régulateurs très délicats qui en restreignent considérablement l'emploi.

On distingue trois espèces de crayons : les charbons durs, à mèche et métallisés. Les charbons durs, par opposition aux charbons à mèche, sont ou des charbons de cornue ou des agglomérés de coke en poudre et de goudron ou de sirop de gomme et de sucre. Les poudres sont soumises à des broyages et malaxages très soignés, puis à des cuissons répétées : la forme des crayons est obtenue soit par compression dans des moules à des pressions de plusieurs centaines de tonnes, soit par le passage à la filière où la pâte est forcée à l'aide d'une presse hydraulique.

Les charbons à mèche ou à âme sont obtenus en disposant dans l'axe de la filière une baguette d'acier qui oblige la pâte à passer par le vide annulaire resté libre ; on obtient ainsi un crayon de charbon présentant suivant l'axe un vide cylindrique ; celui-ci est ensuite rempli d'une composition de charbon, moins dure et plus conductrice que le corps extérieur du crayon. Ces charbons à mèche sont généralement employés comme crayons positifs des lampes à arc à courant continu, on leur donne alors un diamètre double de celui du crayon négatif qui est constitué par un charbon dur.

Les charbons métallisés, qui sont surtout employés en Amérique, sont des crayons recouverts d'un dépôt galvanique, de cuivre ou de nickel ; ils sont ainsi rendus plus conducteurs et en outre leur usure est moins rapide.

Les charbons durs ont une conductibilité plus grande que les charbons tendres : ils se consomment moins vite d'autre part, mais ils donnent moins de lumière à diamètre égal que les charbons tendres.

Les diamètres des crayons doivent être appropriés à l'intensité du courant ; si le diamètre est trop faible, les extrémités des charbons portées à l'incandescence brûlent sur une grande longueur et l'arc est très instable ; il est reconnu d'autre part que, dans certaines limites, on gagne d'autant plus en lumière que le diamètre est plus petit.

En général, on admettra des diamètres de 8 à 20 millimètres pour des intensités de courant variant de 4 à 25 ampères. Comme résistance moyenne, on pourra adopter le chiffre de 50 ohms pour un crayon de charbon de 1 mètre de long et de 1 millimètre de diamètre.

ARC A COURANTS ALTERNATIFS. — Dans le cas d'alimentation par courants alternatifs, les deux crayons s'usent à peu près également et envoient respectivement vers le haut et vers le bas des quantités de lumière équivalentes. Si l'on veut augmenter l'intensité de l'éclairement vers le bas, on adapte, autour du crayon supérieur, et légèrement au-dessus du foyer, une bague émaillée formant réflecteur.

Les arcs à courants alternatifs fonctionnent avec une tension inférieure à celle des arcs continus ; il suffit en effet de 25 à 35 volts pour les premiers, alors que les seconds exigent de 40 à 45 volts.

Il se produit généralement un décalage, du fait de l'arc alternatif, entre le courant et la différence de potentiel aux bornes de la lampe ; il s'ensuit que l'énergie réellement absorbée par la lampe, n'est pas égale à l'énergie apparente, mais à celle-ci réduite suivant un certain facteur de puissance qui se rapproche de 90 pour 100.

On a reconnu qu'à dépense d'énergie égale, les arcs à courants alternatifs donnent un éclairement inférieur de 20 pour 100 environ à celui des arcs à courant continu.

ARC EN VASE CLOS. — Depuis quelque temps on a imaginé d'enfermer les arcs dans un vase n'offrant qu'un difficile accès à l'air, de sorte que la combustion des charbons, dans une atmosphère privée d'oxygène, soit suffisamment ralentie pour réduire notablement l'usure des

crayons. On est ainsi arrivé à porter la durée des charbons jusqu'à 100 et 200 heures.

Ces arcs fonctionnent avec des différences de potentiel aux bornes de 80 à 85 volts, en courants continus, et de 65, en courants alternatifs, avec des arcs de 7 à 8 millimètres.

Ces lampes sont avantageuses au point de vue de l'entretien et de la simplification du mécanisme régulateur; mais on conçoit que leur rendement lumineux soit notablement inférieur à celui des lampes à air libre, dont la combustion est beaucoup plus vive; en outre, le vase clos occasionne une nouvelle absorption de lumière qui s'accroît encore des effets de dépôt, sur les parois du vase, des particules de charbon volatilisées qui échappent à la combustion.

252. Régulateurs à arc voltaïque. — Nous avons vu que les conditions à réaliser pour obtenir l'arc électrique consistent, en premier lieu, à amener les charbons au contact, puis à les écarter pendant que le courant passe, de manière à faire jaillir l'arc, enfin à maintenir à une distance constante les deux pointes des charbons, malgré l'usure résultant de leur combustion.

Ces diverses opérations peuvent s'exécuter à la main, pour une lampe unique destinée à des projections, par exemple, mais dans la plupart des applications et quand il s'agit de l'éclairage d'une ville notamment, il faut avoir recours nécessairement à des appareils de réglage automatique que l'on désigne sous le nom de *régulateurs*.

Ces régulateurs sont toujours constitués en principe par des électro-aimants agissant sur des armatures ou des solénoïdes attirant leurs noyaux de fer doux.

Avec l'action des électros, on combine celle du poids du charbon supérieur et de son support et celle de ressorts, en vue de réaliser les divers mouvements de rapprochement et d'écartement des charbons, pour l'allumage et le rappel nécessité par l'usure des crayons.

Les régulateurs se classent d'après le mode de connexion des bobines d'électros sur le circuit d'alimentation; nous avons donc :

- 1° Les régulateurs en série ou à courant constant;
- 2° Les régulateurs en dérivation ou à tension constante;
- 3° Les régulateurs compound ou différentiels.

On voit donc que les diverses classes de régulateurs correspondent aux différents systèmes de distribution, et de même que pour ceux-ci il convient de maintenir constants, soit la différence de potentiel, soit l'intensité du courant i , de même les régulateurs auront pour fonction de maintenir constante l'une ou l'autre de ces quantités.

RÉGULATEURS EN SÉRIE.— Dans cette disposition représentée schématiquement par la figure 468. les charbons supérieur et inférieur P et Q, l'arc A et l'enroulement du solénoïde S ne font qu'un seul et même circuit.

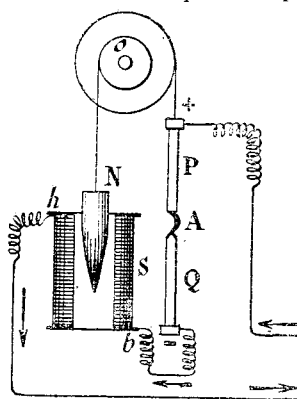


FIG. 468. — Régulateur série.

Le poids du charbon P est légèrement supérieur à celui du noyau de fer donx N; les poulies de suspension de ces deux pièces ont des diamètres différents, de sorte qu'à un déplacement très faible du noyau correspond un mouvement relativement étendu du charbon supérieur.

La forme conique du noyau N, comme nous l'avons expliqué ailleurs (tome I. § 89), a l'avantage d'assurer une action constante du solénoïde sur ce noyau, quelle que soit sa position à l'intérieur de la bobine.

Au début, le crayon P sollicité par son poids est en contact avec le charbon inférieur Q, le courant pourra donc traverser les deux crayons, entrera en b dans le solénoïde et sortira en h . Le solénoïde attirera alors le noyau qui descendra en soulevant le crayon supérieur et fera jaillir l'arc en A; la lampe sera ainsi allumée.

L'attraction du solénoïde dépend du nombre d'ampères-tours $n \times I$, et comme l'effet d'un même nombre d'ampères-tours n'est pas le même dans toutes les bobines, cette attraction dépend aussi d'un certain coefficient K propre à la bobine considérée, de sorte que finalement l'action du solénoïde sur son noyau peut être représentée par l'expression :

$$F = K \times n \times I$$

Mais l'intensité I dépend elle-même de la résistance du circuit et notamment de l'écart entre les crayons; au fur et à mesure que cet écart augmente, I diminue et F aussi dans la même proportion. Or, l'attraction électro-magnétique doit faire équilibre à l'excédent p du poids du crayon et de son support sur celui du noyau; l'écartement maximum sera donc atteint lorsque l'on aura :

$$F = K \times n \times I = p$$

On devra régler l'excédent de poids p , de telle sorte que cet équilibre soit atteint pour la longueur d'arc convenable; on voit aussi que cet équilibre se maintiendra tant que I sera constant et qu'il se rétablira toujours pour la même valeur de I . Celle-ci se tire d'ailleurs aisément de l'expression ci-dessus :

$$I = \frac{p}{K \times n}$$

Toutes les quantités du second membre étant constantes, il s'ensuit que I est lui-même constant; ainsi se justifie le nom de régulateur à courant constant donné à ce système.

On conçoit que de pareils régulateurs ne puissent pas se placer en série sur un même circuit; supposons que, par suite de l'usure des charbons, l'écart A ait augmenté, la résistance du circuit s'accroît de ce fait et l'intensité du courant diminue en conséquence; l'attraction du solénoïde devient inférieure au poids p qui l'emporte et rapproche les charbons.

C'est ainsi que se fait le réglage de la lampe considérée, mais si plusieurs lampes sont en série, le courant diminuera à la fois dans toutes les lampes, qui se trouveraient ainsi toutes dérèglées en même temps. C'est pourquoi l'on

désigne quelquefois ces régulateurs sous le nom de *Monophotes* ou lampes à foyer unique, en série sur un même circuit.

Dans la disposition simple indiquée, le solénoïde commande directement le mouvement du charbon supérieur, le crayon inférieur étant d'ailleurs supposé fixes. D'autres fois, l'électro-aimant agit sur une armature qui actionne un mécanisme à déclic, entraînant le charbon dans son

mouvement; le réglage se fait alors par intermittence, au lieu d'agir d'une façon continue.

RÉGULATEUR EN DÉRIVATION.

— Ici le solénoïde est en dérivation; le poids du noyau l'emporte sur celui du charbon supérieur et les crayons sont écartés à l'origine (fig. 469).

Quand on ferme le circuit de la lampe, le courant ne pouvant passer par l'intervalle qui sépare les deux extré-

mités des charbons, traverse le solénoïde *S* qui attire le noyau *N* de bas en haut; le charbon supérieur descend et arrive au contact du crayon inférieur *Q*. A ce moment, le courant passe presque tout entier par les charbons et, le solénoïde devenant inactif, le noyau tombe, les charbons s'écartent brusquement et la lampe s'allume.

L'équilibre s'établit comme précédemment entre l'attraction électro-magnétique et l'excédent de poids de la balance; mais dans le cas actuel, le courant excitateur du solénoïde dépend directement de la différence de potentiel aux bornes *a* et *b*. Soit : *i* ce courant, *n* le nombre des spires du solénoïde, *r* sa résistance et *K*₁ le coefficient relatif à l'appareil considéré. La condition d'équilibre sera :

$$K_1 \times n \times i = p$$

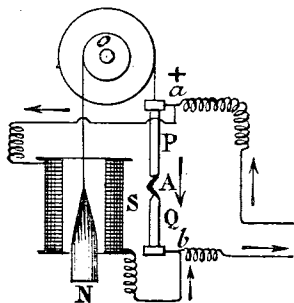


FIG. 469. — Régulateur en dérivation.

et comme :

$$i = \frac{e}{r}$$

il vient :

$$K_1 \times n \times \frac{e}{r} = p$$

et puisque toutes les autres quantités entrant dans cette relation sont constantes, il faut aussi que e reste immuable, d'où le nom de régulateur à tension constante qui désigne cette classe d'appareils.

Quand l'écart des charbons augmente par suite de l'usure, le courant affluant dans la lampe diminue, et la chute de potentiel diminuant en même temps, la différence de tension augmente aux bornes a et b ; le courant excitateur croît, le noyau est soulevé et le charbon supérieur descend se rapprochant du crayon inférieur. L'équilibre s'établit donc pour le courant qui ramène e à sa valeur normale.

Il suit de là que, pour des valeurs différentes de e , il devra se produire des équilibres différents et par suite des régimes variables de l'arc; ces régulateurs devront donc être placés de préférence sur des circuits à tension constante, ou du moins ne présentant pas, comme les lignes de tramways, des variations de tension trop considérables.

Dans certains appareils, l'écartement initial des charbons est produit par un électro-aimant en série qui déplace le charbon inférieur au moment de la fermeture du circuit.

RÉGULATEURS DIFFÉRENTIELS. — Ils présentent les dispositions combinées des deux précédents (fig. 470); un double noyau NN_1 pénètre à la fois par chacune de ses extrémités dans deux solénoïdes, l'un F à fil fin, en dérivation, l'autre C à fil gros et court en série sur l'arc. Tandis que l'action de F se produit de bas en haut, celle de C est dirigée en sens inverse, le noyau obéit donc à la différence des deux actions, et se trouve entraîné par cette action différentielle du côté du solénoïde dont l'attraction est prépondérante.

Dans le schéma ci-contre, le charbon supérieur est

porté par un levier O I, articulé en O sur le couple des noyaux et pivoté sur l'axe fixe I; ce levier fonctionne donc exactement comme le fléau d'une balance dont les pla-

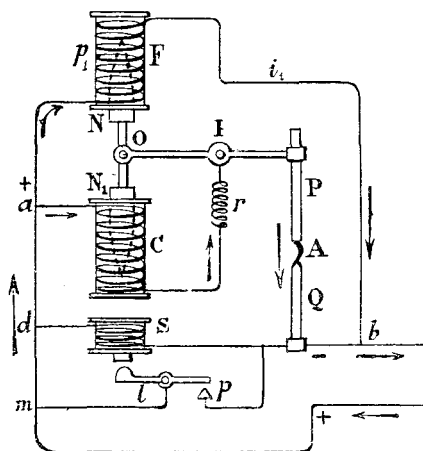


FIG. 470. — Régulateur différentiel.

teaux seraient remplacés par les noyaux d'une part et le charbon positif d'autre part.

La bobine F en dérivation étant toujours en circuit lorsque l'interrupteur de la lampe est fermé, entrera la première en activité et ramènera les charbons au contact; mais aussitôt, le courant passe par la

bobine C, l'axe I et les charbons. L'attraction de la bobine C devient alors prépondérante, les charbons s'écartent et l'arc jaillit.

Au fur et à mesure que l'écart augmente, la résistance du circuit en série sur l'arc croît et le courant excitateur de C diminue en même temps que celui de F augmente; il s'établira donc rapidement un état d'équilibre entre les actions en présence.

Cet état d'équilibre est exprimé par la relation :

$$K_1 \times n_1 \times i_1 = K \times n \times i$$

D'où l'on tire :

$$\frac{i}{i_1} = \frac{K_1 \times n_1}{K \times n}$$

Mais on a d'autre part, d'après la règle des courants dérivés :

$$\frac{i}{i_1} = \frac{r_1}{r}$$

d'où :

$$\frac{r}{r_1} = \frac{K \times n}{K_1 \times n_1} \text{ et } r = \frac{K \times n \times r_1}{K_1 \times n_1}$$

C'est-à-dire que la résistance r du circuit de l'arc est constante, ce qui a fait donner à ces appareils le nom de régulateurs à résistance constante.

La figure 470 comporte un dispositif qui permet d'assurer la continuité du circuit, en cas de rupture ou d'usure complète de charbons, de manière à prévenir l'extinction de toutes les autres lampes en série sur le même circuit. C'est une petite bobine S , en fil fin et résistant, qui n'est traversée que par un courant très faible lorsque la lampe fonctionne normalement; mais lorsque le circuit des charbons est interrompu, elle devient le siège d'un courant assez intense pour attirer le levier l qui établit une communication directe entre les deux bornes de la lampe par le circuit $m l p b$.

Toutes les dispositions décrites s'appliquent également aux courants alternatifs, pourvu que l'on ait soin de constituer les noyaux en fer divisé, tôles minces ou fils de fer isolés, pour éviter les courants de Foucault.

INSTALLATION ET RÉGLAGE DES LAMPES. — Les lampes *polyphotes* qui appartiennent aux deux dernières classes, peuvent se placer en série sur un même circuit. Le nombre des appareils en série résulte de la tension du circuit de distribution et de la différence de potentiel minimum applicable à chaque lampe. Pour les lampes à courant continu ce minimum est de 42 volts, il descend à 30 volts pour les courants alternatifs.

Mais lorsqu'on place les lampes isolément en dérivation ou par groupes en série de 2 ou 3 seulement, il est indispensable d'ajouter dans leur circuit une résistance additionnelle. Celle-ci a pour but : en premier lieu, d'éviter les courts circuits qui pourraient amener la destruction de la lampe, chaque fois que les charbons viendraient en con-

tact ; en second lieu, de réduire la différence de potentiel aux charbons, en déterminant une chute de tension croissant avec l'intensité du courant.

On admet que pour obtenir une bonne régulation, la résistance additionnelle doit absorber environ 15 volts ; comme l'arc prend 42 volts et les résistances des charbons et de la bobine en série 7 à 8 volts, on voit que le fonctionnement d'une lampe à arc exige une tension de 65 volts en pratique.

Ces résistances additionnelles ont l'inconvénient d'absorber de l'énergie, perdue pour l'utilisation. Si nous plaçons par exemple deux lampes en série sur une distribution à 110 volts, il y aura au moins 20 volts absorbés dans les résistances additionnelles. Les lampes étant supposées de 10 ampères, absorberont une puissance totale de 1100 watts sur lesquels 900 seulement seront réellement utilisés ; le rendement électrique sera donc de $\frac{900}{1100}$ soit de 82 pour 100 environ.

Les courants alternatifs ont l'avantage de permettre l'emploi de bobines à réaction qui développent une force contre électromotrice de self-induction, réduisant la tension à la valeur exigée pour le perfectionnement de la lampe. La réduction de tension n'entraîne pas ici de dissipation d'énergie, mais un décalage entre l'intensité du courant et la différence de potentiel aux bornes de la lampe. Il en résulte que, pour une énergie donnée à consommer par l'appareil, le courant doit être plus intense en raison de l'influence du facteur de puissance. Cette circonstance n'a d'autre résultat que de surcharger le réseau, ce qui n'est pas d'ailleurs sans inconvénient ; aussi, on préfère souvent placer un petit transformateur sur chaque lampe, ce qui permet de réduire l'intensité du courant primaire fourni par le réseau et en même temps la tension du secondaire aux bornes de la lampe.

Pour régler l'arc des lampes quelconques, on agira sur les mécanismes d'allumage et de rapprochement des charbons, ressorts antagonistes, contre-poids, leviers et autres ;

il faudra aussi régler la résistance additionnelle de manière à donner à la lampe le courant qui lui convient.

En définitive, il convient de régler l'arc à sa longueur la plus convenable, ce que l'on vérifiera à l'aide de verres fumés. Si l'arc est trop long, le mamelon du charbon inférieur est très réduit, l'arc est instable et tourne, sous l'aspect d'une flamme, autour des charbons; si l'arc est trop petit, le mamelon s'allonge et tend à venir se souder au cratère positif et la lumière disparaît.

Quand la résistance intercalée est trop grande, la lampe donne peu de lumière et de temps en temps les charbons se collent; si la résistance est trop petite, la lampe sautille et la lumière est instable. Les modes de réglage varient d'ailleurs suivant les divers systèmes de lampes et l'on ne peut donner que des indications générales à ce sujet.

253. Description de types des lampes à arc les plus usuels. — RÉGULATEUR JASPAR. — C'est un régulateur en série; les deux porte-charbon t et t' sont suspendus par des cordelettes passant respectivement sur deux poulies R, calées sur le même axe; celle qui supporte le charbon supérieur positif a un diamètre double de l'autre, de sorte que les déplacements des charbons sont proportionnels à leur usure et que le point lumineux reste fixe (fig. 471).

L'appareil comporte encore un contre-poids P, pivoté en B et soutenu à l'autre extrémité par un cordon enroulé sur l'axe des poulies; la masse P peut se déplacer sur son axe, ce qui permet de régler la longueur de l'arc, suivant l'intensité du courant.

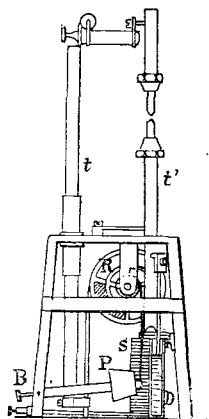


FIG. 471. — Lampe Jaspar.

On voit en outre en D un cylindre rempli de mercure, où peut se déplacer un petit piston dont la tige est fixée d'au

tre part au porte-charbon inférieur et qui sert de frein pour amortir les mouvements brusques de descente.

Le poids du charbon supérieur étant prépondérant, les crayons sont en contact à l'origine ; le courant traverse t et t' , puis le cylindre de mercure D, le solénoïde en série S, à l'intérieur duquel plonge un barreau de fer doux solidaire du porte-charbon inférieur, et sort finalement par la borne négative de la lampe.

L'arc jaillit aussitôt, par l'effet de l'attraction du noyau ; puis cette attraction diminue au fur et à mesure que l'écart des charbons augmente ; l'équilibre s'établit entre le poids moteur et l'action électro-magnétique. Quand l'écart augmente par suite de l'usure des charbons, le poids moteur l'emporte de nouveau et ramène l'écartement au taux normal. La masse pesante en R a pour but de compenser, par la position variable de son bras de levier, la différence d'usure des deux charbons.

Ce système, comme tous les régulateurs à intensité constante, ne peut se placer que seul, sur un circuit en dérivation.

RÉGULATEUR GRAMME. — Cet appareil appartient à la classe des régulateurs à tension constante. Le charbon inférieur est supporté par le cadre C E G ; l'électro-aimant A à gros fil, en série avec l'arc, sert à l'allumage (fig. 472).

Le cadre E est suspendu par les ressorts R en dessous de la culasse fixe des électros A, et le charbon inférieur se trouve ainsi maintenu au contact du charbon supérieur, au repos.

Dès que l'interrupteur de la lampe est fermé, le courant

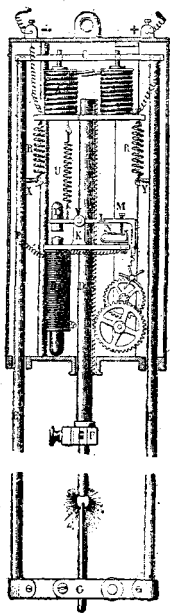


Fig. 472. — Lampe Gramme.

traverse les électros A qui attirent de haut en bas les noyaux fixés sur la traverse c du cadre; le charbon inférieur s'abaisse et la lampe s'allume.

L'écart est limité par l'action des ressorts R et par celle du solénoïde régulateur en dérivation B, qui entre en jeu dès que la résistance de l'arc dépasse une certaine valeur. Le courant excitateur de B arrive par la vis M, passe dans le ressort N, dans le fil de l'enroulement, et sort en P. L'armature I est attirée, le levier I M bascule autour du pivot V; le doigt S libère le moulinet avec lequel il était en prise et déclanche le train d'engrenage qui peut défiler sous l'action de la crémaillère D, en prise avec la dernière roue.

Le charbon supérieur se rapproche ainsi du crayon inférieur pour rattraper l'usure, mais ce mouvement se fait par rapprochements successifs et non brusquement, grâce au contact M N qui s'interrompt chaque fois que l'armature I est attirée et coupe le courant excitateur, de sorte que le ressort antagoniste U ramène le levier en arrière et le doigt S arrête de nouveau le moulinet étoilé. L'armature I M agit donc comme le vibreur d'une sonnerie électrique et ne laisse passer qu'une seule branche de l'étoile à la fois. Le réglage se fait ainsi d'une manière continue et insensible, qui assure une fixité parfaite à la lumière.

RÉGULATEUR SIEMENS ET HALSKE.— Le régulateur ne comporte qu'une seule bobine *m* en dérivation (fig. 473).

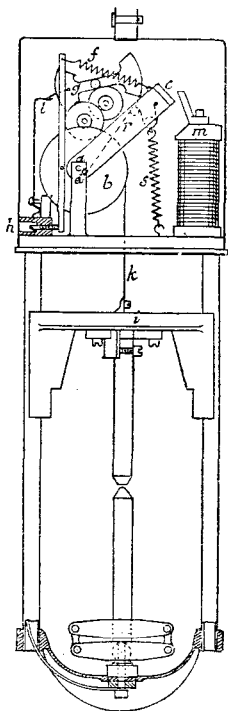


FIG. 473.— Lampe Siemens et Halske.

Son armature *c* constitue l'un des côtés d'un cadre qui porte divers rouages, dont le dernier mobile est un moulinet *g*, immobilisé au repos par le doigt d'encliquetage *l*.

Ce cadre oscille autour d'un axe *a*; il porte lui-même l'axe *d* d'une poulie *b*, sur laquelle s'enroule le ruban de cuivre qui soutient le charbon supérieur.

Quand on ferme le circuit de la lampe, la bobine en dérivation est excitée; l'armature *c*, obéissant à l'attraction électro-magnétique et au ressort *s*, s'abaisse malgré le ressort antagoniste *f*, le moulinet *g* s'écarte du ressort *l*, et l'engrenage devenant libre, la roue *b* laisse défiler le ruban et le charbon supérieur vient en contact avec le crayon inférieur fixe.

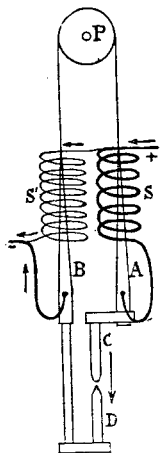


FIG. 474. — Lampe Pilsen.

Quand l'usure des charbons réduit le courant et augmente la différence de potentiel aux bornes, le cadre est attiré de nouveau et tout se passe comme pour le rapprochement des charbons à l'allumage.

LAMPE PILSEN. — C'est une des lampes les plus simples, car elle ne comporte aucun mécanisme. Les porte-charbon sont fixés à deux noyaux de fer coniques A et B, réunis par une cordelette passant sur la poulie P (fig. 474).

Le noyau A pénètre dans le solénoïde S à gros fil, en série avec l'arc et le noyau B dans le solénoïde *s* à fil fin, en dérivation.

Les charbons étant en contact à l'origine, le courant traverse la bobine S, attire le noyau A, et l'arc se forme; au fur et à mesure que l'arc s'allonge, l'intensité du courant principal diminue et le solénoïde S laisse tomber la tige A; mais en même temps, la différence de potentiel augmente aux bornes de la lampe et, par suite, aux extrémités du solénoïde S' en dérivation; celui-ci devient actif et aspire le noyau B; les deux actions concourent donc à rapprocher les charbons.

Ce système constitue une véritable balance d'une grande sensibilité et d'un réglage très facile. Si l'arc est trop grand ou trop petit, il suffira pour obtenir l'écartement normal d'accrocher, dans le premier cas, un petit poids en cuivre au porte-charbon supérieur et, dans le second cas, de le suspendre au porte-charbon inférieur.

RÉGULATEUR BARDON. — Les charbons sont suspendus à deux anneaux $p p'$, soutenus par une cordelette de soie dont les bouts sont fixés aux extrémités m et n d'un levier pivoté autour de l'axe o (fig. 475); cette cordelette passe ensuite sur deux poulies de renvoi et dans la gorge d'un petit moyeu solidaire de l'axe du volant V.

Au milieu du levier $m n$, est articulée en o' , la tige du noyau d'un solénoïde B à deux enroulements différentiels, l'un en gros fil, en série avec l'axe, l'autre à fil fin, en dérivation; en N se trouve un noyau fixe qui peut solliciter le noyau N' lors du passage du courant excitateur.

Le charbon supérieur, plus lourd, entraîne tout le système au repos, et les deux crayons sont en contact à l'origine. Dès que la lampe est mise en communication avec

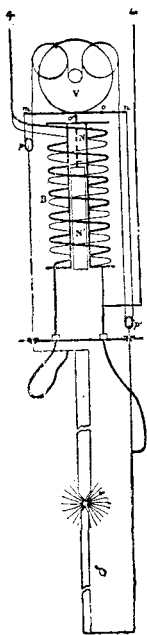


FIG. 475. — Lampe Bardon.

le circuit d'alimentation, le courant passant dans l'enroulement à gros fil aspire le noyau N' qui, par sa tige N , soulève le levier $m n$; le charbon supérieur monte et le crayon inférieur descend, suivant le mouvement de bascule du levier $m n$, et la lampe s'allume.

En même temps, le levier $m n$ s'appliquant contre le volant V , vient le bloquer comme un frein et immobilise les charbons. A mesure que les crayons s'usent, la pression du frein devient plus faible et le volant glisse insensiblement, en permettant aux charbons de se rapprocher d'une manière continue, pour compenser l'usure.

L'enroulement en dérivation a pour but de rendre le réglage plus sensible et plus efficace. En effet, si l'arc tend à s'allonger démesurément sous l'action du solénoïde en série, en déterminant un blocage énergique du volant, l'influence antagoniste du solénoïde en dérivation augmente en conséquence et neutralise l'effet excessif du premier solénoïde. Si au contraire les charbons se rapprochent jusqu'au collage, il ne passe qu'un faible courant dans le fil fin, tandis que le gros fil est traversé par un courant très intense et peut agir énergiquement pour écarter les charbons.

Dans un autre modèle, la bobine à gros fil est supprimée et le solénoïde porte un seul enroulement en fil fin, monté en dérivation aux bornes de l'arc.

L'action du solénoïde pour le réglage est la même qu'à l'ordinaire, variant toujours en raison inverse de l'intensité du courant principal de l'arc.

RÉGULATEUR BRIANNE. — Le mécanisme de cette lampe est particulièrement simple. Le charbon inférieur est fixe, le crayon supérieur est porté par une crémaillère verticale C qui engrène avec un pignon P , solidaire d'une grande roue dentée V (fig. 476).

L'appareil comporte en outre un noyau circulaire T qui termine un levier coudé $L L' L''$ dont l'axe d'oscillation est en L ; sur le même axe est calé un secteur denté R qui engrène avec la roue V .

Au repos, le noyau T tombe et s'arrête dans la posi-

tion en pointillé F, sur un butoir qui n'est pas figuré dans le dessin. Le secteur R, pendant cette chute, a été entraîné en sens inverse de la rotation des aiguilles d'une montre, et il a lui-même fait tourner la roue V et le pignon P, de manière à relever la crémaillère C; les charbons sont donc écartés à l'origine.

Quand on ferme le circuit de la lampe, le solénoïde en dérivation est excité, il aspire le noyau et fait tourner le système d'engrenage en sens inverse: les charbons sont donc amenés au contact; le solénoïde devient alors inactif, le noyau retombe déterminant l'écart des charbons et l'allumage.

Quand l'écart augmente au delà de la longueur normale de l'arc, l'intensité croît dans le solénoïde qui rapproche les charbons, jusqu'à ce que le secteur denté ayant décrit sa course complète, une dent de la roue V vient à lui échapper, ce qui correspond à un rapprochement des charbons de $0^{\text{mm}}15$; le noyau T sera alors revenu au bas de sa course, prêt à continuer le réglage de l'arc.

LAMPES A ARC EN VASE CLOS. — *Lampe Marks.* — *Lampe Jandus.* — La figure 477, montre l'ensemble de la disposition du mécanisme de la lampe en vase clos du système

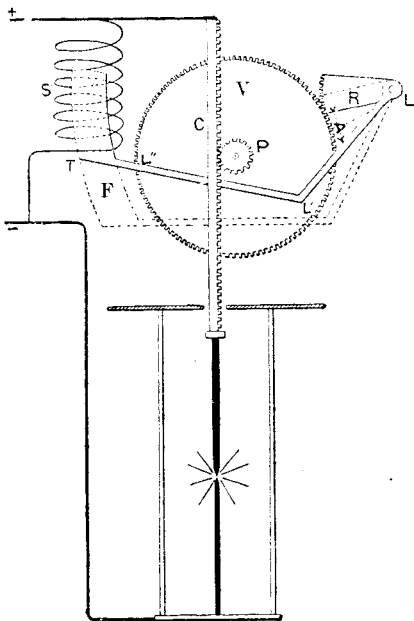


FIG. 476. — Lampe Briante.

Marks. Ces lampes se plaçant généralement seules en dérivation sur des circuits à 110 volts, présentent un seul électro-aimant *m* dont l'enroulement est en série avec l'arc.

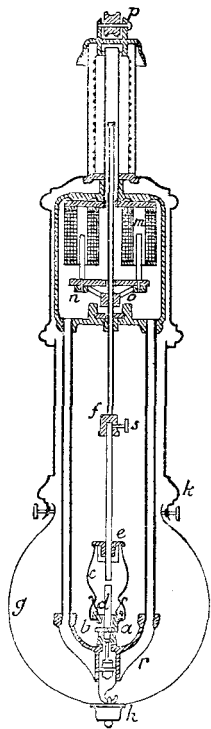


FIG. 477. — Lampe Marks

Le charbon supérieur traverse à frottement le couvercle *e* du petit globe *c*, renfermant aussi le charbon inférieur. Au repos les charbons sont en contact; le courant traversant l'électro, aspire un double noyau dont la culasse soulève deux bagues obliques *o* qui coïncent le porte-charbon supérieur et le soulèvent, déterminant ainsi l'écart des crayons et l'allumage. Au fur et à mesure que les charbons se consomment, l'intensité du courant diminue et le solénoïde laisse glisser les noyaux et décoïncer le porte-charbon supérieur qui descend en se rapprochant de l'autre crayon.

La lampe fonctionne normalement à 5 ampères et absorbe 85 volts; la chute de tension complémentaire se produit dans une résistance additionnelle, enroulée sur un cylindre de porcelaine, logé dans la partie supérieure de la lampe. Dans le cas où l'on place plusieurs de ces appareils en série, on munit l'électro d'un enroulement différentiel.

La lampe Jandus est construite sur un principe analogue; le vase clos présente une soupape fermée par un ressort et permettant à l'air dilaté de s'échapper; l'atmosphère n'est renouvelée que par les joints imparfaitement étanches de l'ampoule.

Le grand avantage de ce système réside dans la durée

des charbons, qui peut dépasser 200 heures avec une usure de 50 à 55 centimètres de crayon seulement; mais le rendement lumineux est notablement inférieur à celui des lampes à arc ordinaire.

LAMPES SANS RÉSISTANCE ADDITIONNELLE. — *Lampes Hegner.* — Sur les distributions à 110 volts, qui sont le plus généralement employées, on ne peut placer que deux lampes à arc en série, chacune d'elles absorbant 40 à 45 volts. Mais avec les charbons à mèche que l'on emploie aujourd'hui, on arrive, par la volatilisation des mélanges de charbon et de magnésie ou de silicate qui forment le noyau du crayon, à créer une atmosphère relativement conductrice entre les deux pointes et à abaisser jusqu'à 35 volts le potentiel nécessaire à la formation de l'arc.

Dans ces conditions, on pourrait placer trois lampes en série sur une distribution à 110 volts, par exemple, en utilisant pour l'éclairage la totalité du potentiel, si l'on parvenait à se passer de résistances additionnelles. C'est le but que s'est proposé M. Hegner en combinant un système de lampes à régulateur différentiel, parfaitement équilibré et pourvu d'un rhéostat automatique qui n'entre en œuvre que momentanément, soit au moment de l'allumage, soit pour remédier à une cause purement accidentelle.

Le mécanisme (fig. 478) comporte un cadre métallique M, pivoté autour d'un axe inférieur O et portant un tambour crénelé R où s'accroche le côté de la chaîne à laquelle est

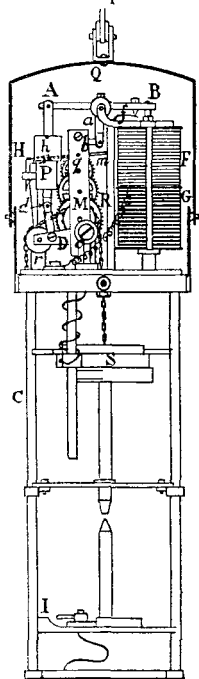


FIG. 478. — Lampe Hegner.

suspendu le charbon supérieur ; l'autre bout de la chaîne passe sur un galet *r* supporté par un bras d'équerre du cadre et descend dans la colonne creuse *C*, pour s'attacher au porte-charbon inférieur *I*.

Sur l'axe du tambour crénelé est calée une roue dentée qui forme le premier mobile d'un engrenage d'horlogerie, dont le dernier est un pignon *q*, sur l'axe duquel est montée l'aile d'un moulinet *m*. Celle-ci vient buter en temps normal contre l'extrémité d'un heurtoir *H*, qui enclanche ainsi l'engrenage d'horlogerie et arrête tout mouvement des charbons.

Le régulateur est constitué par deux bobines superposées à action différentielle, l'une inférieure, à gros fil *G*, l'autre supérieure, à fil fin et grande résistance *F*. Le noyau de fer doux qui traverse les deux bobines, est articulé au sommet, à l'une des extrémités *B* d'un balancier *A B* pivoté en *Q* ; un contre-poids de réglage, formant pompe d'amortissement à air *P*, est suspendu à l'autre extrémité et supporté en même temps par la pièce *d* fixée au bras *D* du cadre d'horlogerie.

Le mouvement d'oscillation de ce cadre est commandé par le levier *A B*, au moyen de la bielle *a* calée sur l'axe de celui-ci et articulée à la tige *b*. Enfin un ressort *f* tend constamment à relever le noyau, de façon à incliner le cadre sur la droite ; l'aile du moulinet est alors dégagée et le défilage de l'engrenage permet aux charbons de se rapprocher jusqu'au contact.

Au moment où l'on ferme le circuit, le courant traversant le solénoïde en série, attire le noyau vers le bas, le levier *A B* s'incline dès lors sur la droite et le cadre est repoussé sur la gauche. Dans ce mouvement de bascule, l'axe *g* du tambour de chaîne tourne autour de l'axe de suspension *o* du cadre et relève le charbon supérieur, tandis que l'inférieur s'abaisse d'autant ; ainsi se produit l'écartement des charbons à la distance voulue, et par suite l'allumage de la lampe.

Quand l'arc s'allonge par suite de l'usure des charbons le courant principal diminue, la différence de potentiel

augmente aux bornes de l'enroulement en dérivation et le crayon est relevé. Le cadre se trouve alors porté à droite, et ce mouvement produit le déclenchement du moulinet qui s'écarte du butoir; l'engrenage devenu libre laisse défilér les charbons, jusqu'à ce que le solénoïde à gros fil l'emportant de nouveau sur l'autre, ramène le cadre en arrière et reproduit l'enclenchement du moulinet.

La figure 479 représente la disposition schématique du

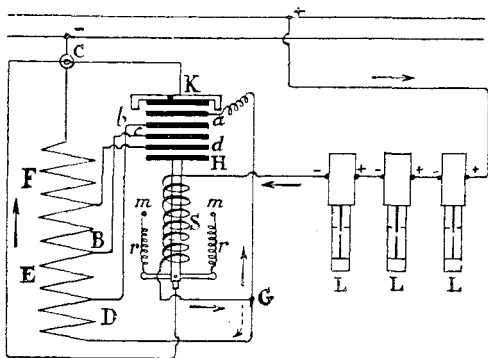


Fig. 479. — Rhéostat régulateur et disposition des 3 lampes en série.

rhéostat automatique et le mode d'installation des trois lampes Hegner en série.

L'appareil régulateur est composé essentiellement de quatre disques de charbon *a b c d* empilés au-dessus d'un petit plateau en graphite *H* et serrés, en temps ordinaire, entre ce plateau et un autre disque de charbon fixé en dessous du couvercle métallique *K*.

Le noyau et le plateau *H* sont d'ailleurs constamment sollicités à s'élever et à presser la pile de charbons, sous l'action de deux ressorts à boudins *r*, suspendus en deux points fixes *m* de l'appareil.

En régime normal, le courant issu du pôle positif traverse la série des trois lampes *L*, le solénoïde *S* à gros fil

et arrive à la borne G où il trouve un chemin direct au pôle négatif, par le charbon *a*, le couvercle K et la borne C.

Si par suite d'un court circuit, le courant dépasse l'intensité normale, le noyau est attiré vers le bas et, la colonne s'abaissant, le charbon *a* quitte le contact de K. Le chemin par K étant ainsi coupé, le courant est obligé de traverser toute la pile pour se fermer par le noyau et la borne C.

Pour un nouvel accroissement d'intensité, le noyau baissera encore d'un cran et le disque *a* se trouvant arrêté par un obstacle approprié, reste suspendu et séparé du reste de la colonne.

Le courant arrivant du solénoïde suit alors la voie indiquée par la flèche pointillée, traverse la première section D du rhéostat, passe par le charbon *b*, et rejoint le pôle C par la pile sous-jacente et le noyau, comme précédemment.

Les disques se séparent ainsi successivement, introduisant les sections consécutives du rhéostat, jusqu'à la dernière F. On voit d'ailleurs que ces résistances n'interviennent que dans le cas d'un court circuit tel qu'il se produit à l'allumage, alors que les crayons des lampes sont en contact, ou accidentellement par suite du collage des charbons d'une lampe et aussi dans le cas d'un excès momentané de tension.

LAMPES A ARC SANS RÉGULATEUR — *Bougies Jablochkoff*. — Nous ne citons que pour mémoire ces bougies qui sont presque entièrement abandonnées aujourd'hui. On sait que l'invention de Jablochkoff consiste à disposer les crayons, parallèlement, côte à côte, au lieu de les placer bout à bout.

En conséquence, les charbons sont séparés par une cloison isolante au *colombin*, formée d'une pâte de plâtre et de sulfate de baryte; à la partie supérieure, les crayons sont réunis par un enduit charbonneux relativement conducteur qui s'échauffe au passage du courant, brûle et fait place à l'arc voltaïque : enfin les bougies sont alimen-

tées par des courants alternatifs, afin d'assurer l'usure égale des deux charbons.

Le grand avantage de ces appareils consistait dans l'absence de tout régulateur, mais les variations de coloration et d'intensité de la lumière, dues à la fusion du colombin; la difficulté de rallumer la lampe éteinte et le rendement lumineux notablement inférieur des bougies leur ont fait préférer définitivement les lampes à régulateurs perfectionnés dont on dispose aujourd'hui.

254. Photométrie. — Les foyers lumineux, considérés comme concentrés en un point, émettent des rayons dans toutes les directions, comme un pôle magnétique rayonne des lignes de force dans le milieu ambiant.

On aura donc à considérer, dans la science de la photométrie, des quantités analogues à celles qui interviennent dans le domaine du magnétisme.

La quantité fondamentale est l'*intensité lumineuse* d'un foyer, c'est une quantité qui caractérise la valeur intrinsèque du luminaire au point de vue de l'émission de lumière.

Un foyer lumineux, placé au centre d'une sphère de rayon égal à 1, émet un flux lumineux Q qui est intercepté par la surface sphérique, de telle sorte que la quantité de lumière reçue par unité de surface a pour expression :

$$I = \frac{Q}{4\pi}$$

I est donc le flux lumineux contenu dans un cône ayant son sommet au foyer et correspondant à l'angle solide unité; c'est si l'on veut, le *flux par unité d'angle solide*, et cette quantité constitue, par définition même, l'*intensité lumineuse* du foyer, analogue comme on le voit à l'intensité d'un pôle magnétique.

Si le rayon de la sphère était différent de l'unité et égal à R , on aurait :

$$e = \frac{Q}{4\pi \times R^2} = \frac{I}{R^2}$$

La grandeur e est ce qu'on appelle l'*éclairement*; c'est, comme l'indique la formule, la quantité de lumière reçue par l'unité

de surface éclairée. Si l'on fait de nouveau $R = r$, dans cette formule, on obtient $I = e$, ce qui veut dire que *l'intensité du foyer lumineux a pour mesure l'éclairement produit à l'unité de distance.*

On aurait de même, à la distance R' :

$$e' = \frac{I}{R'_2}$$

Et en divisant les deux éclairéments membre à membre :

$$\frac{e'}{e} = \frac{I}{R'_2} \times \frac{R_2}{I} = \frac{R_2}{R'_2}$$

il s'ensuit que *les éclairéments d'un foyer d'intensité donnée sont en raison inverse des carrés des distances du foyer aux surfaces éclairées.*

Ces expressions supposent, comme dans le cas de la sphère, que les surfaces sont frappées normalement par les rayons lumineux.

S'il en est autrement et que le plan éclairé ait une inclinaison de pente K , l'éclairement aura pour expression :

$$e' = \frac{I}{R^2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + K^2}}$$

Pour une inclinaison de 45 degrés par exemple, correspondant à une pente de 100 pour 100, K serait égal à 1 et l'on aurait :

$$e' = \frac{I}{R^2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{I}{1,41 \times R^2}$$

Lorsqu'un foyer n'est pas punctiforme, mais présente une certaine surface S , les rayons émis sont les uns normaux, les autres obliques à la surface lumineuse. On appelle *éclat* la quantité de lumière émise normalement par unité de surface. On aura pour la grandeur de cette quantité, l'expression :

$$i = \frac{I}{S}$$

Si l'on considère la lumière émise obliquement, dans une direction faisant un certain angle avec la direction normale à la surface du foyer, sa valeur deviendra :

$$i' = \frac{I}{S} \times \frac{1}{\sqrt{1 + K^2}}$$

K étant la pente de l'inclinaison du faisceau lumineux sur la normale.

Quand il s'agit de foyers constitués par des flammes transparentes, telles que celles des becs de gaz, par exemple, il n'y a pas lieu de tenir compte, pratiquement, de l'inclinaison des rayons, puisque chaque point lumineux rayonne à travers la nappe transparente, comme s'il était isolé. Cette circonstance doit au contraire être prise en considération quand il s'agit de corps opaques, tels que les filaments des lampes à incandescence.

On peut dire que l'éclairement est l'éclat d'un objet devenu lumineux par réflexion ou par transparence.

La photométrie a pour objet la détermination de l'intensité lumineuse d'un foyer, en fonction de celle d'un autre foyer pris pour étalon ; elle s'occupe aussi de la mesure des éclairéments des surfaces frappées par les rayons des foyers lumineux.

Il ne faut pas confondre l'intensité et l'éclairement, la première de ces quantités se rapporte à la source lumineuse elle-même, la seconde aux surfaces éclairées, l'une est la cause du phénomène lumineux, l'autre l'effet.

Comme nous ne savons apprécier la grandeur des causes que par les effets qu'elles produisent, c'est l'éclairement qui sert de mesure à l'intensité.

C'est ainsi que, dans le photomètre de Foucault, on reçoit la lumière émise par les foyers comparés, respectivement sur les deux plages d'un écran translucide et l'on juge de l'intensité de ces foyers par l'éclairement obtenu.

Il nous est d'ailleurs impossible de distinguer dans quelle proportion un éclairément est plus grand qu'un autre. Cela résulte de la *loi psychophysique de Fechner*, d'après laquelle *l'intensité de la sensation produite sur notre organe de la vue n'est pas proportionnelle à l'intensité de la cause d'excitation*. Un foyer d'intensité double par exemple, ne produit pas sur notre œil un effet lumineux double, d'où l'impossibilité d'apprécier directement le rapport exact des deux éclairéments.

Nous jugeons seulement si un éclairément est supérieur à un autre et encore jusqu'à une certaine limite qui dépend de la sensibilité de l'œil et qu'on désigne sous le nom de *valeur sensible* ou *seuil d'excitation*. Le seuil d'excitation dépend d'ailleurs de l'intensité des éclairéments, et aussi de la nature, c'est-à-dire de la coloration de la lumière. Cela revient à dire

que l'œil est plus ou moins sensible aux excitations lumineuses des diverses radiations du spectre, et cela dans le rapport de 1 à 100.000, quand on passe du rouge sombre aux radiations vertes.

Il résulte de ces considérations que les divers procédés photométriques tendent tous à réaliser l'égalité d'éclairement de deux surfaces exposées respectivement aux rayons des foyers considérés, dont l'un sert d'étalon lumineux.

Si cette égalité est obtenue dans les mêmes conditions pour les deux luminaires, nous en déduisons que leurs intensités sont égales; si les conditions et notamment les distances à l'écran sont différentes, on applique *la loi du carré des distances*. Celle-ci nous apprend que pour une intensité de source donnée, *l'éclairement d'un écran est inversement proportionnel au carré de l'intervalle qui sépare celui-ci du foyer*; on a par suite la formule :

$$E = \frac{I}{d^2}$$

pour un foyer quelconque d'intensité I .

Pour l'étalon unité d'intensité I_0 , on aura de même :

$$E = \frac{I_0}{d_0^2}$$

Et puisque l'opération photométrique a eu pour résultat d'obtenir l'égalité de ces deux éclairéments :

$$\frac{I}{d^2} = \frac{I_0}{d_0^2}$$

D'où :

$$I = I_0 \times \frac{d^2}{d_0^2}$$

C'est ainsi qu'on ramène la recherche de l'intensité des foyers à l'observation des éclairéments correspondants.

Soit par exemple $d_0 = 1$ et $d = 2$.

Il viendra :

$$I = I_0 \times \frac{4}{1} = I_0 \times 4$$

Ce qui veut dire que l'intensité du foyer soumis à l'expérience est 4 fois plus grande que celle de l'étalon pris pour unité.

ÉTALONS D'INTENSITÉ. — Il y a aujourd'hui un grand nombre d'étalons de lumière, parmi lesquels nous citerons seulement la bougie, la lampe carcel, et la lampe à acétate d'amyle d'Hefner-Alteneck.

La caractéristique d'un étalon est de pouvoir se reproduire autant de fois que l'on voudra, toujours avec une valeur constante. Ce résultat ne peut s'obtenir en pratique et les divers sujets d'une même catégorie d'étalons varient entre eux, souvent de 2 à 5 pour 100; un étalon donné peut aussi présenter les mêmes variations d'un moment à l'autre.

C'est pourquoi l'on a cherché à établir un *étalon* absolu, susceptible de pouvoir être reproduit toujours identique à lui-même, dans des conditions déterminées. Tel est l'*étalon Violle* adopté comme étalon absolu par la Conférence internationale des électriciens, en 1884.

Cet étalon est ainsi défini : *l'unité pratique d'intensité lumineuse est celle produite par l'émission normale des radiations de 1 centimètre carré de platine, à la température de solidification.*

Connaissant l'équivalence des autres étalons ou étalons secondaires en étalon Violle, il suffira d'employer ceux-ci directement pour la mesure des foyers en expérience, car on conçoit que la reproduction de l'étalon Violle, qui met en œuvre le platine en fusion, n'est pas une manipulation de pratique courante.

L'étalon secondaire le plus employé en France est le *bec Carcel*, imaginé en 1800 par l'inventeur de ce nom, et adopté plus tard par Dumas et Regnault pour les essais photométriques de l'éclairage au gaz de la ville de Paris. L'alimentation d'huile est régulièrement assurée, par un mécanisme d'horlogerie qui actionne deux petites pompes situées dans le socle. Une instruction très détaillée spécifie les dimensions exactes du bec, de la mèche et de la cheminée de verre. La combustion doit être réglée de manière à brûler 42 grammes d'huile de colza épurée à l'heure, avec une hauteur de mèche au-dessus du bec de 1 centimètre et la hauteur du coude du verre, de 7 millimètres au-dessus du niveau de la mèche.

Les résultats donnés par divers étalons carcel peuvent varier de 2 à 3 pour 100 au plus entre eux. Cet étalon vaut 0,48 de l'étalon Violle.

En Angleterre on emploie comme étalon la bougie de spermaceti, ou *candle*, qui vaut 0,14 carcel ;

En Allemagne, la bougie de paraffine ou *Kerzen*, valant 0,13 de carcel.

La difficulté de régler la mèche et la hauteur de flamme, l'instabilité de la flamme brûlant dans l'air libre, rendent cet étalon très irrégulier, et les variations peuvent dépasser 30 pour 100.

On utilise d'autre part, notamment dans l'appareil photométrique de Weber, la lampe Hefner à l'acétate d'amyle. Ce liquide constitue un corps parfaitement défini, qui possède un point d'ébullition très constant, évalué à 138 degrés.

La hauteur de la flamme doit être réglée exactement à 40 millimètres. Une différence de hauteur de 1 millimètre entraîne une erreur de 3 pour 100 dans l'intensité lumineuse.

L'étalon Hefner a une intensité lumineuse de 15 à 20 pour 100 inférieure à celle des bougies ; il vaut 0,112 soit environ $\frac{1}{9}$ de carcel.

On a adopté comme étalon unité d'intensité lumineuse, la *bougie décimale*, qui vaut $\frac{1}{20}$ de l'étalon Violle.

Nous résumons ci-après les chiffres donnant l'équivalence de la carcel en étalons de diverse nature. Ainsi 1 carcel vaut :

0,48	étalon violle
9,62	bougies décimales
8,91	bougies anglaises ou candles
7,89	bougies allemandes ou Kerzen
9,08	étalons Hefner.

On a désigné l'unité d'intensité lumineuse, représentée par la bougie décimale, sous le nom de *pyr*.

L'unité pratique de flux lumineux est le *lumen* ; c'est le flux rayonné par un foyer de l'intensité d'une bougie ou d'un pyr, dans un angle solide égal à l'unité.

L'unité d'éclairement est le *lux* ou *bougie-mètre*, c'est-à-dire l'éclairement produit pour un foyer d'un pyr sur une surface placée normalement aux rayons, à 1 mètre de distance du foyer.

Tous ces noms plus ou moins bizarres ne semblent pas avoir prévalu jusqu'à présent, et l'on exprime généralement les intensités en carcels ou en bougies décimales, et les éclairements en bougies-mètres.

L'unité d'éclat est l'éclat de l'étalon choisi, le pyr par centimètre carré, si l'on veut. L'éclat d'une bougie étant 1, celui du disque solaire sera représenté par 40.000, ceux du platine fondu et de la lampe à incandescence par 50, et l'éclat du cratère de la lampe à arc par 800.

INTENSITÉ MOYENNE SPHÉRIQUE. — L'intensité lumineuse des foyers et notamment des lampes électriques, n'est pas, en réalité, la même dans toutes les directions ; il importe alors de mesurer cette intensité, dans les divers plans verticaux et sous les différentes inclinaisons.

Considérons une lampe à arc et admettons, pour simplifier le problème, que l'intensité soit la même dans tous les plans verticaux, pour la même inclinaison. Supposons que l'on ait déterminé l'intensité ou pouvoir lumineux spécifique des rayons émis sous les différents angles : on portera à partir du point A (fig. 480) sur les vecteurs correspondants, des longueurs proportionnelles à ces intensités. On obtiendra ainsi la courbe des intensités lumineuses, telle qu'elle est représentée en A B C D E F A.

On voit que le maximum d'intensité se produit pour une inclinaison de 40 à 50 degrés ; nous prendrons cette intensité maximum pour unité.

Projetons maintenant, suivant la méthode de M. Rousseau, les divisions de la circonférence extérieure correspondant aux différents vecteurs, sur une verticale X X', et portons sur les ordonnées ainsi déterminées des longueurs égales aux vecteurs de la courbe des intensités, soit $e E' = A E$, $f F' = A F$ et

ainsi de suite; on constituera ainsi la courbe $X B' C' D' E' F' X'$.

Soit maintenant un trapèze quelconque $d D' M' m$, assez petit pour que $d D'$ puisse être considéré comme égal à $m M'$;

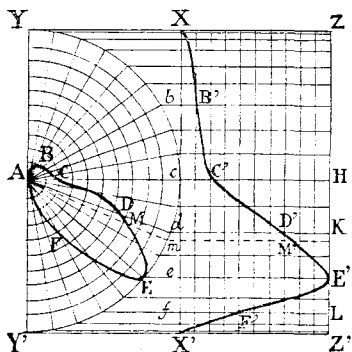


FIG. 480.— Détermination de l'intensité moyenne sphérique.

la surface du petit trapèze considéré, assimilé à un rectangle.

Nous trouverons ainsi que les flux partiels ont pour valeur le produit de 2π par les divers petits rectangles qui composent dans leur ensemble la surface de la courbe; le flux total reçu par la sphère a donc par expression :

$$Q = 2\pi \times \text{surface } X C' E' X'$$

On obtiendra par suite le flux moyen, par unité de surface, c'est-à-dire ce qu'on appelle l'intensité moyenne sphérique, en divisant cette expression par la surface de la sphère; on aura ainsi :

$$I_{ms} = \frac{2\pi \times \text{surf. } X C' E' X'}{4\pi} = \frac{\text{surf. } X C' E' X'}{2}$$

Cette intensité moyenne sphérique est exprimée en fonction de l'intensité maximum I_m , puisque cette dernière a été prise pour unité.

La surface de la courbe peut être évaluée à l'aide du planimètre, ou en calculant la surface décomposée en rectangles élémentaires par les formules spéciales que donnent les aide-mémoire, et encore en faisant simplement l'évaluation approxi-

on remarquera que $d m$ n'est autre chose que la hauteur de la zone découpée sur la sphère de rayon $A E = 1$ par le faisceau lumineux d'intensité $A D = d D'$, compris dans ce petit angle solide $D A M$. La surface de cette zone est donc égale, d'après les lois de la géométrie, à $2\pi \times d m$, et le flux lumineux qu'elle reçoit sera $2\pi \times d m d \times D'$.

Or, le produit $d m \times d D'$ n'est autre que

mative des surfaces par les règles ordinaires de la géométrie.

Dans les cas des arcs à circuit continu, la plus grande quantité de la lumière est projetée sur l'hémisphère inférieure, comme le montre, d'ailleurs, la courbe des intensités (fig. 26) qui se rapporte à un arc de cette nature. Il est alors intéressant de considérer plutôt l'intensité *moyenne hémisphérique inférieure* I'_{ms} ; celle-ci s'obtiendra en divisant la surface de la courbe $C'E'X'$, correspondant à la partie inférieure de la sphère, par la moitié de la surface sphérique, ce qui donnera :

$$I'_{ms} = \frac{2\pi \times \text{surface } C'E'X'}{2\pi} = \text{surface } C'E'X'$$

On peut d'ailleurs éviter les constructions et calculs, connaissant l'intensité horizontale I_h et l'intensité maximum I_m , à l'aide des formules empiriques suivantes :

Intensité moyenne sphérique, $I_{ms} = \frac{I}{4} \times \frac{I_h \times I_m}{4}$

Intensité moyenne hémisphéri-

que inférieure. $I'_{ms} = \frac{I_h \times I_m}{4}$

Intensité moyenne hémisphéri-

que supérieure $I''_{ms} = \frac{I_h}{4}$

Les deux dernières formules toutefois ne correspondent pas à l'intensité hémisphérique telle que nous l'entendons, qui doit être bien supérieure à l'intensité sphérique, puisqu'elle donne la moyenne du flux déversé sur l'hémisphère inférieure.

Pour les arcs alternatifs, les intensités sphériques et hémisphériques doivent se confondre, car les courbes d'intensité forment deux nappes symétriques par rapport à l'axe horizontal.

Les lampes à arc à feu nu ne peuvent être tolérées que dans les chantiers ou sur le champ de manœuvre. Pour l'éclairage intérieur et aussi pour l'éclairage public, on enferme les lampes dans un globe de verre dépoli ou opale. Ces globes absorbent 15 à 45 pour 100 de la

lumière, suivant qu'on emploie un verre dépoli opalin ou laiteux. En outre, ils tendent à égaliser l'émission lumineuse dans les diverses directions ; les rayons très intenses sont affaiblis, tandis que les rayons de faible intensité sont renforcés. Il en résulte des courbes d'intensité beaucoup plus uniformes et l'on trouve, en moyenne, les rapports suivants entre les intensités horizontale, verticale et maximum :

$$\frac{I_h}{I_m} = 0,6 ; \frac{I_v}{I_m} = 0,3 \quad \frac{I_v}{I_h} = \frac{1}{2}$$

ECLAIREMENT. — Connaissant les intensités lumineuses

correspondant à chaque inclinaison des rayons émis, il sera facile de déterminer l'éclairement sur un plan quelconque et à toute distance du foyer lumineux.

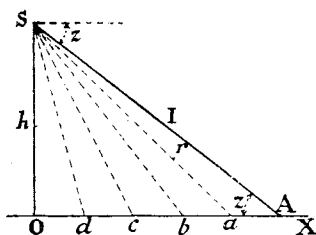


FIG. 481. — Eclairéments sous les diverses inclinaisons.

Si l'on désigne par h la distance du foyer S au plan éclairé OX, mesurée sur la normale SO à ce plan (fig. 481), et par r la

distance du foyer au point considéré A, l'éclairement en ce point sera donné par l'expression :

$$e = \frac{I \times h}{r^3}$$

On voit donc que, pour un rayon lumineux d'intensité I et pour une distance normale h du foyer au plan considéré, l'éclairement aux différents points du plan varie en réalité, dans le rapport inverse, non du carré, mais du cube de la distance.

On peut encore exprimer l'éclairement en fonction de la distance x des points tels que A au pied O de la normale, en remarquant que r est l'hypoténuse du triangle rectangle S A O, on obtient ainsi :

$$e = \frac{I \times h}{(\sqrt{h^2 + x^2})^3}$$

Supposons que la surface éclairée soit celle d'une rue, par exemple, on pourra calculer, d'après cette formule, les éclairagements aux divers points. O, d, c, b, a, A, situés sur la trace du plan vertical du triangle considéré. En élevant en chacun de ces points l'ordonnée correspondante ainsi calculée, on obtiendra des courbes telles que celles de la figure 482, extraite d'un travail de l'auteur sur

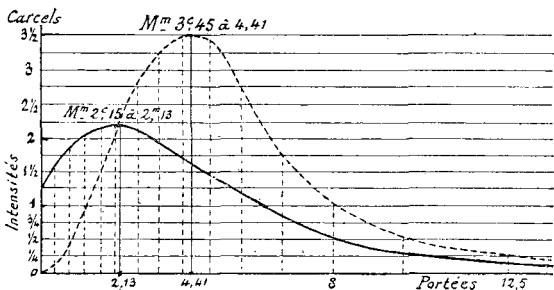


FIG. 482. — Graphiques d'éclairage de lampes à arc.

l'éclairage des lampes à arc¹. La courbe en pointillé est relative à l'éclairage d'une lampe à arc à feu nu de 10 ampères, placée à 5 mètres de hauteur; la seconde est donnée par la même lampe sous globe. Dans l'exemple choisi, l'interposition du globe a pour effet de réduire l'intensité du rayon maximum de 240 à 105 carcels.

INTENSITÉ LUMINEUSE ET ÉNERGIE SPÉCIFIQUE. — L'intensité lumineuse maximum d'une lampe à arc peut être exprimée en fonction de l'intensité du courant par la formule simple suivante, établie par M. Palaz :

$$I_m = 200 i + 4 i^2$$

Pour un courant de 10 ampères, par exemple, la for-

¹ *Génie civil*, année 1893, t. XXII, nos 16 et 19.

mule donne une intensité maximum de 2400 bougies ou 240 carrels environ.

L'intensité moyenne sphérique s'en déduit par les formules énoncées plus haut, ou par celle encore plus simple de M. Rousseau :

$$I_{ms} = 0,35 I_h$$

Sachant qu'une lampe à arc à courant continu absorbe environ 50 volts à ses bornes et par suite $50 \times i$ watts, on en déduit la consommation d'énergie w par bougie moyenne sphérique. On a en effet les relations suivantes :

$$I_{ms} = 0,35 \times (200 i + 4 i^2)$$

d'où :

$$W = \frac{50 i}{0,35 \times (200 i + 4 i^2)} = \frac{1}{1,4 + 0,028 i}$$

Ces formules se rapportent à l'éclairage des lampes à feu nu. On en déduit que pour des courants variant de 4 à 30 ampères, l'intensité moyenne sphérique varie de 302 à 3360 bougies et la dépense en watts par bougie de 0,662 à 0,446 ; soit $1/2$ watt en moyenne.

Les lampes à incandescence émettent également des rayons d'intensités variables dans les diverses directions ; le rapport entre l'intensité moyenne sphérique et l'intensité horizontale, le plan du filament étant vertical, varie suivant les lampes, de 0,75 à 0,95.

L'intensité lumineuse de ces lampes est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle au cube de la puissance en watts absorbée ; par conséquent le rendement lumineux est d'autant plus élevé que la lampe est plus *poussée*, c'est-à-dire qu'on la soumet à une tension plus grande. elle dépense ainsi pour une résistance donnée, plus d'énergie, mais celle-ci est mieux utilisée au point de vue de la lumière, et la dépense spécifique peut alors s'abaisser de 4,5 watts à 2 watts et au-dessous, par bougie. Ce gain de lumière est contre-balancé en partie par l'usure des lampes, dont la durée tombe de 1100 à 100 heures, si l'on convient de les remplacer dès que leur pouvoir éclairant a diminué de 20 pour 100.

CHAPITRE XVI

ÉLECTRO-CHIMIE

255. **Électrolyse.** — L'énergie électrique est susceptible de produire des travaux chimiques, et notamment la décomposition de corps composés, amenés soit à l'état de dissolution, soit à l'état de fusion. Les corps ainsi soumis à l'action électrique constituent ce que l'on appelle des *électrolytes*, et l'opération prend le nom d'*électrolyse*.

L'électrolyse comprend plusieurs branches, dont les principales sont la *galvanoplastie*, l'*électro-métallurgie*, l'*affinage des métaux*, le *blanchiment* et la *désinfection*.

Un récipient électrolytique qui contient le corps à décomposer par le courant, doit être considéré comme un récepteur électrique qui, par suite de l'orientation ou *polarisation* des éléments de l'électrolyte ou des *ions*, comme on les nomme, développe une force contre-électromotrice qui donne justement la mesure du travail correspondant à la décomposition de l'équivalent électrochimique de l'électrolyte.

Nous avons vu ailleurs (tome I, § 38) comment on peut déduire la force électro-motrice présumée d'une pile, des réactions chimiques dont cette pile est le siège et des quantités de chaleur correspondant à l'énergie chimique de décomposition de chaque équivalent. Comme cette quantité de chaleur, ou l'*équivalent thermo-chimique*, se rapporte par définition à l'équivalent électro-chimique, c'est-à-dire à la quantité d'électrolyte

libérée par le passage de l'unité d'électricité ou coulomb, cette quantité d'électricité, en vertu du principe de la conservation de l'énergie, devra subir dans l'électrolyte une chute de potentiel correspondant à l'énergie thermo-chimique qu'exige cette décomposition.

Si l'on désigne par c la quantité de chaleur relative à l'équivalent en poids de l'électrolyte, celle afférente à l'équivalent électro-chimique décomposé par un coulomb sera, comme nous l'avons vu, $\frac{c}{96.600}$ et comme chaque unité de chaleur équivaut à 4,17 joules, l'énergie d'un coulomb ou sa chute de potentiel sera :

$$e = 4,17 \times \frac{c}{96.600} = 0,0432 \times c.$$

Si l'on applique cette relation à la décomposition de l'eau, pour laquelle $c = 34,6$ calories pour le poids équivalent d'un gramme, on obtient :

$$e = 0,0432 \times 34,6 = 1,42 \text{ volts-coulomb ou volts.}$$

La source d'électricité devra donc opposer à la force contre-électromotrice de l'eau électrolysée une force électromotrice de 1,49 volts et, en général, une force électromotrice égale à celle de polarisation de l'électrolyte. En réalité, on doit ajouter un terme correctif qui dépend de la température de l'électrolyte, et qui peut être nul, positif ou négatif, suivant la nature des électrolytes et des électrodes. Il faut tenir compte, d'ailleurs, de l'énergie électrique transformée en chaleur, d'après la loi de Joule, et qui sert à élever la température de l'électrolyte.

On désigne sous le nom d'*électrodes*, les corps sous forme de crayons ou de plaques, qui plongent dans l'électrolyte et servent à amener le courant de la source d'électricité au sein de la substance à électrolyser.

On nomme *électrode positive* ou *anode* celle qui est reliée au pôle positif de la source, *électrode négative* ou *cathode* celle qui est connectée avec le pôle négatif.

Le fait prédominant dans l'électrolyse est le transport des

ions, suivant une sélection déterminée, les uns sur l'anode, les autres sur la cathode. On admet que dans l'électrolyte, il existe des ions à l'état libre, qui sont chargés d'électricité de nom contraire et constituent des éléments *électro-positifs* ou *électro-négatifs* ; les premiers ou *cathions* s'orientent et se portent sur la cathode, c'est-à-dire dans le sens du courant à l'intérieur de l'électrolyte, les seconds ou *anions* s'orientent du côté de l'anode et se combinent avec elle.

Considérons, par exemple, l'électrolyte constituée par l'acide sulfurique étendue, dont la formule chimique est SO^4H^2 ; les ions ou éléments transportables sont ici l'hydrogène H^2 et le radical SO^4 , comme on l'appelle. Dans un pareil électrolyte, l'élément H^2 se sépare de l'élément SO^4 , en formant deux ions libres dont le premier H^2 se dégage sur la cathode, et SO^4 se porte sur l'anode.

Il en serait de même pour le sulfate de cuivre SO^4Cu^4 le radical SO^4 gagnant toujours l'anode et le métal se déposant sur la cathode.

Aux actions électrolytiques viennent se superposer des actions secondaires, qui dépendent de la nature de l'électrolyte, de celle des produits de l'électrolyse et des corps constituant les électrodes.

Il est évident, en effet, que si les produits de décomposition sont susceptibles de réagir sur l'électrolyte non décomposée ou sur les électrodes, ces corps mis en présence donneront lieu aux combinaisons chimiques ordinaires des corps doués d'affinité l'un pour l'autre.

Si, par exemple, dans l'électrolyse du sulfate de cuivre, les électrodes sont en platine, le radical SO^4 , qui se concentre autour de l'anode, ne pourra que décomposer l'eau en ses deux éléments, pour former avec son hydrogène l'acide sulfurique SO^4H^2 , tandis que l'oxygène se dégage ; si l'on remplace l'électrode de platine par une lame de cuivre, attaquable dans ces conditions, le radical SO^4 se combinera avec elle pour former du sulfate de cuivre qui se dissoudra dans le bain électrolytique.

De là, la considération très importante des *électrodes*

ou plus particulièrement des *anodes solubles*. En premier lieu, il se dissout dans le liquide aux dépens de l'électrode de cuivre, par exemple, une quantité de sulfate de cuivre exactement égale à celle de l'électrolyte décomposée, de telle sorte que le bain s'enrichit à chaque instant d'une quantité égale à celle dont il s'appauvrit, c'est-à-dire que la composition de l'électrolyte reste constante. Or cette circonstance est essentielle à réaliser pour que les dépôts galvanoplastiques sur la cathode se fassent régulièrement et dans des conditions identiques.

En outre, l'énergie dépensée pour l'électrolyse est notablement réduite dans le cas de l'anode soluble, car la dissolution du métal restitue intégralement l'énergie absorbée par la décomposition de l'électrolyte et la seule dépense nécessaire se réduit au travail qui correspond à l'échauffement du bain par l'effet Joule.

Il convient que le liquide reste toujours homogène, et pour cela que la diffusion se fasse régulièrement au sein du liquide, sans quoi le bain s'enrichirait au voisinage de l'anode soluble et s'appauvrirait à la cathode; il en résulterait une attaque de celle-ci et des dépôts sur l'anode. On favorise la diffusion par une élévation de température et par un brassage continu du liquide.

Il convient aussi d'avoir égard à la *densité* du courant d'électrolyse, c'est-à-dire au nombre d'ampères par décimètre carré de cathode sur laquelle s'effectue le dépôt du métal.

Nous relevons dans l'ouvrage de M. Eric Gérard le tableau ci-après, donnant pour divers sels métalliques la densité de courant et la différence de potentiel nécessaire à leur électrolyse :

Nature du sel à électrolyser.	Ampères par décimètre carré de cathode.	Différence de potentiel aux électrodes.
Sulfate de cuivre	1,2 à 1,7	0,7
Cyanure de cuivre	0,6	3,0
Cyanure d'argent	0,5	1,0
Cyanure d'or.	0,1	4,0
Sulfate double de nickel et d'aluminium	0,3 à 0,6	2 à 3

L'électrolyse par fusion trouve principalement son application dans l'électro-métallurgie : à l'action électrolytique de polarisation vient alors s'ajouter la chaleur dégagée par le courant, qui permet, dans l'espace restreint d'un creuset, de développer une température de 3500 degrés, alors que dans les fours métallurgiques on ne dépasse pas 2000 degrés.

Pour obtenir ces températures élevées, qui parviennent à désagréger les minerais les plus réfractaires, on emploie des densités de courant 200 à 300 fois plus grandes que dans l'électrolyse des dissolutions, car on n'a pas à craindre que le corps dissolvant réagisse sur les produits de l'électrolyse.

Les métaux alcalins et alcalino-terreux dont les minerais sont irréductibles par le charbon, pourront être obtenus par l'électrolyse ; pour les autres métaux, les procédés de l'électro-métallurgie n'ont été employés jusqu'ici avec quelque succès qu'en ce qui concerne l'aluminium et le zinc.

256. Electro-métallurgie de l'aluminium. — Ce métal est précieux par ses multiples qualités, de ductilité, de ténacité, d'inaltérabilité à l'air, et surtout par sa faible densité de 2,56, qui en fait le métal le plus léger que l'on connaisse. En outre, il a la propriété de former avec le cuivre, le zinc et le fer, des alliages stables, plus durs et plus inaltérables.

L'alliage de cuivre qui forme le bronze aluminium, couleur d'or, est employé en orfèvrerie, pour la fabrication des coussinets et des objets d'art. Le ferro-aluminium incorporé à l'acier et à la fonte, dans la proportion d'un millième environ, a la propriété d'abaisser le point de fusion de ces corps et de leur donner en même temps une fluidité et une homogénéité permettant d'obtenir des moulages très fins, exempts de bosses et de soufflures.

Enfin, ses minerais se trouvent répandus à profusion dans la nature sous forme d'argile ; toutefois les minerais le plus généralement traités sont la *bauxite* ou alumine hydratée, et la *cryolithe* ou fluorure double d'aluminium et de sodium.

Le premier procédé de traitement des minerais d'aluminium, imaginé par *M. Cowles*, avait pour but l'obtention du bronze-aluminium.

Le creuset électrique, de forme rectangulaire, est garni intérieurement d'un revêtement réfractaire formé d'une pâte de charbon de bois et de lait de chaux; aux deux extrémités pénètrent des faisceaux de crayons de charbon de 6 centimètres de diamètre, amenant le courant des dynamos génératrices.

Dans ce four on introduit un mélange d'argile ou de bauxite concassée avec du cuivre, ou du fer et du charbon, suivant qu'on veut obtenir du bronze ou du ferro-aluminium; on recouvre le mélange de charbon, et l'on ferme le creuset avec un couvercle en tôle garni de briques, en ayant soiu de laisser quelques ouvertures pour l'échappement des gaz.

On amène d'abord les électrodes de charbon au contact, puis on les écarte progressivement au fur et à mesure que la matière entre en fusion. Le minerai est réduit par le charbon, en donnant de l'aluminium et de l'oxyde de carbone qui s'échappe par les ouvertures, en produisant une flamme brillante; l'aluminium libéré s'allie au cuivre qui l'empêche de s'unir au carbone.

L'opération dure une heure et demie, et utilise un courant croissant jusqu'à 5000 ampères; la production du kilogramme de bronze-aluminium exige une dépense d'énergie de 45 chevaux-heure; celle du ferro-aluminium, 65 chevaux-heure.

Ce procédé, comme on le voit, ne met réellement en œuvre que la chaleur de l'arc voltaïque, et les réactions chimiques afférentes au pouvoir réducteur du charbon sur la bauxite en présence du cuivre.

Dans les systèmes *Héroult*, *Hall* et *Minet* on utilise à la fois l'effet calorifique du courant et sa puissance électrolytique.

La figure 483 donne la section du creuset Héroult: une caisse en fonte *a* est doublée intérieurement d'un revêtement réfractaire *A*, en briques de charbon aggloméré

au goudron; dans la plaque de graphite K. qui constitue le couvercle du fourneau, sont ménagées des ouvertures, tant pour l'introduction des matières à traiter que pour le passage d'un faisceau de plaques de charbon *b* formant l'électrode positive; l'électrode négative est constituée par le revêtement intérieur de charbon qui est relié au pôle correspondant de la dynamo par plusieurs barres *d*.

Dans ce procédé on n'emploie pas de charbon; si l'on veut obtenir du bronze-aluminium, on introduit d'abord le cuivre que l'on amène à l'état de fusion, puis on ajoute l'alumine qui fond à son tour et se superpose au bain de cuivre; l'électrolyse se produit alors, l'aluminium se porte vers la cathode et s'allie au cuivre qu'il rencontre en chemin, tandis que l'oxygène se dégage sur l'électrode positive qu'il brûle, en formant de l'oxyde de carbone.

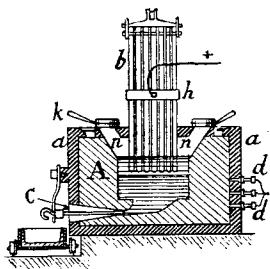


FIG. 483. — Creuset Héroult.

Le procédé Héroult permet aussi d'obtenir l'aluminium directement à l'état métallique; dans ce cas, pour augmenter la fusibilité de l'alumine, on la dissout dans un bain de cryolithe en fusion; la cathode est formée d'une couche de plombagine recouvrant le fond du creuset.

MM. Hall et Minet ajoutent comme fondant à la cryolithe, l'un du fluorure de calcium et de potassium, l'autre du chlorure de sodium.

On évalue à 40 kilowatts-heures, la dépense d'énergie par kilogramme d'aluminium obtenu; on arrive par ces procédés à un prix de revient de 1 fr. 90, qui permet de vendre actuellement l'aluminium au prix de 3 et 4 francs le kilogramme.

ÉLECTRO-MÉTALLURGIE DU ZINC.— M. Letrange soumet à l'électrolyse le sulfate de zinc en dissolution dans l'eau,

avec des anodes de charbon et des cathodes formées de plaques de zinc.

Le sulfate de zinc est obtenu par le grillage de la blende : ce minéral qui est un sulfure de zinc, produit par oxydation de l'oxyde de zinc et de l'acide sulfurique qui donnent le sel de zinc propre à l'électrolyse.

Dans le procédé Lambotte, les minerais grillés sont dissous dans l'acide chlorhydrique et se transforment en chlorure de zinc.

M. Heepfner obtient le chlorure, en grillant la blende avec du sel marin dans un four à reverbère ; la solution est électrolysée par des anodes de charbon et des cathodes consistant en disques de zinc qui sont animés d'un mouvement de rotation permanent. Le zinc se dépose sur les cathodes tournantes et le chlore dégagé aux anodes est aspiré dans des chambres de plomb où il se combine avec de la chaux en poudre, étalée sur des claies, pour former du chlorure de chaux, sous-produit de grande valeur commerciale.

AFFINAGE ÉLECTRIQUE.— *Raffinage du cuivre.*— Cet affinage a pour but de purifier les métaux par les moyens électrolytiques.

Les procédés métallurgiques ordinaires ne permettent pas d'obtenir le cuivre à l'état de pureté. On traite donc par l'électrolyse les cuivres bruts industriels, qui contiennent de 96 à 98 pour 100 de cuivre pur.

Le cuivre brut industriel, coulé en plaques, est employé comme anode dans un bain de sulfate de cuivre acide ; la cathode est formée par une lame mince de cuivre déjà raffiné.

Celle-ci se recouvre de cuivre pur, tandis que l'anode se dissout dans l'électrolyte avec ses impuretés, à l'exception de l'or, du platine et de l'argent qui tombent au fond du bain.

Parmi les impuretés dissoutes, l'arsenic, l'antimoine et le bismuth sont les plus facilement réduits, et tendent à se déposer sur la cathode, si la densité du courant est trop élevée.

Les cuves électrolytiques sont en bois doublé de feuilles de plomb; la solution acidulée de sulfate de cuivre a une densité de 1,15 en moyenne; le liquide est chauffé l'hiver à 25 degrés, par injection de vapeur. Pour que la composition des bains ne varie pas, on établit une circulation du liquide d'un bac à l'autre, et l'on remonte le liquide de la cuve inférieure dans la plus élevée, à l'aide d'un injecteur.

Au lieu de relier les anodes et les cathodes des diverses cuves en quantité, MM. Smith et Hayden ont disposé les plaques de cuivre à raffiner, laminées sous forme de plaques minces, dans la cuve électrolytique, de manière à constituer autant de cloisons étanches parallèles. Dans ce système, les plaques extrêmes sont seules reliées aux pôles de la dynamo; les auges successives ainsi formées constituent autant de bacs électrolytiques dont chaque cloison joue le rôle d'anode sur l'une de ses faces et de cathode sur l'autre.

La différence de potentiel entre les plaques extrêmes se répartit donc uniformément d'un bac à l'autre et ceux-ci se trouvent ainsi alimentés en série; le cuivre de chaque plaque se transporte sur la plaque en regard, qui, elle-même, se dissout sur la face opposée et ainsi de suite dans toute l'étendue de la cuve. Ce procédé, qui présente l'avantage d'utiliser des tensions élevées et de réduire l'importance des conducteurs de connexion, est toutefois moins employé que le procédé par électrodes en parallèles.

RAFFINAGE DU PLOMB, DE L'ARGENT, DE L'OR. — Le raffinage du plomb n'a pas précisément pour but d'obtenir ce métal à l'état de pureté, mais bien plutôt d'en extraire les métaux précieux, tels que l'or, l'argent et l'antimoine qu'il contient.

Le procédé Keith comporte un bain de sulfate de plomb dissout dans l'acétate de soude, dans lequel on plonge des cathodes formées de plaques de plomb pur et des anodes du métal à raffiner.

Le plomb brut de l'anode, enfermé dans des sacs de

mousseline, se dissout dans la liqueur, tandis que l'or, l'argent et l'antimoine se déposent dans les sacs.

Le raffinage de l'argent brut, contenant entre autres corps étrangers du plomb, de l'étain et de l'or, se fait dans un bain d'eau légèrement acidulée par l'acide nitrique. Les anodes d'argent brut sont enfermées dans des sacs de toile; les métaux usuels se dissolvent dans l'acide, mais le plomb, l'étain et l'or restent dans les sacs où ils sont recueillis; l'argent se dépose sous forme cristalline sur les cathodes animées d'un mouvement continu.

Enfin, les bains de cyanure d'or sont électrolysés par des anodes en fer et des cathodes en plomb; l'or se porte sur le plomb, dont il est facile de le séparer ultérieurement, tandis que le fer se dissout à l'état de cyanoferrure ou bleu de Prusse.

257. **Galvanoplastie.** — Cette opération électrolytique comprend deux objets, l'un concernant la reproduction de modèles artistiques, par le dépôt dans un moule d'une couche de cuivre non adhérente; l'autre consistant simplement à recouvrir les pièces en matières communes, plâtre, fer, fonte, zinc au plomb, d'une couche mince de métal inaltérable ou précieux, cuivre, argent, or, nickel.

La reproduction des objets d'art par la galvanoplastie comporte en premier lieu l'établissement du *moule*; celui-ci peut être constitué par des matières plastiques, telles que le plâtre, la cire, la stéarine, la gélatine; on emploie aussi l'alliage fusible de Darcet, bismuth, plomb, étain, antimoine, qui, amené par le chauffage à l'état pâteux, peut recevoir exactement l'empreinte de l'objet à reproduire. La substance la plus employée est la gutta-percha; celle-ci ramollie dans l'eau bouillante est appliquée sur le modèle, ou même peut être fondue et coulée sur les objets, dont elle épouse les moindres détails avec une grande fidélité.

Les moules en matière isolante doivent être *métallisés* pour que leur surface soit rendue conductrice; à cet effet, on les recouvre d'une couche mince de plombagine, à

l'aide d'une brosse. Pour les pièces très finement ciselées, les moules plongés dans une solution de nitrate d'argent, se recouvrent d'une pellicule conductrice de sulfure d'argent, sous l'action d'un courant d'hydrogène sulfuré.

Dans l'opération électrolytique, le moule forme la cathode dans une dissolution du métal qui doit reproduire le modèle ; l'anode est généralement constituée par une plaque de même métal qui joue le rôle d'électrode soluble.

Pour les médailles et bas-reliefs, le bain peut être disposé comme l'indique la figure 484. Le bain, qui est géné-

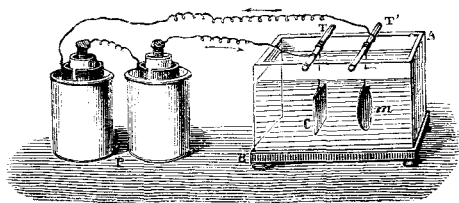


FIG. 484. — Appareil de galvanoplastie.

ralement composé d'une dissolution de sulfate de cuivre, est contenu dans une cuve étanche, de verre ou de bois enduit intérieurement de gutta-percha. Sur les bords du vase sont posées deux tiges métalliques T, T' reliées respectivement à chacun des pôles de la source d'électricité, pile ou dynamo.

Sur la tige T', en relation avec le pôle négatif, sont suspendus les moules tels que *m* et, sur l'autre tige, une ou plusieurs plaques de cuivre C, servant d'anodes solubles.

Pour la reproduction des pièces en ronde bosse, bustes, statuettes ou statues monumentales, le moule en gutta-percha est fait de plusieurs morceaux, puisque l'empreinte de l'objet est nécessairement contenue à l'intérieur et que celui-ci doit être retiré sans aucune déformation du moule.

C'est également à l'intérieur que se déposera le cuivre, comme un noyau épousant exactement la paroi qui a reçu

l'empreinte de l'objet à reproduire; il suit de là que l'électrode positive doit être placée elle-même à l'intérieur du moule et rester intacte pendant l'opération, donc être constituée d'un métal insoluble dans l'électrolyte.

Cette électrode est constituée par une carcasse dont la silhouette se rapproche le plus possible de la forme intérieure du moule, mais sans qu'aucune partie vienne en contact avec lui, ainsi que le montre la figure 485. Cette

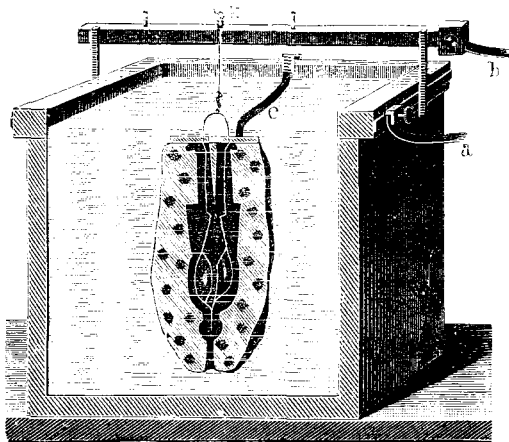


FIG. 485. — Reproduction d'une ronde-bosse.

carcasse, construite primitivement en fils de platine, fut exécutée ensuite avec du plomb, sur les indications de Gaston Planté.

Le moule, enduit intérieurement de plombagine, est plongé dans le bain et relié par le conducteur *e* au pôle négatif de la source; le squelette de plomb servant d'anode est maintenu dans l'axe du moule et suspendu à la barre *k* en relation avec le pôle positif; de petites ouvertures doivent être ménagées à la partie supérieure et à la base du moule, pour permettre la libre circulation du liquide à l'intérieur.

Pour augmenter l'épaisseur de la couche galvanoplastique et donner à la pièce toute la rigidité voulue, on peut augmenter la durée de l'électrolyse autant qu'il est nécessaire. Un procédé moins coûteux consiste à couler à l'intérieur de la couche galvanique, réduite à l'épaisseur minimum, de l'étain ou un alliage fusible qui en forme un bloc résistant.

La nature des dépôts dépend essentiellement de la densité du courant : si elle est faible, le dépôt est cristallin ; de valeur moyenne, le dépôt prend l'apparence du métal fondu ; très élevée, la couche déposée est noire et pulvérulente. Il convient d'employer au début de l'opération une densité faible, ne dépassant pas 0,3 ampère par décimètre carré de surface de cathode, afin que la première couche s'incruste dans les détails les plus fins du moule ; on peut ensuite augmenter progressivement le courant, jusqu'à la fin de l'opération.

On fait aussi l'application de la galvanoplastie à la reproduction des gravures et cette opération est désignée sous le nom d'*électrotypie*. Elle consiste à traiter les planches gravées sur cuivre, sur acier et surtout sur bois, comme les médailles et bas-reliefs quelconques ; le moule de gutta-percha est électrolysé dans un bain de sulfate de cuivre et le cliché galvanique est ensuite renforcé, en coulant par derrière une couche d'un alliage fusible, plomb, antimoine, étain.

DÉPÔTS ÉLECTRO-CHIMIQUES. — *Argenture*. — *Dorure*. — *Cuivrage*. — *Nickelage*. — Les dépôts galvaniques qui ont simplement pour but de recouvrir d'une couche de métal inaltérable ou précieux un objet de matière commune, s'obtiennent par des procédés analogues aux précédents et cette opération forme l'une des branches de la galvanoplastie.

Il est essentiel, pour que le dépôt soit adhérent, que la surface à recouvrir soit bien homogène, exempte d'oxydation et surtout d'enduits gras ; les métaux doivent donc être préalablement décapés par une solution faible d'acide sulfurique pour le fer, d'acide nitrique pour le cuivre ;

les dépôts gras sont enlevés par un bain de carbonate de soude.

Pour l'*argenture*, le bain se compose d'une dissolution de cyanure d'argent dans une solution aqueuse de cyanure de potassium. La figure 486 représente une cuve pour

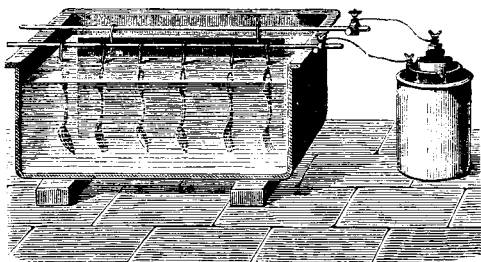


FIG. 486. — Argenture des couverts.

l'*argenture* des couverts. Les pièces de cuivre ou de laiton, après avoir subi les opérations préliminaires de décapage, dégraissage et lavage, sont suspendues dans le bain à une barre de cuivre en relation avec le pôle négatif de la source d'électricité ; une plaque d'argent formant cathode est attachée sur une autre barre, à faible distance et s'étend sur toute la longueur de la rangée de couverts.

La densité de courant est environ d'un tiers d'ampère par décimètre carré de cathode.

Les bains de *dorure* sont composés de cyanure d'or dissous dans un excès de cyanure de potassium. On emploie soit une anode d'or vierge soutenue par des fils de platine, soit une anode insoluble en platine dans le cas de la dorure à chaud, pour laquelle on porte le bain à la température de 50 à 80 degrés.

On peut obtenir des teintes très variées, du rouge au vert, en ajoutant aux bains d'or des solutions de cuivre ou d'argent, ou en utilisant comme anodes des alliages d'or et d'argent ou de cuivre.

Le *cuvrage* est surtout employé pour recouvrir les métaux oxydables tels que la fonte de fer et leur donner

un aspect artistique ; les candélabres de l'éclairage public de la ville de Paris sont ainsi revêtus d'un dépôt galvanique de cuivre. On soumet également à un cuivrage préalable les objets de zinc, de fer et autres qui doivent être dorés, nickelés ou argentés, afin d'assurer l'adhérence des dépôts de métaux précieux.

On emploie pour les bains, les solutions de cyanure double de potassium et de cuivre, ou encore d'oxalate double de cuivre et d'ammonium, avec excès d'acide oxalique. Le procédé spécial imaginé par M. Oudry consiste à recouvrir les objets en fer ou fonte, d'une peinture au minium ou d'un vernis, pour soustraire le métal à l'action de l'acide sulfurique contenu dans le bain de sulfate de cuivre utilisé ; la surface est d'ailleurs rendue conductrice par la plombagine.

Le *nickelage* se fait dans un bain de sulfate double de nickel et d'ammonium dissous dans l'eau distillée, que l'on doit maintenir absolument neutre pendant l'opération. On peut se servir, soit d'une anode soluble de nickel pur, soit d'une anode insoluble en platine ou en charbon ; le bain doit être maintenu à la température de 40 degrés environ.

Enfin on pratique également le *zincage* galvanique, en traitant les objets à recouvrir de la couche protectrice de zinc, dans des bains de sulfate avec anodes du même métal.

258. **Électro-chimie des chlorures alcalins.** — Les chlorures alcalins et notamment le chlorure de sodium, dont l'Océan constitue une mine inépuisable, contiennent deux éléments associés, le chlore et la soude, qui constituent des matières précieuses pour l'industrie. L'électrolyse permet de séparer ces corps, dans des conditions souvent plus économiques que les procédés purement chimiques.

D'après les lois des polarisations électro-chimiques, la solution aqueuse de chlorure devrait donner un dégagement de chlore à l'anode, tandis que le sodium métallique se porterait sur la cathode, mais le sodium étant doué d'une affinité chimique très puissante pour l'eau, se combine avec ce liquide pour donner de l'hydrate sodique et

de la soude, avec dégagement d'hydrogène qui peut être également utilisé.

Le chlore qui se dégage à l'anode est dirigé sur de la chaux éteinte, pour former du chlorure de chaux, ou dans des solutions concentrées de potasse ou de soude, en vue de produire des chlorates.

Pour pouvoir obtenir la soude caustique (NaHO) de l'opération précédente, il faut soustraire cette soude à l'action du chlore au fur et à mesure de la séparation des éléments, car le chlore tend à s'unir à la soude pour former l'hypochlorite (NaOCl).

L'un des procédés utilisés à cet effet, consiste à diviser la cuve en deux compartiments par une cloison poreuse ; l'anode en charbon plonge dans l'un, et la cathode, généralement en fer, est placée dans l'autre.

Les cloisons poreuses ont l'inconvénient d'augmenter considérablement la résistance intérieure de l'électrolyte et par suite la dépense d'énergie électrique. Pour y remédier on a disposé des cloisons incomplètes s'arrêtant à une certaine distance du fond de la cuve ; la soude formée se rassemble en dessous de la cathode, tandis qu'on fait arriver l'électrolyte frais dans le compartiment de l'anode. D'autres procédés consistent à faire circuler une nappe de mercure, en couche mince, dans les fonds d'une cuve à deux compartiments ou de deux cuves séparées. Dans ces conditions, le sodium se combine avec le mercure et l'amalgame ainsi formé se décompose en présence de l'eau pour donner de la soude caustique, en libérant le mercure qui est ramené dans le compartiment supérieur par une pompe élévatoire.

Quand on n'emploie pas de moyen particulier pour éviter la combinaison des produits de la décomposition, on obtient, comme nous l'avons dit, des hypochlorites, et si l'on chauffe l'électrolyte entre 45 et 80 degrés, des chlorates de potasse ou de soude.

Les hypochlorites de sodium et de magnésium en dissolution dans l'électrolyte sont employés directement au blanchiment des tissus et des pâtes à papier. M. Hermite

a appliqué l'électrolyse de l'eau de mer à la désinfection des eaux d'égout ; il se forme dans l'opération, au pôle positif, des composés oxygénés du chlore, doués d'un grand pouvoir désinfectant, et au pôle négatif, des oxydes capables de précipiter les matières organiques.

FABRICATION DU CARBURE DE CALCIUM. — La chaleur considérable développée par l'arc voltaïque a été utilisée par M. Moissan pour fondre les matières les plus réfractaires et reproduire dans le creuset électrique les pierres les plus précieuses et même la poussière de diamant.

Il réussit, d'autre part en 1892, à combiner le carbone avec le calcium de la chaux vive ; sous l'influence d'une température de 3000 degrés, et en présence du charbon, la chaux (Ca O) abandonne son oxygène O au charbon C, pour former de l'oxyde de carbone qui brûle et le calcium Ca, libéré, s'allie à une autre portion du charbon pour former le *carbure de calcium*.

Or, en 1893, Wilson découvrit, par l'effet du hasard, que ce corps mis au contact de l'eau, donne lieu à un dégagement de gaz facilement inflammable, l'*acétylène*, qui est doué d'un pouvoir éclairant considérable. Dès lors, l'industrie de l'éclairage avait à sa disposition un nouvel agent capable de lutter, par son intensité lumineuse, avec les foyers électriques eux-mêmes.

On fabrique donc du carbure de calcium en vue d'obtenir l'acétylène. Cette opération se fait dans des creusets électriques analogues à ceux qui servent à la fabrication de l'aluminium.

Les creusets A, en fer ou maçonnerie, sont garnis intérieurement de plaques de charbon (fig. 487) : le creuset est chargé d'un mélange de chaux et de coke en poudre où plongent les électrodes C de charbon, reliés à l'un des

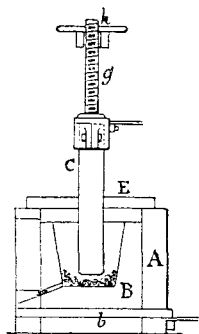


FIG. 487. — Creuset électrique pour le carbure de calcium.

pôles de la source ; la sole du creuset est reliée d'autre part au second pôle, par la plaque métallique *b*.

Les plaques de charbon serrées dans une douille métallique sont suspendues par une tige filetée *g* qui peut être relevée ou abaissée à l'aide du volant à écrou *h*, de manière à rapprocher ou éloigner cette électrode à distance convenable ; l'arc électrique jaillit entre les charbons et la sole du four, opère la fusion du mélange et produit la réaction voulue.

On a appliqué également les courants triphasés à l'alimentation des fours à carbure de calcium, et l'on a ainsi obtenu une production de 3,5 kilogrammes de carbure par cheval, en vingt-quatre heures.

Le *carborundum* ou *carbure de silicium*, corps très dur, pouvant remplacer l'émeri, s'obtient par un procédé analogue, en substituant à la chaux, dans le mélange précédent, du sable de verrerie et du sel marin.

PRODUCTION INDUSTRIELLE DE L'OXYGÈNE, DE L'HYDROGÈNE ET DE L'OZONE. — L'*oxygène* et l'*hydrogène*, résultant de la décomposition de l'eau, ont des applications multiples, parmi lesquelles la plus importante est celle de l'alimentation du chalumeau oxhydrique, pour la soudure et le travail des métaux.

On ne peut se contenter aujourd'hui du simple voltamètre électrolysé par quelques éléments de piles ; on emploie de vastes cuves électrolytiques cloisonnées pour séparer les gaz, avec des électrodes en acier plongées dans de l'eau chargée de potasse ou de soude caustique.

L'*ozone*, cet oxygène concentré pour ainsi dire, reçoit également aujourd'hui un grand nombre d'applications dans l'industrie. Ce corps, doué de propriétés oxydantes très énergiques, peut servir à la décoloration de divers liquides et à la purification des eaux contaminées.

La préparation de l'ozone ne constitue pas à proprement parler une opération électrolytique ; on l'obtient en faisant passer un courant d'oxygène ou d'air sec entre deux cloisons isolantes, comprises elles-mêmes entre les électrodes reliées à la bobine secondaire d'un transforma-

teur, donnant des tensions de 10.000 à 30.000 volts. Dans ces conditions, il se produit dans l'intervalle des cloisons isolantes, un effluve électrique sans étincelles, que l'on pourrait comparer, dans le domaine lumineux, à la lumière diffuse; c'est dans ce milieu que l'oxygène se transforme en ozone.

Ce corps est assez instable, et doit être soustrait immédiatement à l'influence de l'effluve dès qu'il se produit: une grande partie de l'énergie électrique est transformée inutilement en chaleur, et l'on n'obtient guère que 50 à 80 grammes d'ozone par cheval-heure.

SOUDURE ÉLECTRIQUE. — La chaleur intense développée par les courants de grande intensité dans les conducteurs et notamment à travers les contacts métalliques, a été utilisée pour effectuer la soudure autogène des métaux.

Le procédé *E. Thomson* consiste à faire pénétrer le courant d'une source plus ou moins intense d'électricité dans le voisinage des bouts des barres ou des bords des tôles à souder; le joint formé par le rapprochement des surfaces préalablement amincies est serré dans un étau, mais le contact toujours imparfait présente une résistance qui, par l'effet Joule, amène les pièces au blanc soudant dans la région du joint.

Les courants alternatifs se prêtent d'une manière toute particulière à cette opération, par la facilité qu'ils présentent de pouvoir se transformer en courants de grande intensité et de faible tension; la soudure de barres en cuivre de 11 millimètres de diamètre exige en effet un courant de 10.000 ampères et une différence de tension d'un volt seulement.

La résistance mécanique de la soudure électrique, à la traction, serait légèrement supérieure à celle de la soudure ordinaire.

M. de Benardos utilise directement l'action de l'arc voltaïque, soit pour la soudure autogène du plomb, soit pour celle des autres métaux.

Les pièces à souder sont juxtaposées sur une table en fonte, en relation avec l'un des pôles de la source d'élec-

tricité ; un crayon de charbon, relié par un fil souple à l'autre pôle, est approché jusqu'au contact d'un point du joint à souder, puis écarté de manière à faire jaillir l'arc voltaïque : le crayon est ensuite déplacé tout le long du joint et détermine la fusion et la soudure du métal.

On peut, à l'aide de l'arc, percer des trous dans les tôles et fondre les extrémités d'un cylindre métallique engagé dans les trous, de manière à effectuer une véritable rivure électrique. Toutefois, ce procédé appliqué à la rivure des tôles des chaudières, ne paraît pas présenter les mêmes conditions de sécurité que le rivetage mécanique, le martelage ayant pour effet de rendre le fer nerveux et plus tenace.

Le jet gazeux qui jaillit entre les deux extrémités des crayons d'une lampe à arc, subit, comme tout circuit traversé par un courant, l'influence d'un champ magnétique. En disposant les deux pôles d'un électro-aimant, de part et d'autre de l'arc produit par les charbons d'un régulateur, M. Zerener a réalisé un véritable chalumeau électrique, dont la flamme est projetée extérieurement sous forme d'un dard de grande puissance calorifique.

Plus récemment, MM. Lagrange et Hoho ont imaginé un système de soudure *électro-hydrothermique*. Ce procédé utilise à la fois les puissances thermique et électrolytique de l'électricité. La barre métallique à forger est plongée, à l'aide d'une tenaille, dans une solution aqueuse de carbonate de potasse et joue le rôle de cathode ; l'anode est constituée par une plaque de plomb de grande dimension.

L'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau se porte sur la cathode et l'entoure d'une gaine gazeuse qui offre une grande résistance au passage de l'électricité ; cette région devient par suite le siège d'un grand développement de chaleur qui, pour une densité de courant suffisante, porte rapidement le métal de la cathode au blanc soudant.

Si l'on veut tremper le métal, il suffit d'interrompre le courant pour amener le liquide froid au contact de la pièce. Dans le cas où ce métal est destiné à être travaillé ou soudé, mais non à être trempé, il convient de porter le bain à la température de 50 à 70 degrés centigrades.

CHAPITRE XVII

CANALISATIONS. — APPAREILS DE MESURE. CONDUITE DES DYNAMOS

Canalisations.

Il y a lieu de considérer dans cette question, les conducteurs qui transportent l'électricité au dehors, d'une part, et les conducteurs qui servent à distribuer le courant aux appareils d'utilisation placés à l'intérieur des habitations ou des établissements industriels, d'autre part. Les premiers constituent les *canalisations extérieures*, les seconds les *câbles* ou *fils d'installation intérieure*.

Les canalisations extérieures comprennent deux catégories : les *aériennes* qui sont généralement formées en fil nu de cuivre ou de bronze silicieux, et les souterraines qui comportent plus souvent l'emploi de câbles en cuivre recouverts d'enveloppes isolantes.

259. Canalisations aériennes — Les lignes aériennes sont supportées par des isolateurs en porcelaine, fixés eux-mêmes, par une tige de fer, soit sur des poteaux en bois injectés de sulfate de cuivre ou de créosote, pour leur conservation ; soit sur des poteaux métalliques ; soit sur des consoles ou des potelets en fer.

Les derniers supports sont ancrés dans les murs ou les charpentes des habitations. Les poteaux, de 6 à 12 mètres de hauteur et au delà, sont plantés dans le sol à des pro-

fondeurs variant de 1^m 5 à 2^m 5, et fixés à l'aide de grosses pierres ou d'un scellement de béton.

Aux changements de direction, les supports pour résister à l'effort d'arrachement ou de renversement des fils, doivent être pourvus de haubans ou de jambes de force que l'on dispose dans le plan vertical de la résultante des efforts obliques.

Les isolateurs en porcelaine émaillée sont à simple cloche dans le cas des courants à faible tension, notam-

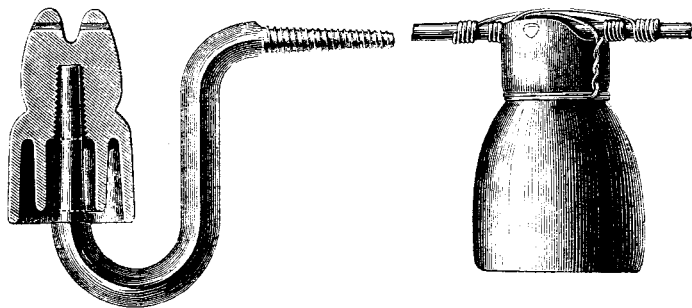


Fig. 488. — Isolateur à double cloche.

ment pour la télégraphie et la téléphonie. Pour les courants industriels, on emploie plutôt des isolateurs à double cloche, tels que le modèle représenté par la fig. 488.

Ici le conducteur passe dans une rainure pratiquée au sommet de l'isolateur, et il est assujéti, soit par une clavette transversale, soit par une ligature fixée sur la gorge moyenne. D'autres fois le conducteur est placé latéralement dans la dite gorge, où il est maintenu par le fil de ligature.

La cloche intérieure présente des filets de vis destinés à assurer le scellement au plâtre de la tige de fer galvanisé qui porte l'isolateur et qui peut d'ailleurs s'y visser après avoir été recouverte de filasse goudronnée. La cloche extérieure se trouve ainsi isolée du support en fer

par un manchon d'air dont les parois sont soustraites aux dépôts d'humidité.

Pour le transport de l'énergie électrique à haute tension, on emploie des isolateurs à huile, soit en une pièce A, soit en deux pièces B, dont l'inférieure formant godet peut être abaissée en retirant la clavette qui la soutient, pour visiter le réservoir d'huile (fig. 489).

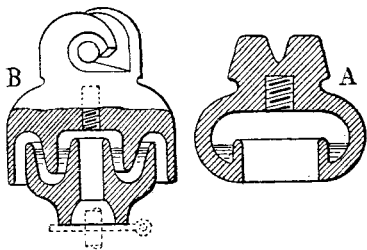


FIG. 489. — Isolateur à huile, pour haute tension.

Quand il s'agit d'établir une prise de courant intérieure sur une ligne aérienne, on emploie la disposition représentée par la figure 490. La ligne aérienne vient s'arrêter sur un isolateur fixé au-dessous de l'isolateur *a*, de prise de courant, dit isolateur d'entrée de poste. Celui-ci est constitué par une sorte de pipe en porcelaine, dans l'axe de laquelle on fait passer le conducteur isolé intérieur ; ce conducteur, dénudé à son extrémité *c*, vient se fixer sur le fil de ligne où il est soudé avec soin.

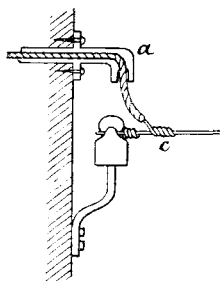


FIG. 490. — Isolateur d'entrée de poste.

Le fil de cuivre présentant une résistance mécanique à la rupture relativement faible, de 28 kilogrammes par millimètre carré, on fait plutôt usage du bronze phosphoreux ou silicieux. La ténacité que le phosphore ou le silicium communiquent au cuivre, élève la charge de rupture à 45 et 75 kilogrammes par millimètre carré, mais la présence de ces corps abaisse la conductibilité de l'alliage de

95 et 40 pour 100 de celle de cuivre pur, suivant la proportion du mélange.

On commence à utiliser les conducteurs d'aluminium qui, vu la faible densité de ce métal, forment des lignes dont le poids est moitié moindre que celui des fils de cuivre, à conductance égale; la seule difficulté réside dans la jonction des fils qui, ne pouvant pas être soudés, exigent la façon d'un joint spécial.

Les fils de fer ou d'acier peuvent être réunis par le joint à double torsade (fig. 491); mais avec des fils plus

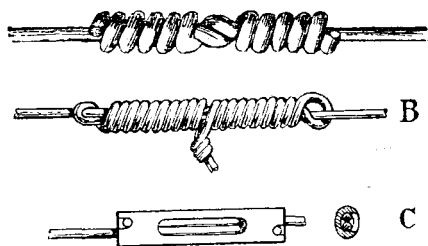


FIG. 491.— Ligatures des fils aériens.

élastiques comme ceux en bronze silicieux, on emploiera de préférence le joint B, qui s'obtient en effectuant la torsade d'avant en arrière, de telle sorte que les spirales, au lieu de

glisser, tendent à se resserrer par la traction.

Le joint par manchon, représenté par la troisième figure C, consiste à introduire les extrémités des fils dans une sorte de gouttière de même métal, en les arrêtant sur les bords par un crochet; puis on remplit de soudure la cavité du manchon.

Quand il s'agit de fils d'aluminium, les deux bouts sont introduits respectivement dans deux tubes géminés, qui sont ensuite tordus ensemble à l'aide d'outils appropriés.

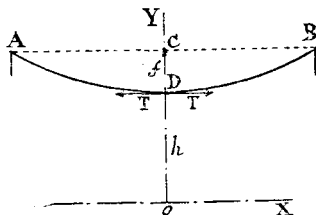
Pour la pose des lignes, on doit avoir égard à la distance des supports, à la tension du fil qui doit toujours rester éloignée de l'effort de rupture, à la flèche et à la hauteur du fil au-dessus du sol.

On doit tenir compte de la température au moment de la pose, car les basses températures augmentent la tension du fil, par le retrait, et des températures notablement plus

élevées allongent le fil, par dilatation, et peuvent augmenter la flèche au point d'amener au contact les fils voisins des diverses lignes.

CALCUL DE LA TENSION D'UN FIL AÉRIEN. — Il existe une relation pratique assez simple entre la portée $AB = a$, formant l'intervalle des supports A et B (fig. 492), le poids p du fil par unité de longueur, la flèche f et la tension T , au point D le plus bas de la chaîne formée par le fil conducteur. Cette relation est la suivante :

$$f = \frac{a^2 \times p}{8T}$$



Cette formule permet de calculer la flèche lorsqu'on se donne la portée, le poids et la tension T . On peut au contraire calculer cette tension, quand on s'est donné la flèche, en écrivant la relation précédente sous la forme :

$$T = \frac{a^2 \times p}{8f}$$

Soit, par exemple, à calculer la tension, au point le plus bas, pour un fil de bronze silicieux de 4 millimètres de diamètre, une portée $a = 100$ mètres et une flèche $f = 1$ mètre.

La section étant de $0,126 \text{ cm}^2$, le poids par mètre d'un pareil fil sera de $0,112$ kilogramme et sa résistance totale à la rupture de 945 kilogrammes, à raison de 75 kilogrammes par millimètre carré.

On obtient, en appliquant la formule :

$$T = \frac{10000 \times 0,112}{8} = 140 \text{ kilogrammes}$$

Le rapport $\frac{140}{945} = 0,15$ est ce qu'on appelle le coefficient de sécurité; il est ici égal à $\frac{1}{6}$ environ, donc inférieur au maximum qui ne doit pas dépasser $\frac{1}{4}$.

Il ne faut pas perdre de vue que la formule ci-dessus donne la tension pour les conditions de température existant au moment de la pose, or un abaissement subséquent de température augmente la tension, par l'effet de contraction qui se produit. La tension peut ainsi varier du simple au triple, dans les limites extrêmes de température de nos pays.

On devra donc régler la tension au moment de la pose, de telle sorte que la contraction et aussi la surcharge pouvant provenir d'un dépôt de givre ne dépasse pas, par les plus grands froids, la tension limite de sécurité.

On trouve dans les aide-mémoire des tableaux indiquant pour chaque portée et pour les diverses températures, la tension qu'il ne faut pas dépasser pour conserver dans tous les cas un coefficient de sécurité convenable. La tension désirée est obtenue à l'aide d'une pince à mâchoires saisissant le fil, qui fait partie d'un dynamomètre sur lequel l'ouvrier poseur exerce la traction nécessaire, à l'aide d'une paire de moufles.

260. Canalisations souterraines.— Ces canalisations sont constituées soit par des conducteurs nus disposés sur isolateurs, soit par des câbles revêtus d'enveloppes isolantes, placés les uns et les autres dans des conduites souterraines. Les câbles isolés sont également susceptibles d'être posés directement dans le sol, quand ils sont *armés*, c'est-à-dire pourvus d'une protection mécanique, formée généralement de rubans d'acier.

SUBSTANCES ISOLANTES.— Parmi les substances employées pour l'isolement des câbles, on doit citer en première ligne le caoutchouc, puis la gutta-percha, la paraffine, les résines et des isolants de natures diverses.

Le *caoutchouc*, extrait du suc laiteux de diverses plantes des Indes et d'Amérique, possède la propriété bien connue d'être très élastique à la température ordinaire. Au-dessous de 10 degrés il perd son élasticité; sous l'influence de la chaleur, il devient de plus en plus souple, passe à l'état poisseux vers 145 degrés et fond de 170 à 180 degrés en un liquide épais et gluant.

L'élément visqueux contenu dans le caoutchouc brut est susceptible de s'altérer à l'air; on le rend inaltérable en

chauffant, à la température de 130 degrés, le caoutchouc mélangé avec 10 pour 100 de soufre; les deux corps se combinent en partie, pour former ce qu'on appelle le *caoutchouc vulcanisé*. A cet état, le caoutchouc est extrêmement souple et nerveux; il ne se durcit plus au froid et ne fond plus qu'à 200 degrés. En outre, il est beaucoup moins facilement pénétré par l'eau que le caoutchouc brut et n'absorbe que 4 pour 100 au lieu de 25 pour 100 de ce liquide.

Quand on emploie le caoutchouc vulcanisé pour isoler les conducteurs, il faut avoir soin de recouvrir d'abord le cuivre d'une couche d'étain pour éviter qu'il soit attaqué par le soufre. On peut encore placer une première couche de caoutchouc naturel en contact immédiat avec le cuivre et par-dessus le caoutchouc vulcanisé.

Si l'on combine le caoutchouc réduit en pâte, à la température de 150 degrés, avec le cinquième de son poids de soufre, il devient très dur et susceptible d'acquérir un beau poli comme l'ébène; ce produit constitue l'*ébonite* dont on se sert pour faire des plaques et supports isolants en électricité.

La *gutta-percha* s'extrait de l'*Isonandra-Gutta*, plante de l'archipel de la Malaisie. Cette gomme, après épuration, est souple et peu élastique, mais elle est douée d'une imperméabilité parfaite, qui la fait employer de préférence dans la fabrication des câbles sous-marins.

A l'air elle s'altère et se transforme en une sorte de résine cassante. Elle ne durcit pas à basse température, mais elle s'amollit vers 40 degrés, devient pâteuse à 100 degrés et fond à 130 degrés. Pour cette cause, on ne l'utilise pas pour les conducteurs servant à la distribution des courants industriels, toujours relativement intenses.

On peut vulcaniser la *gutta*, soit seule soit unie au caoutchouc. En augmentant la proportion de soufre, et la durée du chauffage, elle se transforme en une matière noire et dure comme l'ébonite.

On emploie aussi la *paraffine*, qui forme avec la vaseline l'un des derniers produits les moins volatils de la

distillation du goudron. Cet isolant présente l'inconvénient d'être cassant et de se fissurer. L'*ozokérite*, sorte de cire fossile, analogue à la paraffine, ne présente pas le même inconvénient.

Le *papier*, sous forme de rubans enroulés autour du conducteur, sur une épaisseur suffisante, constitue un isolant très puissant et inaltérable, lorsque le câble est recouvert d'un tube de plomb imperméable,

La *fibre vulcanisée*, formée de fibres végétales, réduites en pâte à papier, et soumises à des opérations mécaniques et chimiques, constitue une matière très compacte, qui peut être travaillée facilement pour la fabrication de pièces isolantes. Cette substance ne se ramollit pas par la chaleur, mais elle est nécessairement combustible et ne doit pas être employée comme support de coupe-circuit et d'interrupteurs notamment.

Les huiles lourdes ou *oléonaphtes* provenant du traitement du pétrole russe possèdent un pouvoir diélectrique considérable, comme toutes les huiles et notamment celles dérivées du pétrole, en général. Elles offrent au passage de l'électricité à haute tension une résistance plus efficace que l'air sec lui-même, aussi les utilise-t-on particulièrement dans ce cas.

Enfin on emploie des isolants industriels très divers, soit liquides, formés par des mélanges à base d'huile et de résine, de goudron ou de caoutchouc ; soit solides, résultant de la combinaison de déchets de mica ou d'amiante avec différentes résines, tels que la *micanite*, l'*ætna* et l'*ambroïne*.

CONDUCTEURS NUS. — En établissant les canalisations dans des conduites en béton, dites *caniveaux*, ou dans des tuyaux en fonte, on peut construire des lignes à conducteurs nus placés sur des isolateurs en porcelaine, comme dans le cas des lignes aériennes.

Le type de ces installations est celui de la canalisation à basse tension de la Société continentale Edison de Paris (fig. 493).

Les caniveaux rectangulaires en béton de ciment sont

recouverts de dalles de même matière rejointoyées au ciment. Les supports des isolateurs *a* sont vissés dans une plaque de fonte *f* noyée dans le béton, au fond du radier. Sur la cloche en porcelaine *p* vient se visser une pièce de fonte galvanisée, à fourche *h*, dans laquelle s'engagent les conducteurs. Ceux-ci sont d'ailleurs maintenus en place par des étriers en fer *e* qui prennent leur point d'appui sur des saillies *s* que porte le chapeau en fonte de l'isolateur.

Ces caniveaux qui sont placés sous trottoirs aboutissent, aux branchements principaux et aux traversées des rues transversales, à des trous d'homme en fonte, où s'opèrent les jonctions des tronçons de conduites, soit par soudure, soit par manchon à vis de serrage. La traversée des chaussées se fait généralement par des tuyaux en fonte dans lesquels passent les conducteurs soutenus par des isolateurs montés sur de petits chariots roulant sur des galets.

Les caniveaux doivent être aussi étanches que possible ; afin d'éviter l'introduction des eaux superficielles, on les réunit de distance en distance avec les égouts. L'eau venant au contact des conducteurs nus produit des courts-circuits, et donne lieu à la production d'un mélange de gaz détonants, par électrolyse : les conducteurs sont en même temps oxydés.

La présence de ces caniveaux dans le sous-sol des voies d'une ville a aussi l'inconvénient de constituer une sorte de drains où les infiltrations gazeuses et notamment celles provenant de fuites de gaz, peuvent occasionner une accumulation de gaz détonants susceptibles d'occasionner de

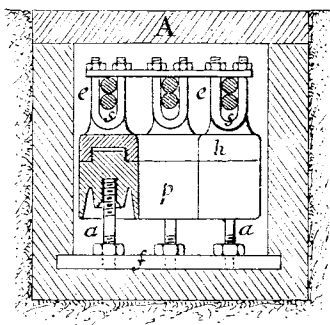


FIG. 493. — Canalisation à conducteurs nus.

graves explosions. Pour éviter ces inconvénients, certains ingénieurs électriciens ont proposé d'aérer les caniveaux à l'aide de ventilateurs mobiles actionnés soit à bras, soit par une petite dynamo.

CONDUCTEURS ISOLÉS DANS DES CANALISATIONS MÉTALLIQUES. — On peut remplacer les caniveaux par des tuyaux en fonte ou en fer de faible diamètre, dans lesquels on tirera les câbles recouverts d'enveloppes isolantes. Ceux-ci sont ainsi protégés contre les causes de détérioration extérieure, et l'on supprime ainsi tout support isolant.

Les tuyaux aboutissent, comme les caniveaux précédents, à des trous d'homme par lesquels se fait le tirage des câbles et les raccordements des tronçons de canalisation.

Outre les diverses couches isolantes de caoutchouc, de coton ou de chanvre imprégnés de paraffine, et de ruban caoutchouté, le câble est recouvert généralement d'une enveloppe de plomb étanche, pour soustraire le conducteur à l'humidité.

Pour effectuer le tirage, de l'un des trous d'homme on pousse un ruban d'acier dans le tuyau jusqu'au trou voisin, là on attache la corde de tirage à l'extrémité sortant du ruban, et à l'autre bout de celle-ci, le câble que l'on veut tirer. Il convient, pour éviter toute éraillure et détérioration du câble à l'intérieur du tuyau, que celui-ci ait un diamètre cinq à six fois plus grand que celui du câble.

Ces tuyaux doivent être à joints étanches, mais il n'en est pas toujours ainsi, et ils peuvent donner lieu aux mêmes dangers que les caniveaux, au point de vue de l'accumulation des gaz détonants dans le vide intérieur de cette canalisation.

CONDUCTEURS ISOLÉS ET ARMÉS. — On évite tous les inconvénients des systèmes précédents avec les câbles armés. Ceux-ci sont formés généralement de cordes en cuivre recouvertes d'enveloppes de papier ou de jute, le tout exactement ajusté à l'intérieur d'un tube de plomb étanche (fig. 494). Celui-ci est recouvert d'un matelas de

chanvre enduit de paraffine ou de résine, et l'ensemble est protégé par une armature formée de deux rubans d'acier; enfin cette cuirasse est préservée de la rouille par une enveloppe de jute goudronnée. Les feeders sont pourvus de fils pilotes isolés dans la masse du câble.

De pareils conducteurs sont posés directement en tranchée, dans une couche de sable de 30 à 40 centimètres d'épaisseur, afin de

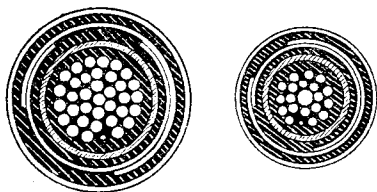


Fig. 494. — Câbles armés.

faciliter l'écoulement de l'eau; la tranchée est ensuite remblayée, mais on a soin de placer audessus des câbles, à mi-profondeur, une toile métallique ou des briques, afin de signaler leur présence en cas d'ouverture de tranchées transversales et prévenir la détérioration des câbles par les outils des terrassiers.

JONCTIONNEMENT DES CONDUCTEURS. — Pour relier bout à bout deux conducteurs recouverts d'enveloppes isolantes, on commence par découper l'armature et la couverture de plomb sur une longueur de 6 centimètres et la couche isolante sur 2 à 3 centimètres, à chacune des extrémités à réunir.

Les âmes des conducteurs câblés sont reliées de diverses façons. On peut séparer les fils et tordre ensemble à l'aide d'une pince les deux faisceaux enchevêtrés les uns dans les autres; le tout est ensuite empâté dans la soudure (fig. 495, 1).

Dans le cas de câbles plus gros, les fils sont d'abord soudés en un seul bloc aux extrémités de chaque câble, puis chacun des faisceaux est taillé en biseau (fig. 495, 2); les bouts raccordés suivant ces plans inclinés sont ligaturés et soudés.

Quel que soit le procédé de raccordement employé, les enveloppes isolantes doivent être rétablies sur la longueur

du joint, comme sur le reste du câble (fig. 495, 3) ; les différentes couvertures *bc, ad, lm*, de caoutchouc pur et vulcanisé et de ruban caoutchouté, sont imprégnées de benzine, de manière à souder les diverses couches. Enfin

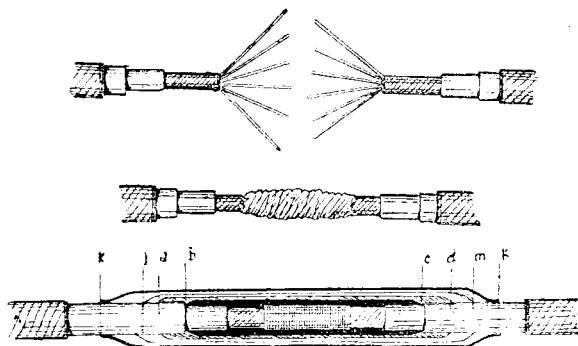


FIG. 495. — Junctions des extrémités de câbles

l'on entoure le tout d'une feuille de plomb *KK*, que l'on vient mater à l'aide d'un marteau sur le tuyau de plomb et dont on recouvre les joints de raccordement, soit d'un nœud de soudure, soit simplement de ligatures de ruban

goudronné, de manière à assurer l'étanchéité complète de ces joints.

Quand il s'agit de câbles armés, posés directement en tranchée, on ne peut reconstituer l'armature enlevée et l'on doit enfermer les parties dénudées des câbles junctionnés, dans des boîtes de raccor-

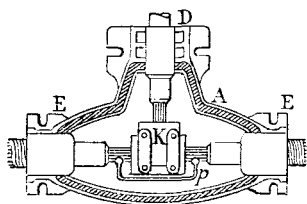


FIG. 496. — Boîte de jonction pour dérivation.

dement. Celles-ci (fig. 496) se composent d'une sorte de coquille en fonte à deux valves, qui s'emboîtent exactement par un joint à rainure et languette, garni d'un cordon en caoutchouc *A*.

Deux douilles, ou trois dans le cas de raccordement d'un câble dérivé, donnent accès aux extrémités des conducteurs, à l'intérieur de la boîte. Ces douilles telles que D, sont cloisonnées pour assurer davantage l'étanchéité du joint au passage du câble garni d'étoupes goudronnées ; elles sont en outre pourvues d'oreilles échancrées E où s'introduisent les boulons de serrage.

Les conducteurs dénudés sont réunis par des manchons à vis K ; les extrémités des fils pilotes sont réunies séparément par une tige de cuivre *p*. Lorsque le joint est terminé et la boîte hermétiquement close, on remplit le vide intérieur d'un isolant liquide bitumineux que l'on verse par un orifice pratiqué dans la valve supérieure et qui est ensuite fermé par un bouchon à vis.

Au lieu de conducteurs simples, on emploie souvent des câbles concentriques, l'un des pôles étant fait d'une corde, formant l'âme du câble et l'autre constitué par un faisceau de fils disposés suivant un cylindre concentrique, séparé du premier par une couche isolante.

Ces câbles ont l'avantage de supprimer complètement l'influence des circuits alternatifs qui les parcourent en sens inverse, sur les courants téléphoniques voisins ; en outre, le câble intérieur étant inaccessible, on n'a pas à craindre le danger résultant du contact simultané des deux pôles. L'inconvénient, au contraire, réside dans la grande capacité de ces câbles qui, jointe à la self-induction, peut déterminer dans certains cas, par la combinaison des ondes dues à ces causes de réaction, des surélévations de tension successives, susceptibles d'endommager gravement les isolants.

La figure 497 montre le mode de raccordement de câbles concentriques à deux conducteurs. Les extrémités ayant été dénudées comme il convient, les cordes centrales sont reliées par un manchon à vis de serrage *e*. On enfle ensuite des brides *a* sur les extrémités du câble cylindrique extérieur et l'on relève les bouts des fils à angle droit ; puis on place une seconde bride *b*, et l'on effectue le serrage des fils, entre les couples de brides, au moyen

des boulons *f*, de manière à former un ensemble rigide et bien isolé.

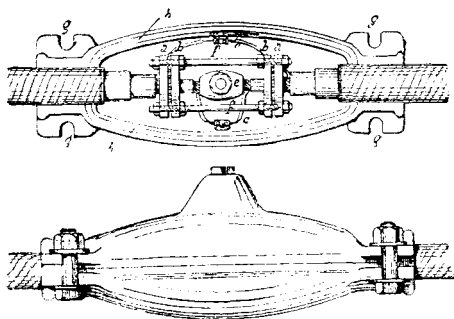


FIG. 497. — Boîte de jonction pour câbles concentriques (coupe et élévation extérieure).

La boîte de jonction de la figure 498 se rapporte à un câble à trois conducteurs pour la distribution à trois fils.

Les âmes sont raccordées, comme précédemment, par un manchon à vis ; puis on fait la jonction des câbles creux

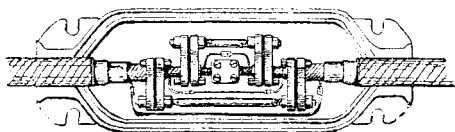


FIG. 498. — Boîte de jonction pour câbles à trois conducteurs.

concentriques deux à deux, au moyen de brides et de boulons, suivant le procédé exposé ci-dessus.

261. Conducteurs et installations à l'intérieur des habitations. — A l'intérieur des habitations on emploie généralement des câbles et fils isolés, dont les enveloppes sont formées soit simplement de fibres textiles, soit de caoutchouc.

Les fils recouverts de coton sont employés dans les locaux parfaitement secs ; on les utilise d'ailleurs principalement pour la construction des dynamos et des électro-

aimants. Une seule couche de coton est toujours insuffisante ; on met de deux à quatre couches, suivant l'isolement que l'on veut obtenir ; le diamètre augmente alors de 0,4 à 0,6 millimètre.

Les fils recouverts de soie sont utilisés pour les petits appareils, tels que sonneries et télégraphes ; leurs diamètres varient de 0,40 à 0,15 millimètre.

Dans les installations de sonneries électriques, on utilise des fils recouverts de gutta et de coton ; les fils les plus employés sont ceux de 0,9 millimètre de diamètre.

Pour la distribution de lumière, on se sert de fils recouverts d'enveloppes plus isolantes et contenant généralement du caoutchouc. On distingue, dans le commerce, quatre genres d'enveloppes isolantes :

1^o *L'isolement léger* comprenant plusieurs couches alternées d'un enduit isolant, de guipage et de tresses de coton ;

2^o *L'isolement moyen* comprenant, en outre, une couche de caoutchouc ;

3^o *L'isolement fort*, composé d'une couche de caoutchouc et d'un ruban caoutchouté ;

4^o *L'isolement très fort*, avec deux couches de caoutchouc et deux rubans caoutchoutés.

Dans les endroits exposés à l'humidité, dans les caves notamment, on emploie des *fils sous plomb*, c'est-à-dire protégés par un tuyau de ce métal. Souvent les câbles contiennent sous la même enveloppe de plomb, les deux conducteurs isolés d'aller et de retour.

Pour raccorder les appareils mobiles aux canalisations fixes, on se sert de *conducteurs souples* constitués par l'assemblage de fils de cuivre très fins, enfermés dans une gaine de soie ou de coton.

On peut fixer les câbles et les fils, dans l'intérieur des habitations, à l'aide de petits isolateurs, mais on les place généralement, pour les protéger des détériorations de contacts extérieurs, dans des moulures en bois, ou à l'intérieur de tubes en papier comprimé et imprégné de

substances antihygro-métriques, tels que les canalisations du système Bergmann.

Dans tous les cas, les conducteurs doivent avoir une section suffisante pour pouvoir supporter un courant accidentel d'une intensité double de l'intensité normale, sans que la température s'élève au point de compromettre la conservation ou la sécurité de l'installation.

On calculera, à cet effet, les conducteurs, pour les densités de courant suivantes :

3 ampères par millimètre carré pour les conducteurs de 1 à 2 mm. 5 de diamètre.

2 ampères par millimètre carré pour les conducteurs de 2 mm. 5 à 8 millimètres de diamètre.

1 ampère par millimètre carré pour les conducteurs de plus de 8 millimètres de diamètre.

Il convient, dans les installations pour lumière, de ne pas employer de câbles à deux conducteurs, placés sous une même enveloppe. On aura soin également de pourvoir les conducteurs d'un supplément d'isolement et de protection mécanique, aux croisements avec les tuyaux de gaz, d'eau ou de toute pièce métallique.

Les interrupteurs et coupe-circuit fusibles devront être montés sur des pièces incombustibles. Les plombs fusibles devront fondre avec un courant d'une intensité double et au maximum triple de celle du courant normal (tome I, § 29). Chaque installation devra être pourvue à l'origine d'un interrupteur et d'un coupe-circuit bipolaires ; chaque dérivation sera également protégée par un coupe-circuit, sur chaque pôle.

Les installations électriques doivent être faites avec le plus grand soin, surtout en vue d'assurer un bon isolement des appareils et des conducteurs. Cet isolement, soit entre les deux pôles des conducteurs, soit entre chaque conducteur et la terre, doit être au minimum de 40.000 ohms. Il convient d'adopter une valeur d'autant plus élevée que le nombre des lampes et, par suite, le réseau de distribution

est moins grand, soit par exemple, 200.000 ohms pour 20 lampes et un à plusieurs megohms ou millions d'ohms, au-dessous de cinq lampes.

Appareils de mesure.

262. **Ampèremètres et voltmètres industriels.** — Les mesures des quantités électriques se font, dans l'industrie, à l'aide d'*ampèremètres* intercalés dans le circuit du courant et de *voltmètres* placés en dérivation entre les points dont on veut prendre la différence de potentiel.

Tous ces appareils sont fondés sur le même principe, savoir l'action du flux galvanique développé dans un solénoïde par le courant à mesurer, soit sur une aiguille aimantée dirigée par le champ terrestre, soit sur un barreau de fer doux orienté par un aimant permanent, soit sur des pièces de fer doux se déplaçant sous l'influence du flux galvanique à l'encontre de l'action d'un ressort ou d'un contre-poids antagoniste.

L'action du flux galvanique étant proportionnelle à l'intensité du courant, la déviation de l'organe mobile, qui porte une aiguille se déplaçant sur un cadran, varie dans le même sens que l'intensité; à toute valeur de celle-ci correspond une position déterminée de l'aiguille sur le cadran, qui est gradué en ampères ou dixièmes d'ampère.

Dans l'ampèremètre *Déprez et Carpentier*, par exemple, un barreau de fer doux, monté sur un axe qui lui est perpendiculaire, est disposé à l'intérieur d'une bobine de gros fil (fig. 499). Celle-ci est placée elle-même entre les pôles de deux aimants permanents demi-circulaires. Quand

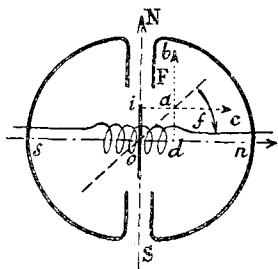


FIG. 499. — Ampèremètre Déprez-Carpentier.

aucun courant ne traverse la bobine, le barreau de fer doux polarisé par les aimants, se dirige suivant la ligne de leurs pôles. Si maintenant un courant est lancé dans la bobine, le champ galvanique fait dévier l'aiguille qui est alors soumise aux couples antagonistes des deux champs. La déviation croîtra jusqu'à ce que les deux couples deviennent égaux.

Il faudra donc avoir pour l'équilibre : force $F \times od$ = force $f \times ad$, od et ad étant les bras de levier respectifs des forces F et f dues au champ directeur NS et au champ galvanique ns .

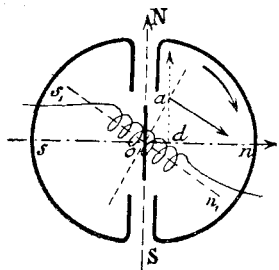


FIG. 500. — Disposition oblique de la bobine.

On voit, d'ailleurs, qu'à mesure que l'angle de déviation augmente, le bras od de la force directrice F croît et son couple augmente, tandis que le bras ad de la force déviatrice décroît et son couple diminue. Il en résulte que pour un même accroissement de f , l'accroissement de déviation sera d'au-

tant plus petit que la déviation totale sera elle-même plus grande; autrement dit, la sensibilité du galvanomètre diminuerait avec l'intensité du courant à mesurer.

Pour éviter cet inconvénient, la bobine est placée obliquement par rapport à sn , de sorte que les bras de levier des couples directeur (fig. 500) et déviant croissent parallèlement.

Tout le système est placé dans une boîte cylindrique, avec cadran et fermeture à glace; l'appareil est portable et, d'ailleurs, peu encombrant.

Ce galvanomètre, comme tous ceux qui sont basés sur l'emploi d'un aimant permanent produisant le couple directeur d'équilibre, doit être vérifié de temps en temps, au point de vue de l'intensité d'aimantation de l'organe directeur, qui peut s'affaiblir progressivement.

Nous citerons encore les ampèremètres et voltmètres

Desruelles et Chauvin (fig. 501). Ce système comprend : une bobine à l'intérieur de laquelle est disposé un circuit magnétique déformable, composé d'une petite plaque de fer doux P montée sur l'axe qui porte l'aiguille indicatrice et d'une bande de fer présentant une partie plane D disposée en regard de la première plaque, et se prolongeant par une partie en spirale de plus en plus rétrécie.

Sous l'influence du courant, la plaque P et le circuit C s'aimantent et prennent la même polarité. La partie plane D du circuit fixe repousse alors la plaque P avec une force d'autant plus grande que le champ galvanique inducteur est lui-même plus intense.

Un ressort antagoniste qui tend à ramener constamment la plaque P au contact de D fait équilibre au couple magnétique. Dans une position telle que Oa, la plaque mobile est repoussée dans le sens de la flèche par la partie de gauche du circuit magnétique fixe et repoussée en sens inverse par la partie de droite, le mouvement de la palette se produit donc en vertu de la différence des actions des parties avant et arrière, ce qui justifie la forme amincie vers l'extrémité de droite du circuit magnétique en spirale.

Enfin, dans les appareils *Richard*, ampèremètres et voltmètres, le champ galvanique du courant agit sur une palette de fer doux, qui, à l'état de repos, est placée obliquement par rapport à la ligne des pôles d'un électro-aimant à deux branches (fig. 502). Cette palette jouant le rôle d'une armature mobile dans un plan perpendiculaire aux lignes de force galvaniques, tend à se placer suivant la ligne des pôles, afin de fermer le circuit magnétique par le chemin le plus court.

Les déviations peuvent être enregistrées par une aiguille fixée sur la palette et terminée par un style qui vient tracer les courbes d'intensité sur un cylindre mù par un appareil d'horlogerie.

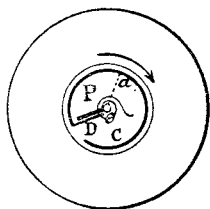


FIG. 501.— Ampèremètre Desruelles et Chauvin.

Tels sont les principes sur lesquels sont établis les ampèremètres et voltmètres industriels. Ces deux genres d'appareils ne diffèrent entre eux que par la construction des bobines : à gros fil de faible résistance, dans l'ampèremètre ; à fil fin et par suite de grande résistance, dans le voltmètre.

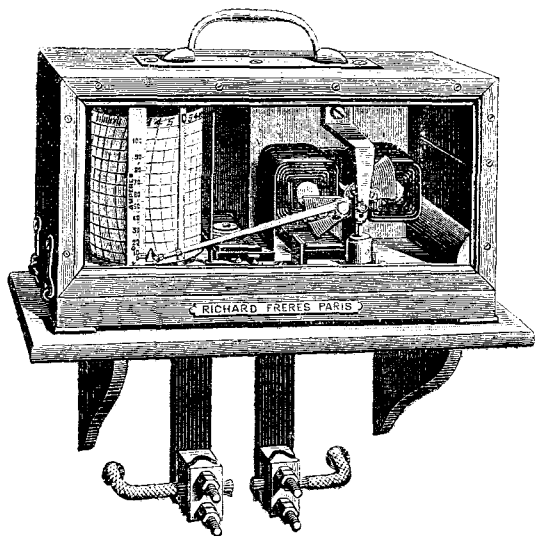


FIG. 502. — Ampèremètre enregistreur Richard.

L'ampèremètre est intercalé en série dans le courant dont on veut déterminer l'intensité, et il est, par conséquent, traversé par le courant tout entier, à moins qu'il ne soit shunté par un circuit plus ou moins résistant qui détourne une partie du courant entre ses bornes.

Le voltmètre se place, au contraire, en dérivation, entre les deux points dont on veut évaluer la différence de potentiel. Les bobines de ces instruments présentant une résistance très élevée, de 2000 ohms environ, dans les cas les plus usuels, le courant dérivé à travers ces appareils est

toujours très petit et ne peut influer que d'une manière insensible sur le régime du courant à mesurer.

Les indications sont nécessairement proportionnelles aux intensités du courant qui passe dans les bobines, mais comme ce courant dépend exclusivement de la différence de potentiel aux bornes de la résistance constante des bobines, réciproquement, la différence de potentiel est proportionnelle au courant qui traverse les bobines et aux indications de l'aiguille du voltmètre.

WATTMÈTRES. — La puissance d'un courant étant exprimée par $e \times i$, c'est-à-dire par le produit de la force électromotrice par l'intensité, on pourra déterminer expérimentalement sa valeur, en mesurant séparément, au moyen d'un voltmètre et d'un ampèremètre, chacun des facteurs de ce produit. Mais on peut mesurer la puissance directement, au moyen d'appareils appelés *wattmètres*.

Ceux-ci sont construits sur le principe des électrodynamomètres dont nous parlerons à propos de la mesure des courants alternatifs. On ne fait plus agir, en effet, dans ces appareils, les courants sur des aimants ou autres pièces magnétiques, mais les courants sur eux-mêmes.

L'organe indicateur est constitué ici par une bobine mobile, à grande résistance, dont les déviations dépendent à la fois de l'intensité du courant qui traverse la bobine fixe ordinaire et de l'intensité de son propre courant. La déviation est donc proportionnelle à l'intensité des deux courants et, par suite, au produit $e \times i$, comme nous l'expliquons plus loin.

263. Appareils de mesure des courants alternatifs. — Comme nous l'avons vu précédemment (t. I, § 163), les galvanomètres pourvus d'aimants permanents ne peuvent pas convenir à la mesure des courants alternatifs. On a donc recours le plus généralement aux *galvanomètres thermiques* ou à *dilatation*, aux *électromètres* et *électrodynamomètres*.

Galvanomètres thermiques. — Ces galvanomètres, ampèremètres ou voltmètres, sont basés sur l'action calorifique des courants traversant des conducteurs métalliques, dont

la dilatation peut servir de mesure à l'intensité de ces courants.

Nous prendrons comme type de ce système, l'appareil *Hartmann et Braun* (fig. 503) : celui-ci consiste essentiellement en un fil mince en alliage platine-argent p , tendu horizontalement par une vis de rappel r ; à ce fil est soudé

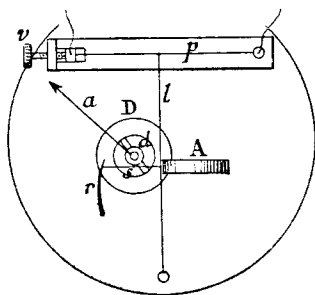


FIG. 503. — Galvanomètre Hartmann et Braun.

un fil de laiton l , au milieu duquel est attaché un brin de soie s , qui vient se fixer d'autre part à l'extrémité d'un ressort r , après avoir fait un tour sur la poulie d ; cette poulie est calée sur le même axe qu'une aiguille a qui se déplace devant un cadran gradué empiriquement.

Le fil platine-argent n'est pas traversé par le courant total à mesurer.

car il est placé en dérivation sur une bobine que contient l'appareil et il ne reçoit qu'une fraction, qui reste d'ailleurs dans un rapport constant avec le courant total.

Quand un courant traverse le fil p , celui-ci s'échauffe et se dilate d'autant plus que le courant est plus intense ; le fil l s'infléchit alors sous l'action du ressort r , et le fil de soie entraîne la poulie, qui détermine une déviation de l'aiguille.

Pour rendre l'instrument *apériodique*, c'est-à-dire pour amortir les oscillations, l'axe porte encore un disque en aluminium D , qui se déplace entre les pôles d'un aimant en fer à cheval A ; les courants de Foucault ainsi développés dans le disque réagissent sur l'aimant, et déterminent ainsi une sorte d'action de frein qui produit l'arrêt brusque de l'aiguille, sans oscillations, au point voulu.

Ces appareils ne contiennent, à part le frein précité, aucun organe servant à la mesure, qui soit en substance magnétique, ils ont donc l'avantage de n'être nullement

influencés par des champs magnétiques ou électromagnétiques extérieurs. Ils conviennent spécialement pour les courants alternatifs, car ils donnent évidemment des indications qui ne dépendent que de la valeur efficace de ces courants, laquelle développe la même quantité de chaleur que le courant continu équivalent. Le galvanomètre thermique de *Cardew* est basé sur le même principe.

ÉLECTRO-DYNAMOMÈTRES. — Ces instruments, comme leur nom l'indique, sont basés sur l'action électro-dynamique des courants. On peut considérer un électro-dynamomètre comme un galvanomètre ordinaire, dans lequel on aurait substitué, à l'aiguille aimantée soumise à l'action du courant à mesurer, un solénoïde excité lui-même par un courant électrique et suspendu de manière à pouvoir tourner librement autour de son axe de suspension.

On remplace donc ainsi l'action d'un courant sur un pôle par celle d'un courant sur un autre courant. L'un des solénoïdes est fixe et joue le rôle d'un aimant développant un champ magnétique dans lequel évolue le solénoïde mobile. Or la force qui s'exerce sur un conducteur d'un centimètre de long, parcouru par un courant J , dans un champ magnétique d'intensité H a pour expression :

$$F = J \times H$$

ainsi qu'il a été expliqué (t. I, § 94). Nous avons vu également que le travail d'un circuit fermé ou solénoïde, qui tourne autour de son axe dans le champ magnétique est :

$$T = J \times n \times S \times H = K_1 \times J \times H$$

en désignant, pour simplifier, le produit $n \times S$ par K_1 .

La force qui produit ce mouvement est donc proportionnelle à J , comme dans le cas de l'élément de circuit considéré plus haut, car le travail n'est pas autre chose que la force multipliée par le chemin parcouru. D'autre part, le champ H est lui-même proportionnel à l'intensité I du courant de la bobine fixe et peut être représenté par :

$$H = K_2 \times I$$

On aura donc :

$$T = K_1 \times K_2 \times I \times J = K \times I \times J$$

Donc le travail et par suite l'effort s'exerçant sur le solénoïde mobile dans le champ du solénoïde fixe sont proportionnels aux courants qui traversent les deux solénoïdes.

Si au lieu de faire passer deux courants différents dans les solénoïdes, on les fait traverser par le même courant, l'expression précédente deviendra :

$$T = K \times I \times I = K \times I^2$$

La force produisant la déviation aura la même expression, avec une valeur de K qui dépend des dimensions et de l'orientation relative des deux bobines. L'effort ou le couple électro-dynamique agissant sur la bobine mobile est équilibré par la force de torsion du fil de suspension ou d'un ressort antagoniste.

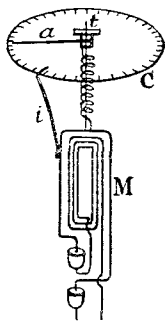


FIG. 504. — Électro-dynamomètre Siemens.

Comme le courant change de sens à la fois dans les deux bobines, l'action est toujours dirigée dans le même sens et l'appareil peut servir aussi bien à la mesure des courants alternatifs qu'à celle des courants continus. Dans le cas des courants alternatifs, I^2 représente le carré de l'intensité efficace.

L'électro-dynamomètre le plus simple est celui de *Siemens* ; il comporte une bobine fixe, et une bobine mobile qui est réduite à une seule spire et qui entoure extérieurement la première bobine (fig. 504).

La bobine mobile est suspendue par un fil de soie, et orientée par un ressort à boudin fixé par son extrémité supérieure à une douille, ou tête de torsion, qui tourne sur un axe creux et porte une aiguille a se déplaçant sur un cercle gradué C . Une deuxième aiguille i , fixée sur la bobine

mobile M, se déplace sur le bord de l'échelle quand la bobine mobile est déviée de sa position de repos. Le fil de suspension de cette bobine passe à travers l'axe de la tête de torsion, pour venir s'enrouler sur une cheville placée en haut de l'instrument.

Les extrémités du circuit mobile plongent dans deux coupelles de mercure superposées dans l'axe de rotation et qui servent à amener le courant dans les circuits, tout en permettant la libre déviation de la spire mobile.

Au repos, le plan de la bobine mobile est perpendiculaire à celui de la bobine fixe. Lorsque le courant passe, la première bobine tourne et tend à se placer parallèlement à la première, mais on la ramène dans la position initiale, en tournant la tête de torsion, jusqu'à ce que l'index *i* revienne se placer devant le trait de repère du cadran gradué.

L'angle dont l'aiguille de torsion a tourné est proportionnel à l'effort électro-dynamique et mesure l'intensité du courant *I*.

L'appareil peut également servir à la mesure de l'énergie et être employé par conséquent comme wattmètre. Le circuit est alors constitué par une bobine de fil fin d'un grand nombre de spires.

Le courant total passe dans la bobine fixe à gros fil, tandis que la bobine mobile est placée en dérivation sur le circuit. Cette dernière est donc traversée par un courant proportionnel à la tension du circuit et la force de déviation est dès lors proportionnelle à l'intensité totale du courant qui traverse la bobine fixe et à la tension; elle est ainsi proportionnelle au produit $e \times I$, c'est-à-dire au travail électrique dépensé dans le circuit, et sert à mesurer cette énergie.

ELECTROMÈTRES. — Les appareils électrostatiques peuvent également être utilisés pour la mesure des forces motrices. Considérons en effet (fig. 505) un disque A électrisé, suspendu par un ressort spirale S, au-dessus d'un disque B mis en communication avec le sol; dans ce cas, les lignes de force sont normales aux surfaces parallèles, sauf

celles correspondant aux bords du disque A, qui s'incurveraient, comme l'indique le dessin, si l'on ne prenait la précaution de sertir le disque A dans un anneau C, dit *anneau de garde*, dont il n'est séparé que par une mince rainure, juste suffisante pour assurer le libre mouvement du disque précité.

L'action qui s'exerce entre les plateaux A et B est évidemment semblable à celle qui se développerait entre deux pôles d'aimant qui renfermeraient des masses magnétiques formant une charge de même densité que la charge des masses électriques considérées. Or, cette action est exprimée par la formule (t. I, § 57) :

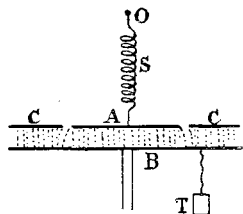


FIG. 505. — Principe de l'électromètre.

$$P = 2 \pi d^2 \times S$$

Dans laquelle d est la densité superficielle de la charge, S la surface du pôle agissant ou du plateau A.

Le système des deux plateaux constitue un condensateur qui donne lieu à la relation :

$$Q = C \times V$$

D'autre part, la capacité d'un condensateur plan de surface S est (t. I, § 169) :

$$C = \frac{S}{4 \pi D}$$

D désignant ici la distance verticale entre les deux plateaux. On a également par définition de la densité :

$$d = \frac{Q}{S}, \quad d^2 = \frac{Q^2}{S^2}$$

En portant ces diverses valeurs dans l'expression de P , il vient :

$$P = \frac{S}{8 \pi D^2} \times V^2$$

Nous voyons donc que l'effort qui s'exerce entre les deux plateaux est proportionnel à la différence de potentiel V de

ces plateaux, différence de potentiel efficace quand il s'agit de courants alternatifs, puisqu'elle figure par le carré V^2 de V qui, étant une quantité équivalente à la force électro-motrice continue de même valeur, ne peut être que la moyenne des carrés de la force électro-motrice alternative.

L'effort P étant mesuré par la traction du ressort ou par le poids faisant équilibre au plateau A , supposé suspendu au fléau d'une balance, on voit que cet électromètre permettra d'évaluer le potentiel d'un corps électrique ou la différence de potentiel de deux corps électrisés.

La formule peut évidemment s'écrire :

$$V^2 = D^2 \times \frac{8 \pi P}{S}$$

et :

$$V = D \times \sqrt{\frac{8 \pi P}{S}}$$

On exprimera la force ou le poids P en dynes, S en centimètres carrés, D en centimètres, et le résultat donnera la tension en unités électrostatiques ; il suffira de multiplier le chiffre obtenu par 300 pour avoir la différence de potentiel en volts.

ELECTROMÈTRE A QUADRANTS. — Il est basé sur un principe analogue ; il comprend une aiguille légère en aluminium, ayant la forme d'un huit, suspendue par un fil métallique très fin dont la force de torsion doit faire équilibre au couple électro-dynamique, et qui sert en même temps à relier l'aiguille au conducteur dont on veut mesurer le potentiel (fig. 506).

L'aiguille est suspendue à l'intérieur d'un cylindre creux très aplati, découpé par deux sections rectangulaires en quatre quadrants égaux ; les quadrants diamétralement opposés sont reliés électriquement par des fils souples.

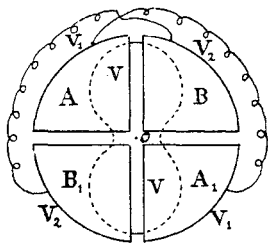


FIG. 506. — Electromètre à quadrants.

L'aiguille qui est à proprement parler une double palette, constitue un condensateur avec chacune des paires de quadrants.

Si l'on porte, par une source d'électricité, le couple de quadrants AA_1 , au potentiel V_1 , le couple BB_1 au potentiel V_2 , l'aiguille étant au potentiel V du corps soumis à l'essai, l'effort exercé par le premier condensateur sera proportionnel au carré de la différence de potentiel $(V_1 - V)$ et pourra se représenter par :

$$P_1 = K \times (V_1 - V)^2$$

de même l'effort résultant de l'action du second condensateur sera :

$$P_2 = K \times (V_2 - V)^2$$

la constante K dépendant, comme toujours, des dimensions et distances relatives des armatures des condensateurs.

Chaque palette est déplacée en vertu de l'action différentielle des deux couples de quadrants, action différentielle qui peut d'ailleurs être égale à la somme numérique des deux efforts, si les charges des quadrants sont de signe contraire et produisent l'une une attraction, l'autre une répulsion dont les effets s'ajoutent sur la palette. On aura donc d'une manière générale :

$$P = P_1 - P_2 = K \times [(V_1 - V)^2 - (V_2 - V)^2]$$

Au lieu de charger les quadrants par une source autre que celle dont on veut mesurer le potentiel, ou la différence de potentiel $(V_1 - V_2)$, on met les deux points de potentiels V_1, V_2 respectivement en communication avec les paires de quadrants, et l'aiguille avec l'un de ces couples, celui au potentiel V_1 par exemple. On a alors $V = V_1$ et la formule devient :

$$P = -K \times (V_2 - V_1)^2 = K \times (V_1 - V_2)^2$$

c'est-à-dire que l'effort, mesuré par la torsion du fil de suspension et par la déviation de l'aiguille, est proportionnel au carré de la différence de potentiel ou de la force électromotrice efficace, quand il s'agit de courants alternatifs.

Les voltmètres industriels électrostatiques présentent des dispositions beaucoup plus simples, dans lesquelles on

a supprimé les suspensions par fils de torsion, toujours très fragiles et d'un maniement délicat.

L'électromètre industriel de *William Thomson* (fig. 507) comporte une aiguille montée sur couteau et dont l'armature extérieure ne se compose plus que de deux quadrants. L'aiguille est munie d'un index qui se déplace sur une échelle divisée. Au repos, cette aiguille est maintenue dans la position d'équilibre initial par un contrepoids p qui constitue la force antagoniste opposée au couple électro-dynamique.

Comme pour cette application les deux armatures présentent une différence de potentiel qui peut dépasser plusieurs milliers de volts, il convient, pour éviter des étincelles qui pourraient jaillir et former un arc continu entre ces armatures, de mettre celles-ci en communication avec la source par des corps relativement peu conducteurs ; il est indispensable également, pour prévenir tout danger, que l'appareil soit parfaitement isolé de la terre.

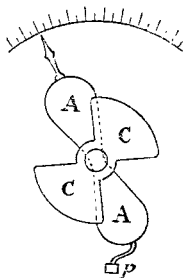


FIG. 507. — Electromètre de William Thomson.

264. Compteurs électriques. — Les ampèremètres et wattmètres ordinaires indiquent l'intensité ou l'énergie électrique instantanées, au moment de l'observation : ils ne peuvent donc faire connaître les quantités d'électricité ou d'énergie dépensées dans un temps donné. Cette fonction est parfaitement remplie cependant par les ampèremètres et wattmètres enregistreurs, tels que ceux de Richard, mais l'enregistrement se fait sous forme de courbes dont il faut calculer chaque fois la surface, par les méthodes d'intégration qui ne sont pas à la portée de tout le monde.

L'électricité doit être enregistrée, au moyen de cadrans indicateurs, comme dans le cas de compteurs à gaz, afin que les dépenses indiquées puissent être lues et vérifiées, sans difficulté, par les consommateurs.

En réalité, c'est l'énergie électrique que l'on achète ; il ne devrait donc y avoir en principe que des compteurs d'énergie, mais comme généralement le courant est distribué à tension sensiblement constante, un compteur de quantité ou *coulombmètre* remplira le même but, en donnant des indications qui peuvent être considérées comme proportionnelles à l'énergie dépensée.

COMPTEUR EDISON. — L'un des premiers coulombmètres a été imaginé par Edison, il est basé sur les actions électro-chimiques. D'après les lois de Faraday, en effet, un courant traversant une dissolution d'un sel métallique dépose à l'électrode négative un équivalent du métal, pour chaque coulomb dépensé. Réciproquement, le poids du métal déposé au bout d'un temps donné, sert de mesure à la quantité d'électricité qui a traversé l'appareil.

Le compteur Edison est donc constitué par un véritable voltamètre, présentant trois électrodes en zinc plongées dans une dissolution de sulfate du même métal. Les deux plaques extrêmes sont reliées ensemble et forment les électrodes positives, la plaque du milieu constitue l'électrode négative.

Pendant le passage du courant, le poids de la plaque négative augmente de 337 milligrammes par coulomb dépensé et celui des plaques positives qui se dissolvent dans le liquide diminuent d'autant. On pèse chaque mois les plaques de l'un des voltamètres, et chaque année seulement le second appareil, qui sert ainsi à contrôler les pesées mensuelles.

En réalité, les voltamètres ne reçoivent qu'une fraction très minime du courant consommé, généralement un millième. A cet effet, ils sont connectés en dérivation sur les extrémités d'une bande de maillechort ondulée, intercalée dans le circuit principal.

Comme on le voit, cet appareil qui exige des pesées, se faisant hors de la présence des consommateurs, ne répond pas aux exigences d'un véritable compteur ; de plus, la fraction mesurée étant très faible, une petite inexactitude

dans les pesées se trouve multipliée par mille et se traduit toujours par des erreurs considérables.

COMPTEURS ARON. — Le compteur Aron se compose de deux pendules commandant chacun l'un des deux mouvements d'horlogerie enfermés dans le même appareil (fig. 508). Le pendule de gauche, se termine, comme à l'ordinaire, par un poids en laiton. celui de droite porte à son extrémité inférieure, soit un aimant, dans le cas du coulombmètre, soit une bobine de fil fin, s'il s'agit d'un wattheure ou joulemètre.

Dans ces deux cas, le dernier pendule oscille au-dessus d'une bobine à gros fils insérée dans le circuit de l'installation.

Les deux pendules sont réglés de telle sorte que leurs oscillations sont parfaitement isochrones lorsque la bobine inférieure n'est traversée par aucun courant. Mais dès que cette bobine est excitée, son action vient s'ajouter à celle de la pesanteur, pour diminuer la durée d'oscillation et augmenter par suite le nombre des battements du pendule pourvu de l'aimant ou de la bobine à fil fin.

Les mouvements d'horlogerie correspondant aux pen-

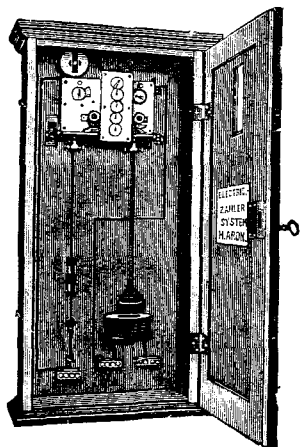


FIG. 508 — Compteur Aron d'énergie.

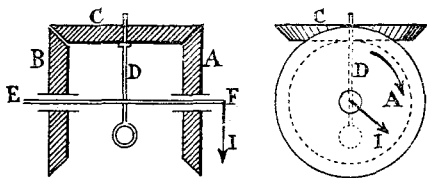


FIG. 509. — Système différentiel du compteur Aron.

dules, commandent respectivement les roues dentées A et B d'un système différentiel dont le principe est donné par la figure 508.

A travers les axes creux des roues précitées, passe l'axe E F, sur lequel est fixé, à angle droit, un axe D portant lui-même une roue C, montée folle sur ledit et engrenant à la fois avec les roues A et B, qui tournent d'ailleurs en sens inverse l'une de l'autre.

Si les deux pendules oscillent d'une manière isochrone, les roues A et B tournant avec la même vitesse feront tourner en même temps la roue C, mais sans entraîner son axe dont la position restera fixe dans l'espace. On se rend parfaitement compte de ces circonstances, en imaginant que, l'axe D étant fixé irrévocablement, on fait tourner la roue C à la main, par exemple; on imprimerait alors aux roues A et B des mouvements de vitesse égale et de sens contraire; la réciproque est donc vraie et l'axe E F reste immobile dans le cas considéré.

Si la roue A marche plus vite au contraire, par suite de l'accélération du pendule électro-magnétique, tout se passera comme si, la roue B étant immobile, la roue A était animée d'une vitesse simplement égale à la différence des deux roues. La roue C sera alors entraînée par la seule roue A supposée mobile et son axe se déplacera dans le sens de rotation de A indiqué par la flèche.

L'axe E F, solidaire de l'axe D, recevra par suite un mouvement de rotation proportionnel à la différence de vitesse des roues A et B, et cet accroissement de vitesse peut être considéré, dans certaines limites, comme pratiquement proportionnel à l'intensité du courant traversant la bobine fixe. Les tours de l'axe E F enregistrés par l'aiguille I sur le premier cadran en relation avec les autres cadrans totalisateurs du compteur permettront donc d'enregistrer la quantité d'électricité ou la somme d'énergie dépensée.

Dans ce dernier cas, la bobine mobile est connectée en dérivation aux bornes du circuit, le courant qui la traverse est donc proportionnel à la différence de potentiel

et l'action électro-magnétique des deux bobines est pratiquement proportionnelle à cette différence de potentiel et à l'intensité du courant de la bobine fixe, c'est-à-dire au produit de ces deux quantités ou à l'énergie absorbée par l'installation.

On emploie une disposition analogue pour les courants alternatifs, même dans le cas de l'appareil disposé pour la mesure des quantités d'électricité et fonctionnant en coulombmètre ; les deux bobines sont alors en série sur le circuit d'alimentation et sont traversées par le même courant.

L'emploi d'un aimant dans les coulombmètres a l'inconvénient inhérent aux variations possibles de l'intensité d'aimantation pouvant résulter de causes diverses, et notamment de l'action d'un courant intense produit accidentellement ; on peut également fausser par fraude les indications du compteur, à l'aide d'un aimant antagoniste placé dans le voisinage de l'appareil.

La figure 510 montre la disposition du compteur pour coulombmètre sur une distribution à trois fils. Les deux bobines fixes à gros fil sont insérées respectivement dans le circuit des conducteurs extrêmes. Le balancier porte deux aimants correspondant chacun à l'une des bobines.

Dans le cas du joulemètre (fig. 511), les bobines à gros fils sont disposées de la même manière et les deux balanciers sont pourvus de bobines à fil fin, en dérivation

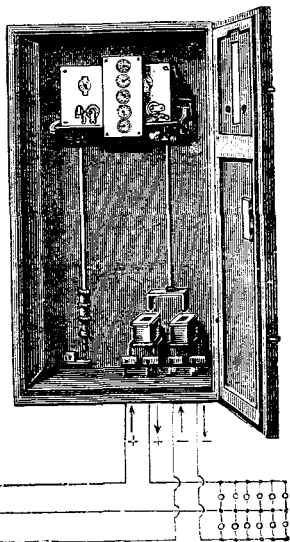


FIG. 510. — Compteur Aron de quantité sur distribution à trois fils.

sur chacun des deux ponts de la canalisation à trois conducteurs. Les enroulements de ces bobines sont combinés de manière à déterminer une attraction entre les deux solénoïdes de droite et une répulsion dans le couple de gauche ; il en résulte un accroissement de vitesse d'un côté et un ralentissement de l'autre. Ces deux effets s'ajoutent pour augmenter la différence de vitesse des deux pendules.

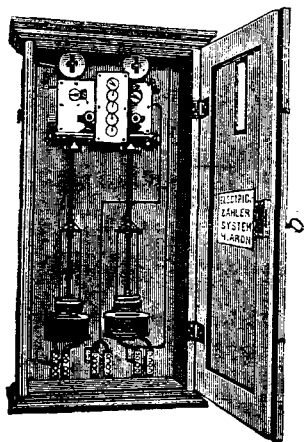


FIG. 511. — Compteur Aron d'énergie sur distribution à trois fils.

fil $j j'$ (fig. 512) insérées dans le circuit d'alimentation.

L'induit M est enroulé de bobines de fil fin et pourvu d'un collecteur, analogue à celui de Gramme, sur lequel frottent de petits balais en argent. Ceux-ci sont reliés en dérivation sur les bornes d'arrivée de circuit, par l'intermédiaire d'une résistance R sans self-induction, et d'une bobine en fil fin, représentée en J , qui constitue la bobine en dérivation de l'excitation compound de l'inducteur.

Dans ces conditions, le couple moteur est proportionnel au produit $I \times E$, et cet effort multiplié par la vitesse soit $I \times E \times v$, donne la mesure du travail. Mais il faut que le travail développé soit recueilli par un organe susceptible de l'absorber, sans quoi la vitesse de rotation serait illimitée pour un effort même relativement faible. Cet organe consiste en un disque en cuivre D , monté sur le prolongement de l'axe et tournant entre les pôles de trois aimants recourbés A . Il se développe dans ce disque

COMPTEUR THOMSON. — L'appareil de Thomson est un compteur-moteur. L'inducteur est constitué par deux bobines de gros

des courants de Foucault d'autant plus intenses que la vitesse est plus grande, et le travail absorbé dans ces circonstances est proportionnel au produit de la vitesse par l'intensité des courants d'induction, fonction elle-même de la vitesse, donc au carré de la vitesse; ce qui s'exprime par le terme $K \times v^2$, K étant un facteur constant invariable, quelle que soit la vitesse.

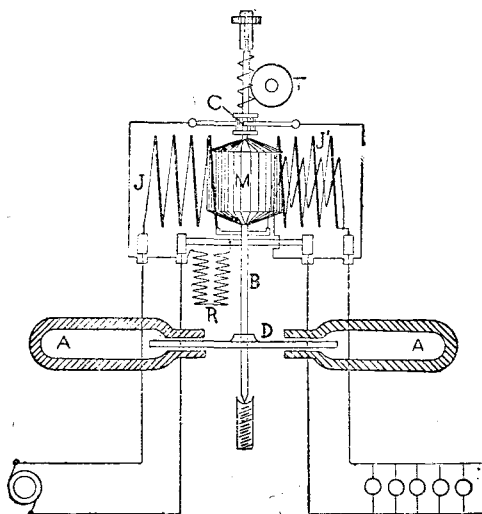


FIG. 512.— Schéma de la disposition du compteur Thomson.

D'après les lois de la mécanique, le moteur M augmentera de vitesse, jusqu'à ce que son travail devienne égal au travail résistant; la condition d'équilibre sera donc :

$$I \times E \times v = K \times v^2$$

d'où :

$$I \times E = K \times v$$

C'est-à-dire que la vitesse de rotation v sera toujours proportionnelle à la puissance dépensée et pourra servir de mesure à cette puissance, donc permettra d'enregistrer

sur des cadrans l'énergie électrique absorbée par l'installation.

La résistance non inductrice R , a pour but de réduire la tension et, par suite, les étincelles aux balais; l'enroulement compound à fil fin est calculé de manière à déve-

lopper un couple moteur égal au couple résistant des frottements.

Cette disposition a d'ailleurs l'inconvénient, quand on laisse le compteur sur le circuit, d'imprimer un très léger mouvement de rotation à l'induit et d'actionner ainsi la minuterie par la vis sans fin engrenant avec le premier mobile T , alors même qu'aucune lampe n'est allumée et qu'il ne se fait aucune consommation chez l'abonné.

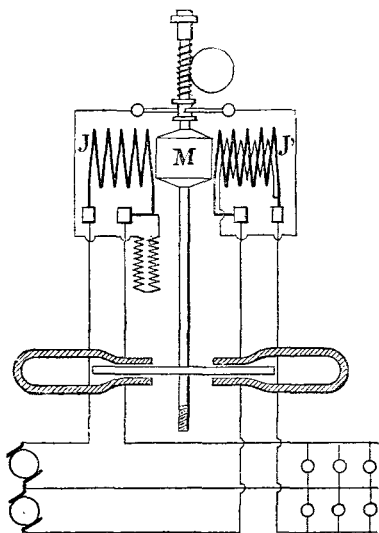


FIG. 513. — Compteur Thomson sur distribution à trois fils.

A sont mobiles autour de vis de serrage qui permettent de régler le compteur, en déviant ces aimants de manière à rapprocher ou éloigner plus ou moins leurs pôles de l'axe de rotation. Ces compteurs peuvent servir aussi bien pour les courants alternatifs que pour les courants continus; ils présentent l'inconvénient de l'emploi des aimants dont les variations d'intensité peuvent amener le dérèglement du compteur.

Le démarrage se fait dès que l'énergie dépensée atteint 10 watts; les frottements et les pertes d'énergie par l'effet

Joule, absorbent 7,5 watts environ; les erreurs d'enregistrement ne dépassent pas $1/2$ pour 100, d'après l'inventeur.

Le compteur peut être établi facilement pour la distribution à trois fils et à cinq fils. Dans le premier cas (fig. 513) les bobines inductrices J et J' sont insérées respectivement dans le circuit des conducteurs extrêmes; l'enroulement induit est également connecté sur ces conducteurs, sans que le fil de compensation traverse le compteur.

Dans ces conditions, on remarquera que les indications du compteur ne peuvent être rigoureusement justes que si les deux ponts sont également chargés; car si les deux courants i et i' sont différents, avec des tensions respectives e et e' sur les deux ponts, E étant la différence de potentiel entre les deux conducteurs extrêmes, l'énergie réellement dépensée sera : $e \times i + e' \times i'$, tandis que le compteur marquera une dépense exprimé par $E \times (i + i')$ et il faudrait pour que les indications du compteur soient justes que l'on ait :

$$e \times i + e' \times i' = E \times (i + i')$$

ce qui n'est pas généralement exact.

Pour le montage sur un réseau à cinq fils, le circuit induit est placé de même en dérivation sur les conducteurs extrêmes, et l'inducteur comporte quatre bobines qui sont intercalées respectivement dans chacun des conducteurs, hormis le fil neutre qui n'est pas utilisé.

COMPTEUR SCHALLENBERGER. — Ce compteur, destiné exclusivement aux courants alternatifs, est basé sur l'action des champs tournants. Ceux-ci sont engendrés par deux bobines fixes (fig. 514) dont l'une AA' extérieure est traversée par le courant à mesurer et l'autre BB' intérieure, fermée en court-circuit sur elle-

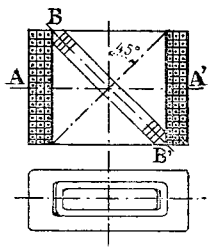


FIG. 514. — Principe du compteur Schallenger.

même, est le siège d'un courant induit par le premier; son axe est incliné à 45 degrés sur celui de la bobine inductrice.

La force motrice induite est, suivant la loi générale de l'induction, en retard d'un quart de période sur le courant inducteur. Le courant induit, par suite de la self-induction de la bobine secondaire, est lui-même en retard d'un certain angle inférieur à 90 degrés sur la force électromotrice de cette bobine; il s'ensuit que les deux courants primaire et secondaire présentent entre eux une différence de phase comprise entre 90 et 180 degrés. Il résulte de cette circonstance et de la position inclinée de la bobine intérieure par rapport à la bobine principale, que le système des deux courants engendre un champ tournant.

A l'intérieur des deux bobines est placé un disque de fer mobile autour d'un axe vertical; le champ tournant, dont l'intensité est augmentée par la présence du fer, développe dans la masse métallique des courants de Foucault qui, réagissant sur le champ, déterminent la rotation du disque.

Sur l'axe de ce disque est montée une roue à ailettes qui éprouve, en tournant dans l'air, une résistance proportionnelle au carré de la vitesse; l'équilibre entre le travail du moteur électrique et le travail résistant de l'amortisseur à air s'établit donc comme dans le cas du compteur Thomson, avec cette différence que, dans ce dernier appareil, la roue à ailettes est remplacée par un amortisseur électro-magnétique.

COMPTEUR DIPHASÉ. — Le circuit diphasé se compose de deux conducteurs d'aller et d'un conducteur de retour. L'énergie totale dépensée sur un pareil circuit pourra donc être enregistrée par deux compteurs distincts, placés respectivement sur chacun des circuits partiels comprenant un conducteur d'aller et le conducteur commun. Un seul compteur double remplira le même office; à cet effet, on montera, les deux bobines à fil fin du compteur Thomson, par exemple, sur le même axe, et les bobines inductrices seront placées respectivement en série sur chacun des conducteurs extrêmes.

COMPTEUR TRIPHASÉ. — Le travail absorbé dans un circuit triphasé peut être décomposé en deux travaux de courants alternatifs simples, de somme équivalente.

Considérons d'abord le cas du montage en étoile ; en se reportant aux notations de la figure

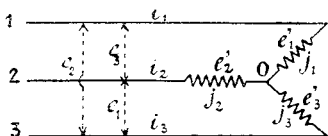


FIG. 515. — Énergie d'un circuit en étoile.

515, on voit que la consommation d'énergie dans tout le circuit d'utilisation est :

$$W = e'_1 j_1 \times e'_2 j_2 \times e'_3 j_3$$

Or, dans le cas considéré, on a :

$$e'_1 - e'_2 = e_3; e'_2 - e'_3 = e_1; e'_3 - e'_1 = e_2$$

c'est-à-dire que la différence de potentiel entre les divers couples de conducteurs, est égale à la différence des tensions entre le centre de l'étoile et les extrémités des trois circuits d'utilisation, ce qui résulte d'ailleurs de l'application des lois de Kirchhoff.

On a encore, d'après la théorie des courants triphasés :

$$i_1 = j_1; i_2 = j_2; i_3 = j_3$$

et :

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0; j_1 + j_2 + j_3 = 0$$

En multipliant la dernière égalité par e'_1 , on obtient :

$$j_1 \times e'_1 + j_2 \times e'_1 + j_3 \times e'_1 = 0$$

En retranchant cette somme égale à 0, du second membre de la relation W, il vient :

$$W = j_2 \times (e'_2 - e'_1) + j_3 \times (e'_3 - e'_1)$$

Mais d'après les relations ci-dessus :

$$e'_2 - e'_1 = -e'_3; (e'_1 - e'_2) = -e_3 \text{ et } e'_3 - e'_1 = e_2$$

En reportant ces valeurs dans W, on trouve finalement :

$$W = i_3 \times e_2 - i_2 \times e_3$$

Dans le cas du montage en triangle (fig. 516), on a les relations suivantes :

$$j_2 - j_1 = i_3; j_3 - j_2 = i_1; j_1 - j_3 = i_2$$

et encore :

$$e'_1 = e_1; e'_2 = e_2; e'_3 = e_3$$

$$e'_1 + e'_2 + e'_3 = 0$$

La multiplication des dernières égalités par i_1 et la soustraction des produits obtenus, de l'expression du travail W , donne la relation :

$$W = e_2 \times (i_2 - i_1) + e_3 \times (i_3 - i_1)$$

et finalement : $W = i_3 \times e_2 - e_3 \times i_2$

Ainsi dans les deux cas, le travail consommé est composé

de deux travaux de courants alternatifs simples $i_3 \times e_2$ et $e_3 \times i_2$ qui ne comprennent que les courants de deux fils sur trois et les différences de tension entre chacun de ces fils et le troisième. Ce principe a été mis en œuvre par Thomson et Aron pour l'application de leurs compteurs à

FIG. 516. — Energie d'un circuit en triangle.

l'enregistrement de la puissance des courants triphasés.

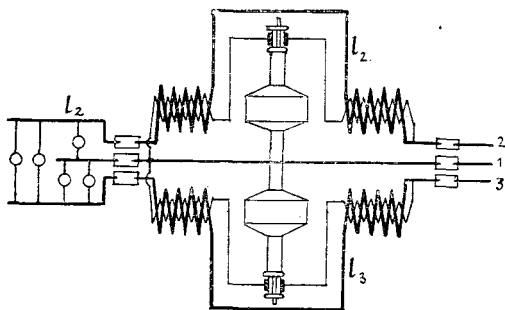


FIG. 517. — Compteur Thomson pour courants triphasés.

Le compteur Thomson (fig. 517) est alors équipé avec deux induits fixés sur le même axe et montés respectivement en dérivation sur les fils 1, 2 et 1, 3, par l'intermédiaire de bobines à fil fin qui viennent compounder l'inducteur ; les bobines à gros fil sont insérées dans les conducteurs 2 et 3 et parcourues par les courants i_2 et i_3 .

Le compteur enregistre donc les deux travaux partiels, ou

plutôt leur résultante, somme ou différence, suivant que lesdits travaux sont de même signe ou de signe contraire.

Dans le compteur Aron, le pendule électro-magnétique est pourvu de deux bobines de fil fin oscillant respectivement à l'intérieur de chacune des bobines fixes à gros fil; ces diverses bobines sont reliées au circuit triphasé, dans les mêmes conditions que les induits et les inducteurs du compteur précédent, de façon à mesurer la résultante des travaux partiels donnés par la formule de l'énergie.

265. Appareils photométriques. — Nous avons vu (§ 254) que les diverses méthodes photométriques étaient basées pour la plupart, sur la loi du carré des distances et l'égalisation de l'éclairement de deux surfaces par les deux foyers que l'on veut comparer.

Cette égalité des effets lumineux est obtenue de différentes manières, dans les divers appareils photométriques, dont nous ne décrivons d'ailleurs que les plus usuels, savoir : ceux de Foucault, de Rumfort, de Bunsen et de Weber.

PHOTOMÈTRE DE FOUCAULT. — Les

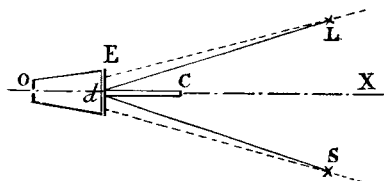


FIG. 518. Photomètre de Foucault.

deux foyers L et S (fig. 518) sont placés en arrière de l'écran en verre laiteux ou dépoli E, de part et d'autre de la cloison C placée dans l'axe OX de l'appareil et de manière à projeter leurs rayons sur le milieu de l'écran, suivant des angles égaux $X d L$ et $X d S$.

On observe les deux plages à travers un tube conique, qui présente un orifice oculaire juste suffisant pour y appliquer un seul œil; les éclaircissements des deux plages sont ainsi mieux jugés avec le même organe, placé d'ailleurs à la distance de 30 centimètres, égale à la longueur du tube et qui convient le mieux pour l'observation nette de l'écran.

La lampe étalon S étant généralement placée à une dis-

tance fixe, de 1 mètre par exemple, on approche ou on éloigne la lampe L à comparer, toujours suivant la direction dL , jusqu'à ce que les éclairements des deux plages soient égaux ; on applique alors la loi du carré des distances aux deux foyers en expérience.

PHOTOMÈTRE DE RUMFORT. — La méthode de Rumfort est basée sur l'égalité d'intensité de deux ombres projetées

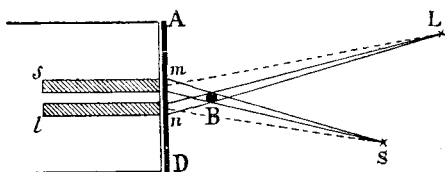


FIG. 519. — Photomètre de Rumfort.

sur un écran blanc opaque, respectivement par chacune des deux sources de lumière à comparer.

Soit AD la trace de l'écran vertical sur la table photométrique horizontale (fig. 519). B le pied de la baguette verticale qui projette ses ombres s et l sur l'écran supposé rabattu sur la table. L'ombre l correspond à la lampe L , et elle est éclairée par la lampe S située du même côté ; l'ombre s due au foyer S est au contraire éclairée par la lampe L .

La baguette B étant placée très près de l'écran, on peut facilement disposer les foyers de manière à rapprocher les deux ombres jusqu'à les juxtaposer par leurs bords intérieurs, afin de faciliter leur comparaison. Lorsque les ombres paraissent avoir la même intensité, on applique la loi générale aux distances mL et nS .

PHOTOMÈTRE DE BUNSEN. — Ce photomètre est basé sur la différence des propriétés lumineuses d'une feuille de papier et d'une tache de matière grasse, au point de vue de la réflexion et de la transparence. Ainsi, l'observateur regardant la face du papier éclairée par transparence, par le foyer placé du côté de la face arrière, verra la tache se détacher brillante sur le fond sombre du papier ; si le foyer est reporté du côté de la face avant par rapport à l'observateur, de manière à éclairer le papier par réflexion, la tache paraîtra sombre sur le fond brillant du papier.

Il résulte de ces circonstances que lorsque la feuille de papier est éclairée également sur ses deux faces par les deux luminaires à comparer, la tache disparaît, les flux lumineux fournis par la tache étant égaux à la somme des flux que le papier émet par transparence et par réflexion.

La feuille de papier $p q$ est placée verticalement sur le banc d'optique et dirigée normalement à la ligne des foyers lumineux $S L$ (fig. 520). Comme les deux faces du papier ne sont jamais identiques, il convient d'observer la tache sur l'une et l'autre face, de manière à obtenir, par le déplacement des foyers, sinon la disparition simultanée de la tache des deux côtés, du moins l'égalité d'apparence lumineuse.

A cet effet, l'appareil est pourvu d'un double miroir dont les deux parties $p m$ et $p n$ forment un angle de 140 degrés, l'observateur regardant suivant la direction $q p$ aperçoit à la fois l'image de l'une et l'autre face du papier et deux taches dont il peut comparer les aspects aisément.

PHOTOMÈTRE DE WEBER. — Les méthodes précédentes supposent que l'on compare des foyers de même teinte; quand il en est autrement, il devient très difficile de juger de l'égalité d'éclairement de deux surfaces diversement colorées. On élimine dans une certaine mesure cette influence, en clignant les yeux, de manière à affaiblir l'excitation lumineuse et en même temps la sensation colorée.

D'autre part, MM. Nichols et Crova ont remarqué que l'égalité des éclaircissements moyens fournis par deux foyers hétérochromes, correspond à l'égalité des éclaircissements réalisés par des rayons d'une longueur d'onde déterminée, soit de 6 mm. 6 ou 600 microns.

Pour obtenir ce rayon, on interpose entre l'œil et l'écran éclairé une cuve en verre contenant, sous une épaisseur de 5 millimètres, une solution de 22 gr. 32 de per-

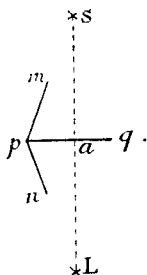


FIG. 520.— Photomètre de Bunsen.

chlorure de fer et de 27 gr. 19 de chlorure de nickel cristallisé, dissous dans l'eau distillée, pour former un volume de 100 centimètres cubes, à 15 degrés.

Dans le photomètre de Weber cette solution est remplacée avantageusement par des verres colorés en vert et en rouge. Cet appareil permet donc de comparer aisément

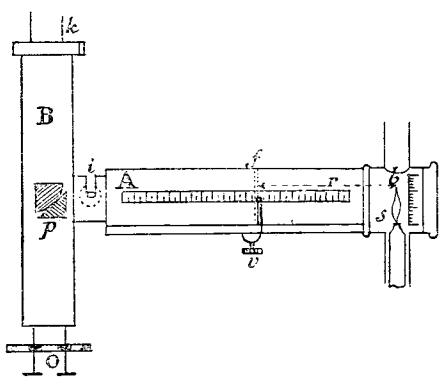


FIG. 521. — Photomètre de Weber.

des foyers diversement colorés ; il est combiné également pour mesurer directement les éclaircissements en un lieu quelconque d'un champ lumineux.

Le photomètre de Weber se compose essentiellement de deux tubes

dont l'un B est monté à angle droit sur le second A et ajusté de manière à pouvoir tourner autour de l'axe de ce dernier qui reste toujours horizontal (fig. 521).

A l'intérieur du tube A, peut se mouvoir un écran *f* en verre opale, par le moyen d'un pignon *v* et d'une crémaillère. L'écran porte une aiguille extérieure qui se déplace devant une échelle divisée en millimètres et indique la distance *r* à la lampe de comparaison *b*.

Celle-ci est une lampe à benzine qui doit être réglée de manière à donner une flamme de 20 millimètres de hauteur ; elle a été étalonnée par rapport à la lampe Hefner, de telle sorte que les résultats obtenus avec cet appareil doivent être rapportés à cet étalon.

A l'intérieur du tube B se trouve l'écran optique de *Lummer-Brodhun*. Celui-ci se compose de deux prismes à réflexion totale (fig 522)). La face hypoténuse du pre-

mier M présente une surface sphérique, coupée suivant un petit cercle par un plan $p q$, appuyé sur la face hypoténuse plane du second prisme, par l'intermédiaire de baume de Canada.

Les rayons qui proviennent des foyers L soumis à l'expérience et qui se propagent suivant l'axe du tube B, traversent la surface de contact $p q$ sans réflexion ni réfraction, le baume de Canada constituant un milieu optique semblable au verre des prismes; ils déterminent ainsi un champ lumineux en forme de cercle.

Les rayons émis par la lampe à benzine de comparaison S, traversent le second prisme et subissent la réflexion totale sur la face hypoténuse, dans la partie extérieure, hors du contact; ils donnent donc un champ en forme d'anneau qui entoure le premier cercle.

Lorsque la lumière en expérience est de même teinte que la lampe à benzine, on obtient pour des éclaircissements égaux, un champ uniforme dans lequel la ligne de séparation des deux surfaces, cercle et anneau, disparaît entièrement.

L'une des extrémités du tube est munie d'un oculaire o , l'autre porte une boîte en zinc quadrangulaire e dans laquelle on place une ou plusieurs plaques laiteuses étalonnées g , suivant l'intensité du lumineux observé.

La plaque laiteuse étant éclairée par ce foyer, placé à la distance R et la plaque intérieure du tube A recevant la lumière de la lampe étalon, on déplacera celle-ci jusqu'à ce que les éclaircissements soient égaux et on lira sur la règle la distance r marquée par l'aiguille; on aura alors pour l'intensité du foyer à l'essai :

$$I = \frac{R^2}{r^2} \times K$$

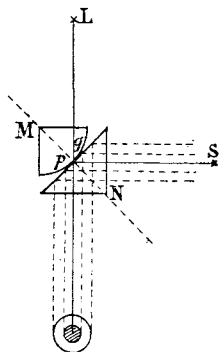


FIG. 522. — Prismes de Lummer-Brodhun.

La quantité K représente évidemment, dans cette formule, l'intensité de la lampe à benzine, exprimée en fonction de l'étalon Hefner et majorée comme il convient, pour tenir compte de l'absorption produite par la plaque laiteuse; la lampe de comparaison étant d'ailleurs réglée à son intensité normale dans tous les cas, on voit que ce facteur K ne dépendra plus que de la nature des plaques placées à l'extrémité du tube.

Pour la mesure des éclairéments en un lieu donné, on peut se servir d'un plan en carton blanc mat que l'on place au point voulu, ou utiliser une plaque laiteuse spéciale que l'on fixe à l'intérieur de la boîte. Dans ce dernier cas, on dispose l'appareil de telle sorte que la plaque occupe l'emplacement même où l'on aurait établi le plan précité.

On prend, comme unité d'éclairement, l'éclairement produit par un foyer d'intensité lumineuse égale à une bougie, tombant sur une surface plane placée normalement aux rayons et à 1 mètre de distance, et l'éclairement s'exprime en bougies-mètres; il est bien entendu qu'il s'agit ici de la bougie Hefner, c'est-à-dire de la lampe étalon.

Supposons que l'éclairement soit tel que celui qui serait produit par un foyer de N Hefners placé à 1 mètre ou 100 centimètres du carton, et soit r centimètres la distance marquée par l'aiguille sur la règle graduée; quand on a obtenu l'égalité des plages lumineuses au photomètre, on peut écrire :

$$\frac{K'}{r^2} = \frac{N}{100^2}$$

$\frac{K'}{r^2}$ sera donc l'éclairement de N bougies-mètres exprimé en fonction de l'intensité K' de la lampe à benzine, aucun verre n'étant placé dans la boîte du tube B.

$$\text{On en déduit : } N = \frac{100^2}{r'^2} \times K'$$

Si l'on emploie la plaque laiteuse au lieu du carton, le facteur K' changera de valeur et deviendra K'' , de sorte que l'on aura :

$$N = \frac{2 \sqrt{100}}{r'^{0.2}} \times K''$$

La photométrie *hétérochrome* est basée sur la loi expérimentale suivante établie par M. Crova : *Quand des corps de même température et de pouvoirs émissifs différents sont placés dans une enceinte obscure, ils émettent des lumières d'intensités très différentes, mais de même composition.*

Il en résulte que l'intensité totale de la lumière blanche I et les intensités R, V des radiations rouge et verte de longueur d'onde déterminée, resteront dans le même rapport pour des lumières de puissance différente, mais de même température; par conséquent, les rapports $\frac{I}{R}$ et $\frac{V}{R}$ ne changeront pas.

Inversement, pour un même luminaire variant de température, $\frac{I}{R}$ et $\frac{V}{R}$ varieront, et à chaque valeur du premier rapport correspondra une valeur du second.

Dans l'appareil de Weber, on observe les intensités des foyers ou les éclairéments des surfaces, successivement à travers les verres rouge et vert interposés devant l'oculaire en O et qui ne laissent passer que les rayons de longueur d'onde 0.656 et 0.547. On prend le rapport des intensités lumineuses verte et rouge et l'on trouve dans un tableau calculé à cet effet les valeurs correspondantes K du rapport $\frac{I}{R}$. On a donc :

$$\frac{I}{R} = K \quad \text{d'où} \quad I = K \times R.$$

C'est-à-dire que pour obtenir l'intensité totale de la lumière blanche, il suffit de multiplier l'intensité des rayons rouges par le coefficient K , correspondant au rapport $\frac{V}{R}$ trouvé expérimentalement.

LUMEN-MÈTRE BLONDEL. — Cet appareil a pour but de

mesurer directement le flux total Q émis par un foyer lumineux; or les relations :

$$Q = 4\pi \times I \text{ où } I = \frac{Q}{4\pi}$$

montrent qu'il suffit de diviser le flux par 4π pour obtenir immédiatement l'intensité moyenne sphérique. Il suffira donc d'une seule expérience, en général, pour obtenir cette intensité.

L'appareil se compose de deux demi-sphères métalliques, dont l'une S est entière et l'autre S' est découpée suivant deux fuseaux de 18 degrés chacun (fig. 523); ces évidements

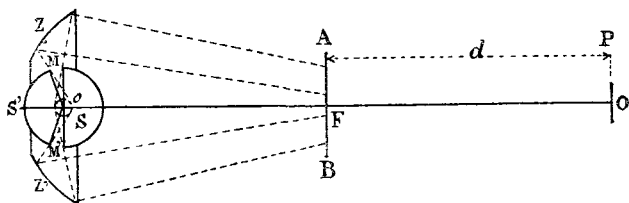


FIG. 523. — Lumen-mètre de Blondel.

forment donc ensemble le dixième de la surface sphérique et laissent passer un flux q égal à la même fraction du flux total.

La lumière émise est reçue par un miroir elliptique argenté z' , dont l'un des foyers se confond avec le centre de la sphère et l'autre est en F . Les rayons réfléchis viennent converger en ce point où l'on place un écran diffuseur AB . Cet écran présente ainsi une tache brillante dont on détermine l'intensité comme celle d'un foyer réel, à l'aide d'un photomètre ordinaire placé à la distance d constante de l'écran.

Il est nécessaire d'étalonner l'appareil à l'aide d'une lampe connue, car le miroir et l'écran absorbent une certaine quantité de lumière, de sorte que ce dernier ne transmet dans la direction du photomètre qu'une fraction déterminée du flux q traversant les fuseaux de la sphère.

Quoi qu'il en soit, l'éclairement produit sur le photomètre par l'écran diffuseur est proportionnel à ce flux et peut être exprimé par :

$$E = K \times q$$

D'autre part, l'éclairement dû à la lampe étalon d'intensité I' , que l'on déplace à la distance l correspondant à l'égalité d'impression lumineuse des deux plaques du photomètre, est $\frac{I'}{l^2}$; on aura donc :

$$\frac{I'}{l^2} = K \times q$$

d'où :

$$q = \frac{I'}{K \times l^2}$$

Finalement l'intensité moyenne sphérique de la lampe placée dans le lumen-mètre sera :

$$I = \frac{10 \times q}{4 \pi}$$

Si l'on veut obtenir l'intensité hémisphérique inférieure, il suffira de recouvrir la demi-sphère supérieure d'une calotte opaque. Lorsque la lumière étudiée éclaire également dans tous les plans verticaux, pour un rayon d'inclinaison donnée, une seule expérience suffit ; dans le cas contraire, on fera dix expériences, par exemple, en faisant tourner chaque fois le foyer sur lui-même d'un dixième de tour et l'on aura ainsi :

$$I = \frac{q_1 \times q_2 \times \dots \times q_{10}}{4 \pi}$$

PHOTOMÉTRIE DES RAYONS DE DIVERSES DIRECTIONS. — Le lumen-mètre de Blondel donne en bloc l'intensité moyenne sphérique, mais il est intéressant de connaître aussi l'intensité absolue des rayons lumineux dans les diverses directions, notamment les intensités horizontales et à 45 degrés environ, suivant la direction ordinaire des rayons d'intensité maximum.

Il faut alors avoir recours à des miroirs, disposés de manière à recevoir les rayons d'inclinaison quelconque et à les renvoyer dans la direction de l'axe du photomètre. Pour faire varier l'inclinaison des rayons reçus sur le miroir, il suffit de déplacer le foyer et le miroir l'un par rapport à l'autre, soit horizontalement, soit verticalement, soit dans les deux directions à la fois. Ces déplacements relatifs donnent lieu à des opérations assez laborieuses et elles exigent chaque fois une nouvelle orientation du miroir, pour que les divers rayons soient toujours réfléchis suivant l'axe du photomètre.

M. Rousseau a imaginé un photomètre dans lequel le foyer, généralement une lampe électrique, est placé à poste fixe au sommet d'un parallélogramme articulé, dont l'un des côtés maintenu suivant l'inclinaison de 45 degrés, est pourvu d'un miroir qui réfléchit les rayons d'intensité maximum vers un écran fixé normalement à une coulisse formant la diagonale correspondante.

Le second côté articulé au même sommet, porte également un miroir, et peut être orienté suivant toutes les inclinaisons, de manière à réfléchir sur l'écran les rayons émis dans les diverses directions. On compare ainsi les intensités des différents rayons à l'intensité maximum de la lampe elle-même.

L'auteur a combiné un *photomètre polyactinique* permettant la comparaison des rayons émis par la lampe étudiée sous les divers angles, avec une lampe étalon, la carcel, par exemple.

Il se compose d'un demi-cercle gradué en degrés C (fig. 524) suspendu par des tiges d'acier à un second cercle D formant chariot et pouvant rouler entre deux rails R et r fixés au plafond de la chambre photométrique.

Au centre des demi-cercles, situés rigoureusement sur la verticale aA , sont des douilles formant paliers dans lesquelles tournent les axes du parallélogramme articulé $abSA$ dont l'un des côtés Aa est remplacé par les deux tiges de suspension rigides eg, fh . Sur la tige verticale

b S peut coulisser un curseur Q portant une tige avec crochet qui sert de support à la lampe en expérience; cette dernière y est suspendue de manière que le foyer arrive juste à la hauteur de l'articulation S.

Sur un axe concentrique indépendant, est calé en A une coulisse Ap et normalement à celle-ci un miroir mn . Cette coulisse forme la bissectrice d'un triangle articulé ipd ; l'articulation d est fixée invariablement sur la traverse diamétrale du cercle C, la seconde, i , placée sur le balancier AS , est entraînée avec lui. En outre, dA est rigoureusement égal à Ai et dp égal à pi .

Dans ces conditons, les deux triangles Adp , Api seront toujours égaux, quelle que soit la position du balancier AS et par suite l'inclinaison du rayon SA reçu par la glace. Le rayon incident fera donc avec la normale Ap au miroir, un angle égal à celui de l'horizontale Ad avec la même normale; ce rayon sera par suite réfléchi, dans tous les cas, suivant l'horizontale Ad , dans la direction d'un photomètre ordinaire, celui de Foucault, par exemple.

FIG. 524.— Photomètre polyactinique de l'auteur.

Le balancier ab se prolonge sur la gauche, pour porter une masse pesante P , destinée à équilibrer le poids du système et de la lampe. Une règle KH pouvant glisser sur les tiges de suspension sert à fixer le parallélogramme articulé dans la position donnant le rayon incident d'inclinaison voulue.

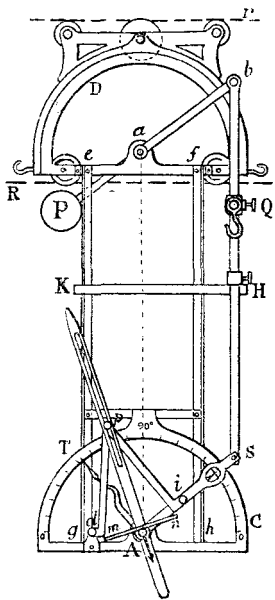


FIG. 524.—Photomètre polyactinique de l'auteur.

L'appareil est encore muni d'une aiguille T montée sur l'axe A et se déplaçant devant le limbe gradué, de manière à indiquer dans chaque position l'angle d'émission du rayon étudié. Enfin un écran de tôle mince recouvert de noir de fumée, peut coulisser sur une tige fixée par une douille mobile sur la bielle b S; elle sert à intercepter les rayons directs, pour ne laisser parvenir au photomètre proprement dit que les rayons réfléchis d'inclinaison voulue.

Conduite, vérification et entretien des dynamos.

266. Conduite des dynamos. — Les dynamos étant construites pour marcher à une vitesse déterminée, on doit veiller à obtenir et à maintenir cette vitesse, qui correspond au fonctionnement le plus sûr et le plus avantageux au point de vue économique.

Les dynamos peuvent être destinées à alimenter soit des lampes à incandescence, soit des lampes à arc ou des moteurs, soit ces différents récepteurs à la fois.

Dans le premier cas, à la mise en marche, on introduit toutes les résistances dans le circuit des bobines inductrices après avoir fermé le circuit d'alimentation des lampes. En effet, si ce circuit restait ouvert, ou la machine ne s'amorcerait pas, si elle était en série, ou le courant exciteur passant tout entier dans les inducteurs pourrait les détériorer, s'il s'agissait d'une machine schunt.

Pour les mêmes raisons, il convient d'introduire la résistance maximum du rhéostat au début, afin de ne pas dépasser le voltage maximum que la distribution peut supporter. Quand la dynamo a atteint sa vitesse normale, on réduit progressivement la vitesse, afin d'obtenir le voltage voulu.

Il ne faut jamais couper brusquement les circuits extérieurs ni ceux d'excitation et, en particulier, il faut se garder de soulever les balais en pleine marche. Ces ruptures brusques des circuits pourraient occasionner des

étincelles d'extra-courants, capables de perforer les isolants et détériorer les enroulements induits et inducteurs de la machine.

Pour terminer l'éclairage, il faut commencer par débrayer la dynamo ou réduire la vitesse, on introduit en même temps les résistances dans le circuit inducteur et l'on n'ouvre le circuit extérieur d'utilisation que lorsque l'intensité est devenue presque nulle.

Si la dynamo doit alimenter des lampes à arc ou des électro-moteurs, il faut, avant de fermer le circuit extérieur, donner à la dynamo sa vitesse normale, car ces récepteurs développent une force contre-électromotrice qui s'opposerait à l'établissement du voltage de la dynamo génératrice, pendant la période de vitesse croissante, à partir de la mise en marche.

On réduira de même la vitesse, pour l'arrêt, avant d'ouvrir le circuit extérieur, et l'on réduira les résistances additionnelles dans ce circuit pour diminuer l'intensité du courant.

Nous avons indiqué ailleurs (t. I, § 144) les précautions à prendre lorsque plusieurs dynamos doivent être introduites successivement sur le réseau de distribution.

267. Entretien des dynamos. — Les dynamos exigent avant tout de grands soins de propreté. Toutes les parties métalliques et surtout les plots, bornes et pièces de contact et de connexion doivent être essuyés avec des chiffons de toile et débarrassés constamment des poussières qui les recouvrent.

L'induit surtout et le collecteur seront brossés chaque jour, afin d'enlever principalement les poussières métalliques pouvant provenir, entre autres, du frottement des balais sur les barres du collecteur, et qui pourraient mettre en court-circuit plusieurs sections de l'induit.

Le collecteur sera maintenu dans sa forme parfaitement cylindrique et toujours à l'état propre et poli; on fera disparaître les rayures à l'aide d'un papier verré, très fin et au besoin avec la lime. Si le collecteur, par suite d'usure irrégulière, n'est plus rond, il faudra porter l'induit

sur le tour, si l'on ne peut faire l'opération sur place à l'aide d'un petit chariot à tourner.

Un collecteur à surface déformée, présentant des rayures et des sillons plus ou moins profonds, détermine des vibrations et des soubresauts aux balais, qui produisent des étincelles très intenses, amenant rapidement la destruction complète du collecteur.

On entretiendra également le vernis des enroulements de l'induit et des inducteurs, en appliquant sur les parties détériorées, à l'aide d'un pinceau, un vernis à la gomme laque, en dissolution dans l'alcool à 90 degrés.

On visitera les graisseurs et on les garnira chaque jour avec de l'huile de première qualité. Il faudra éviter dans cette opération de projeter de l'huile ou des matières grasses quelconques sur la dynamo, notamment sur le collecteur et les porte-balais ; on essuiera ces organes au besoin à l'aide d'un chiffon de toile, propre et parfaitement sec.

On nettoiera les coussinets et réservoirs d'huile à l'aide du pétrole, de manière à éviter la formation de crasses ou cambouis qui viendraient polluer les huiles et nuire au bon fonctionnement mécanique de la dynamo.

Les balais doivent être parfaitement isolés du collier et de la machine, et il convient de vérifier souvent leur état d'isolement. Ils doivent être tenus en parfait état de propreté et nettoyés régulièrement avec un chiffon imbibé de pétrole. Le biseau doit présenter une surface bien régulière et être refait à la meule toutes les fois qu'il est nécessaire.

S'il faut éviter de relever les balais pendant la marche, il convient, au contraire, de le faire quand la machine est au repos. On ne doit pas faire fonctionner les balais à rebrousse-poil, c'est-à-dire qu'ils doivent être orientés, en tenant compte du sens de rotation de l'induit, de telle sorte que les lames du collecteur déterminent par leur frottement une sorte de traction et non de refoulement sur les balais.

On peut, quand l'isolant qui sépare les lames du collec-

teur n'est pas poreux, diminuer le frottement des balais, en lubrifiant cet organe d'un peu de vaseline que l'on essuie avec un linge propre.

268. Dérangements et vérifications. — Les défauts qui peuvent se produire dans le fonctionnement des dynamos proviennent soit de détériorations profondes, soit souvent de légers dérangements, tels que le desserrage d'un écrou ou le mauvais contact des connexions entre les divers conducteurs. On pourra remédier sans délai à ces dernières défauts qu'un examen minutieux des diverses parties de la machine permettra de découvrir aisément.

Les dérangements principaux que nous passerons en revue sont les suivants : défaut de courant ; fortes étincelles aux balais ; échauffement anormal de certains organes de la dynamo ; bruit et trépidations notables pendant la marche ; vitesse anormale de l'organe mobile.

Défaut de courant. — Cette défaut peut provenir de diverses causes :

1° Le magnétisme rémanent des inducteurs peut être insuffisant pour l'amorçage, par suite d'un renversement accidentel du courant exciteur. On essaiera d'amorcer la dynamo série, en reliant les bornes en court-circuit avec interposition d'un plomb fusible et la dynamo schunt, en la faisant tourner à une vitesse supérieure à la vitesse normale.

Si ces moyens ne suffisent pas, on excitera pendant quelques instants les inducteurs, à l'aide d'une dynamo auxiliaire, d'une batterie d'accumulateurs ou d'une pile hydroélectrique, après avoir eu soin de soulever les balais dans le cas de dynamo schunt.

2° Il existe des contacts défautueux, soit par défaut dans les connexions des induits et des inducteurs, oxydation des contacts entre les conducteurs nus, desserrage des vis et des bornes ; on vérifiera avec soin tous les points susceptibles de donner lieu à ces défauts et, pour y remédier, on refera les connexions s'il y a lieu, on nettoiera les contacts avec du papier verrou et l'on serrera les vis comme il conviendra.

3° Un *court-circuit* ou un mauvais isolement peut se présenter dans le circuit extérieur ou dans les enroulements de la dynamo. Si le court-circuit est à l'extérieur, en $m n$ par exemple (fig. 525), tout le courant passera en dehors

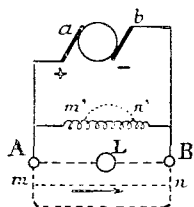


FIG. 525.— Défaut de courant par court-circuit.

des inducteurs, dans le cas d'une machine schunt, et l'alimentation des pièces polaires sera très faible, comme on pourra le constater à l'aide d'un morceau de fer.

Il en sera de même, si une section plus ou moins importante de l'inducteur $m' n'$ est en court-circuit; le nombre d'ampères-tours se trouvant réduit en conséquence.

Un court-circuit dans l'induit, ayant pour effet de réduire le nombre des spires en série et de déplacer le diamètre de commutation, amènera un abaissement de la force électromotrice et des étincelles intenses aux balais.

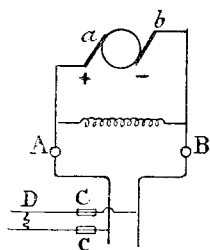


FIG. 526.— Localisation d'un court-circuit extérieur par fusion.

On reconnaîtra de suite si le court-circuit est intérieur ou extérieur à la dynamo; pour cela il suffit, après avoir détaché le circuit extérieur des bornes, d'intercaler une lampe entre celles-ci; si elle fonctionne bien, le défaut est nécessairement sur le circuit extérieur détaché, sinon on recherchera le défaut à l'intérieur.

Pour localiser le défaut constaté à l'extérieur, on replacera brusquement les conducteurs aux bornes (fig. 526), alors que la dynamo est encore amorcée; le courant passant à la fois dans l'inducteur et le circuit extérieur, fera fondre les coupe-circuit de sûreté $c c$ placés sur la dérivation défectueuse, présentant un défaut en D .

Toutefois, ce moyen peut entraîner la combustion de l'enveloppe isolante et la fusion des conducteurs, au cas où les coupe-circuit ne fonctionneraient pas.

On se sert plutôt de la pile et du galvanomètre. On détache le circuit principal du tableau de la station, après avoir ouvert les circuits des lampes (fig. 527). Le circuit de la pile et du galvanomètre en série sont reliés respectivement par leurs extrémités libres aux points de départ des conducteurs principaux.

Si la canalisation est en bon état, on ne constate aucune déviation de l'aiguille du galvanomètre. Dans les cas contraires, on détache tous les conducteurs de dérivation, puis on essaie successivement le circuit principal et les circuits dérivés.

Enfin le court-circuit peut être localisé dans la douille des lampes à incandescence ou dans les divers appareils que l'on vérifiera de la même manière.

Les défauts à l'intérieur de la dynamo peuvent provenir de cinq causes différentes, savoir :

Un mauvais isolement des bornes de la dynamo, des porte-balais ou des bobines inductrices; un court-circuit dans les bobines inductrices; un court-circuit dans l'induit ou le collecteur; une perte à la terre dans l'induit.

Défaut d'isolement.— Un pareil défaut aux bornes A et B consiste en une communication plus ou moins directe ou parfaite avec la terre. L'isolement défectueux d'une seule borne n'a d'autre effet que de modifier la répartition du potentiel, mais il a l'inconvénient de mettre l'installation en défaut dès qu'une seconde terre se produit, soit sur la dynamo, soit sur le réseau; il convient donc de faire disparaître même la terre d'une seule borne.

Une pile P et un galvanomètre G en série, sont d'une part reliés à la terre, d'autre part successivement à cha-

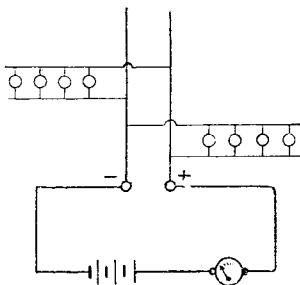


FIG. 527.—Localisation d'un court-circuit extérieur par le galvanomètre.

cune des bornes de la dynamo : le courant se fermant alors par la terre actionne le galvanomètre (fig. 528).

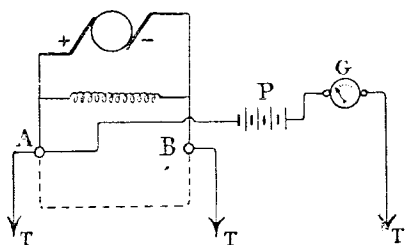


FIG. 528. — Défaut d'isolement aux bornes.

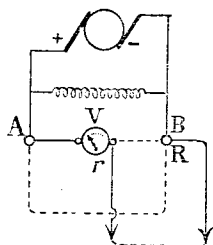


FIG. 529 — Mesure du défaut d'isolement.

On peut déterminer la valeur de la résistance d'isolement aux bornes, à l'aide d'un voltmètre de résistance r (fig. 529) placé d'abord entre les bornes A et B, puis entre l'une des bornes et la terre.

Soit e , la différence de potentiel normale entre les bornes, on aura :

$$e = r i \text{ ou } i = \frac{e}{r}$$

et comme le courant i , qui traverse le voltmètre, est nécessairement proportionnel à la déviation D de son aiguille, on peut écrire :

$$i = K \times D = \frac{e}{r} \text{ ou } e = r \times K \times D$$

Si l'on détache le voltmètre de la borne négative, pour mettre la connexion f au sol, on aura encore, en désignant par R la résistance d'isolement de cette borne par rapport à la terre :

$$e = (r + R) \times d' = (r + R) \times K \times d$$

d étant la nouvelle déviation.

Egalant les deux valeurs identiques de e , il vient :

$$(r + R) \times K \times d = r \times K \times D$$

d'où :

$$\frac{r}{R + r} = \frac{d}{D}$$

On tirera de cette relation R , si r est connu. Dans le cas où r est négligeable devant R , la relation ci-dessus se réduit à :

$$\frac{r}{R} = \frac{d}{D} \text{ d'où } R = \frac{D}{d} \times r$$

On opère de même pour vérifier l'isolement des porte-balais, soit par rapport à la terre, soit par rapport au bâti de la dynamo.

Défaut dans les bobines inductrices. — Pour rechercher le défaut d'isolement dans les bobines inductrices, on procédera encore de même, après avoir eu soin de délier les connexions qui relient les bobines au circuit, afin de localiser la défectuosité.

On voit (fig. 530) que si les bobines sont à la terre par l'intermédiaire du bâti, par exemple, en plusieurs points a , b , c , presque tout le courant est dérivé par la terre, et la dynamo n'étant pas suffisamment excitée, ne donne pas de courant.

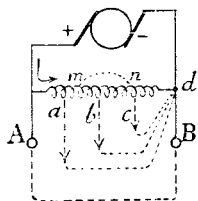


FIG. 530. — Défaut d'isolement des bobines inductrices.

Un court-circuit $m n$ peut aussi se produire par contact direct de spires dénudées ou par l'entremise du bâti; dans ce cas, une partie seulement des spires sera parcourue par le courant excitateur. Toutefois, dans le cas de la dynamo schunt, le courant pourra être plus intense par suite de la réduction de résistance, et l'excitation rester à peu près la même. Dans tous les cas, l'échauffement des bobines sera moindre.

On reconnaîtra la partie défectueuse, en montant successivement et séparément chacune des bobines en série avec le galvanomètre et la pile; celle présentant une terre ou un court-circuit donnera la plus forte déviation au galvanomètre.

Défaut dans l'induit. — L'enroulement induit peut présenter un isolement défectueux, ou une section en court-circuit.

Supposons d'abord un contact en M de la bobine A avec l'axe et le bâti (fig. 531).

On reliera le circuit d'une batterie de quelques éléments d'accumulateurs B, en série avec une résistance R réglant

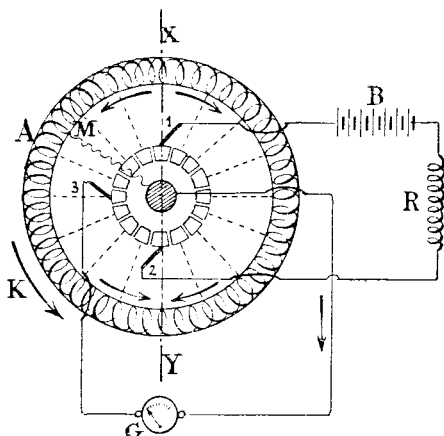


FIG. 531. — Défaut d'isolement dans l'induit.

l'intensité du courant, aux balais 1 et 2 de la dynamo. Le courant se déverse dans les deux demi-anneaux de chaque côté du diamètre de commutation X Y.

On forme un autre circuit, avec un galvanomètre G, relié d'une part à l'arbre 4, de l'autre à un balai 3 que l'on fait glisser sur les diverses lames du collecteur, en faisant tourner lentement l'induit à la main.

A partir de M, le courant se divise dans le demi-anneau de gauche, une partie passe en K, l'autre par l'axe, le galvanomètre, le balai 3 et la même section K. Le galvanomètre dévie par conséquent ; mais dès que la section défectueuse passera sous ce dernier balai, les deux extrémités du circuit de G seront au même potentiel, étant ramenés en un point de contact commun, et l'aiguille du galvanomètre reviendra au zéro.

Soit maintenant une section K de l'induit en court-

circuit (fig. 532). La dynamo peut alors ne pas donner de courant, car l'électricité circule à l'intérieur de la dynamo sans se déverser à l'extérieur, le demi-anneau de droite, par exemple, pouvant se trouver relié en court-circuit par le demi-anneau de gauche où se trouve le défaut.

En outre, il se produit des étincelles intenses au passage de la section en court-circuit sous les balais, car la répartition des courants se faisant d'une façon irrégulière, la réaction d'induit et le champ résultant modifient à chaque instant la position de la ligne neutre.

Pour trouver la section défectueuse, on fait le même montage que précédemment, mais les deux bornes du galvanomètre

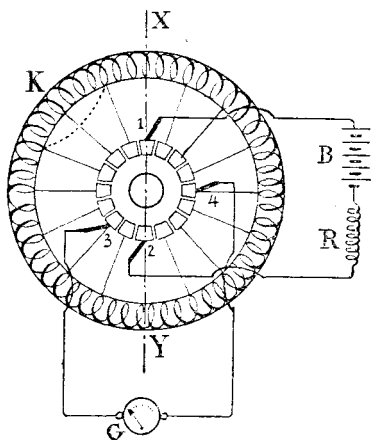


FIG. 532.— Court-circuit dans l'induit.

aboutissent à deux balais 3 et 4. Le balai 4 étant fixe, par exemple, on promène l'autre sur le collecteur jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro. Cela veut dire que la chute de potentiel de 1 à 3 est la même que celle de 1 à 4; on en conclut que puisqu'il y a plus de lames, et, par suite, plus de bobines à gauche, un certain nombre de celles-ci sont en court-circuit. On arrivera donc à localiser la bobine défectueuse en la recherchant sur la plus grande section.

Le circuit peut être ouvert, soit dans les organes de la dynamo, soit dans le circuit extérieur; une lampe placée entre les bornes de la machine, les conducteurs principaux étant détachés, permet, comme nous l'avons vu, de

déterminer sur lequel des deux circuits, extérieur ou intérieur, se trouve le défaut.

Si c'est le dernier circuit qui est en cause, l'interruption peut être en premier lieu dans les enroulements de l'inducteur. Pour le vérifier, on détachera des bornes de la dynamo les extrémités des diverses bobines, et on intercalera successivement chacune d'elles dans le circuit d'une pile et d'un galvanomètre ou d'une sonnerie. S'il existe une interruption de circuit, il n'y aura ni déviation ni fonctionnement de la sonnerie.

Il peut aussi exister une solution de continuité dans l'enroulement induit. On s'en rend compte rapidement de la manière suivante. La dynamo étant en mouvement, on touche à l'aide d'un fil $a b$, suffisamment cintré, le collecteur en deux points correspondant à deux lames $m n$, non voisines.

Tant que la section interrompue n'est pas comprise entre les points de contact, il ne passe aucun courant par le fil $a b$; mais dès que cette section est intercalée, des étincelles jaillissent aux extrémités a et b ; on arrête alors la machine, et la bobine défectueuse se reconnaît aux traces de brûlure de la lame correspondante.

Une mauvaise connexion entre les bobines et les lames du collecteur, par exemple, produirait les mêmes effets. Les lames intéressées se détériorent, d'ailleurs, et décèlent l'existence d'un défaut qui provient de ruptures ou de mauvais contacts qu'il importe de faire disparaître. On vérifiera aussi si les balais appuient convenablement sur le collecteur.

Si l'expérience de la lampe a démontré que la coupure existe sur le circuit extérieur, on examinera d'abord tous les appareils accessoires, interrupteurs, commutateurs, coupe-circuit fusibles, bornes; puis on vérifiera au galvanomètre les diverses sections du circuit.

Étincelles aux balais. — Elles se produisent dans le cas de surcharge de la dynamo, imputable soit à une tension anormale due à une excitation trop intense ou à une vitesse exagérée, soit à une intensité trop considérable

résultant de l'alimentation de lampes à arc prenant une intensité trop élevée ou de lampes à incandescences trop nombreuses.

Cette surcharge peut encore provenir d'un mauvais isolement du circuit extérieur. qu'on reconnaîtra à l'aide d'un circuit d'essai comprenant un galvanomètre et une pile, et relié d'une part à la terre et de l'autre en un point des conducteurs à vérifier.

Un calage défectueux des balais est la cause la plus fréquente des étincelles, il en est de même du mauvais état des balais, porte-balais et collecteur.

Une interruption dans le circuit de l'induit détermine des courants intermittents et des réactions d'induit variables, qui occasionnent encore de violentes étincelles au collecteur. Généralement, la disjonction se produit aux lames du collecteur ; on peut alors relier provisoirement les deux lames voisines.

Pour les mêmes raisons, un court-circuit dans l'induit ou le collecteur, l'isolement défectueux ou l'aimantation insuffisante des bobines inductrices, donnent lieu au même phénomène.

Echauffement anormal des organes de la dynamo. — Les conditions de fonctionnement normal d'une dynamo exigent que la température des différents organes ne s'élève pas à plus de 40 degrés au-dessus de la température ambiante.

M. Montpellier, dans son ouvrage sur les dynamos, classe ainsi les diverses causes pouvant déterminer une élévation de température anormale :

1^o Dans l'induit : Courant trop intense dans le circuit principal. Court-circuit dans l'induit. Courants de Foucault dans l'armature. Humidité des bobines de l'induit.

2^o Dans les inducteurs : Courant d'excitation trop intense. Humidité des bobines inductrices. Courants de Foucault dans les pièces polaires.

3^o Dans les paliers : Graissage défectueux. Poussières et corps étrangers dans les coussinets. Arbre faussé, mal dressé ou mal tourné. Coussinets mal alignés ou trop serrés. Butée du

moyeu de la poulie ou de l'épaulement de l'arbre contre les coussinets. Courroie trop tendue. Induit trop rapproché de l'une des pièces polaires.

Bruits et trépidations. — D'après le même auteur, les causes de ces défauts sont les suivantes :

Ecrous desserrés. Chocs de l'épaulement de l'arbre, du moyeu de la poulie, ou du bord de la courroie contre les coussinets ou les paliers. Induit ou poulie mal équilibrés. Chocs de l'induit contre les pièces polaires. Joint de la courroie battant contre la poulie. Ronflement dû aux dents du noyau à sillons de l'induit, lors de leur passage devant les pièces polaires. Mauvais calage des balais qui grincent sur le collecteur.

Vitesse de rotation anormale. — La vitesse ne pourrait s'accélérer que dans le cas de la chute de la courroie et toutes fois que le travail du moteur sera supérieur à la dépense d'énergie électrique et aux travaux des résistances passives.

La réduction de vitesse angulaire peut provenir d'une surcharge de la dynamo ; d'un court-circuit dans l'induit, de frottements anormaux dans les coussinets, mal réglés ou souillés de corps étrangers ; de contacts et frottements de la surface de l'induit sur les pièces polaires, dont elle doit être éloignée normalement de 1,5 millimètres.

Tout ce qui a été dit ci-dessus pour les machines à courant continu s'applique également aux alternateurs, sauf, naturellement, pour ce qui concerne les défauts afférents au collecteur, puisque cet organe est ici remplacé par deux bagues pleines isolées.

Mesure du rendement des dynamos.

269. **Mesure du rendement des dynamos.** — Deux éléments distincts sont nécessaires pour évaluer le rendement d'une dynamo ; d'une part, la puissance mécanique fournie à la

génératrice; d'autre part, l'énergie électrique produite par elle.

PUISSANCE MÉCANIQUE. — La puissance mécanique absorbée se mesure soit par le frein de Prony, soit par le dynamomètre de transmission (tome I, § 10).

Dans le cas du frein de Prony, il faut considérer que le fonctionnement du moteur, la pression de la vapeur agissant sur le piston, la vitesse, le degré d'admission de vapeur, comme aussi le travail absorbé par les pompes et condenseurs, donnent comme résultante un certain travail disponible qui est recueilli et absorbé par la dynamo; le frein étant destiné à remplacer celle-ci et à mesurer le travail qui lui était précédemment transmis, il faudra nécessairement reproduire les mêmes conditions de pression, de vitesse, d'admission et toutes les circonstances primitives de fonctionnement du moteur, afin que le travail mesuré par le frein soit bien celui transmis précédemment à la dynamo.

Pour l'essai au dynamomètre de transmission, on voudra bien se reporter à la description que nous avons faite ailleurs (tome I, § 10).

Connaissant ainsi la différence de tension des deux brins de la courroie, qui constitue la force motrice elle-même, il suffira de la multiplier par la vitesse linéaire de cette courroie. Cette dernière s'obtient en multipliant la circonférence de la jante de la poulie de la dynamo, par le nombre de tours par seconde, relevé à l'aide d'un compte-tours.

MESURES ÉLECTRIQUES. — Soit une dynamo D à enroulement compound. Pour mesurer l'intensité du courant, on forme un circuit comprenant le circuit intérieur de la machine, le rhéostat à résistance variable R et l'ampèremètre schunté A (fig. 533).

Les connexions sont opérées facilement à l'aide d'un commutateur général C, formé souvent d'une plaque de paraffine P, dans laquelle sont encastrés des godets à mercure; ces différents godets sont reliés entre eux, deux à deux, par des cavaliers en cuivre. On forme ainsi le

circuit $a g R c d A e f$ et b qui comprend le circuit intérieur avec l'induit et l'inducteur en série T .

Si l'on veut mesurer le courant dérivé dans le schunt S , on intercalera un ampèremètre fermé par le cavalier $h g$.

La différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur, s'obtient en reliant les points a et b ou, ce qui

revient au même, les godets h et f aux godets K et l où aboutissent les fils de connexion au voltmètre V .

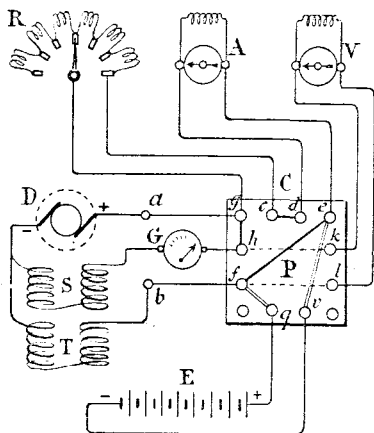


FIG. 533. — Schéma des connexions pour les mesures électriques du rendement.

au quotient de la différence de potentiel par le courant.

On pourrait encore se servir de l'ampèremètre A pour mesurer le courant du schunt S , en portant le cavalier de $h g$ en $h f$, ce qui permettra d'ailleurs de régler l'intensité du courant par le rhéostat R .

On ne peut opérer de même pour l'induit, car la fraction de force motrice qui détermine le flux du courant dans l'enroulement ne se manifeste pas au dehors et ne peut être mesurée aux balais ou aux bornes. Il faut donc utiliser une source d'énergie extérieure, et nous pourrions alors mesurer la différence de potentiel aux extrémités du cir-

cuit intérieur, soit de l'induit seul, soit de l'induit et de l'inducteur en série.

On emploie à cet effet une batterie d'accumulateurs E et l'on forme le circuit $q f b D a R c d A e v$. On lit en même temps le courant à l'ampèremètre A et la différence de potentiel au voltmètre V . La résistance cumulée de l'induit et de l'inducteur en série est égale au quotient des volts par les ampères.

À côté de ces méthodes générales, on a imaginé des méthodes particulières dont nous exposerons succinctement les principes.

PROCÉDÉ DU GÉNÉRATEUR MOTEUR. — La première méthode, imaginée par M. Swinburne, consiste à étudier le rendement d'un générateur que l'on fait fonctionner à vide, comme moteur.

Soit E et I la force électromotrice et le courant d'un générateur en série tournant à sa vitesse normale.

Si nous désignons par e la différence de potentiel aux bornes, par r_a et r_i les résistances respectives des enroulements de l'armature et de l'inducteur, on aura :

$$E = e + (r_a + r_i) \times I$$

Faisons maintenant tourner la dynamo, comme moteur, à la même vitesse et sans charge, c'est-à-dire sans lui imposer aucun travail mécanique. À cet effet, il faudra fournir aux inducteurs de la dynamo un courant provenant d'une source extérieure et dont on augmentera l'intensité jusqu'à ce que la force électromotrice développée par l'induit devienne égale à la force électromotrice E primitive (§ 216).

Pour qu'il en soit ainsi, il faut évidemment que la différence de potentiel aux bornes ait pour valeur :

$$e_1 = E + r_a \times i_1$$

en désignant par i_1 le courant qui traverse alors l'induit.

Puisque le moteur développe une force contre-électromotrice égale à E , à la même vitesse, c'est que le flux total à travers l'armature est le même que dans le cas du fonctionnement en générateur. Il en résulte que les pertes intérieures, du fait de l'hystérésis et des courants de Foucault, pertes qui

ne dépendent que du flux et de la vitesse, ainsi que les pertes par frottements, sont restées les mêmes et peuvent être prises pour celles du générateur.

Remarquons maintenant que l'énergie absorbée par le moteur, soit :

$$e_1 \times i_1 = E \times i_1 + r \times i_1^2$$

se répartit en deux fraction $E \times i_1$ et $r_a \times i_1^2$; la seconde partie est relative à l'énergie transformée en chaleur dans l'enroulement induit par l'effet Joule, et elle est généralement négligeable; l'autre ne peut correspondre qu'aux travaux absorbés par les frottements, l'hystérésis et les courants de Foucault, et doit nécessairement représenter la somme de ces pertes, étant donné que nous marchons à vide, sans rien utiliser pour des travaux extérieurs.

Si, comme nous l'avons admis, ces pertes sont les mêmes dans le générateur, nous aurons pour le rendement de celui-ci :

$$R_i = \frac{e \times I}{e \times I + (r_a + r_i) I^2 + E \times i_1}$$

Ce procédé ne tient pas compte des effets de la réaction d'induit qui diffèrent à vide et à pleine charge, mais elle donne une approximation suffisante dans le cas ordinaire de la pratique.

Procédé de deux machines identiques. — Si l'on a deux machines identiques, on peut employer le procédé de M. Hopkinson. Il consiste à rendre les arbres des induits solidaires et à faire tourner l'ensemble par l'intermédiaire d'un dynamomètre de transmission.

L'une des dynamos fonctionne comme génératrice et envoie son courant dans la seconde jouant le rôle de moteur-réceptrice. A cet effet, il est nécessaire que le champ excitateur de celle-ci soit réduit de manière à obtenir une force contre-électro-motrice e inférieure à E et telle que le courant I débité soit égal au courant normal, d'après la relation :

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

E étant la force électromotrice du générateur (§ 214).

Dans ces conditions, l'énergie mécanique absorbée par la génératrice et transformée en énergie électrique se transforme de nouveau en énergie mécanique, au rendement près, dans la réceptrice. Il s'ensuit que le dynamomètre n'a plus à transmettre que la différence entre le travail total absorbé par la génératrice et le moteur, d'une part, et celui restitué par ce dernier d'autre part. Ce procédé a donc l'avantage de n'exiger qu'un appareil dynamométrique de peu d'importance.

MESURE DU RENDEMENT DES ALTERNATEURS ET DES TRANSFORMATEURS. — La méthode de mesure directe du rendement ainsi que les procédés spéciaux exposés ci-dessus au sujet des dynamos à courant continu, s'appliquent également aux alternateurs. En particulier, la méthode du générateur-moteur de Schwinburne a l'avantage de n'exiger dans le cas des alternateurs, qu'une génératrice à courant alternatif de puissance minime, qui peut néanmoins fournir le courant normal à la machine essayée, celui-ci ne correspondant qu'à une faible puissance, par suite du décalage qui, dans la marche à vide, est voisin de 90 degrés.

La méthode des deux machines compensatrices de Hopkinson, peut également se simplifier pour les alternateurs multipolaires à induit fixe, en divisant le circuit induit en deux parties de forces électromotrices inégales, connectées en opposition, l'enroulement à force électromotrice supérieure jouant le rôle de génératrice et l'autre celui de moteur.

D'une manière générale, la puissance électrique d'un courant alternatif a pour expression :

$$W = E \times I \times \sqrt{1 - K^2}$$

l'expression $\sqrt{1 - K^2}$ tenant compte du décalage entre la force électromotrice et le courant.

Les quantités E et I peuvent se mesurer à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre thermique ou d'un électro-dynamomètre, mais le produit $E \times I$ ne donne que les watts appa-

rents. Pour mesurer les watts réels $W = E \times I \times \sqrt{1 - K^2}$, il faut avoir recours à un watt-mètre.

Connaissant ainsi par trois mesures successives les quantités W , E et I , on en déduira la valeur du coefficient $\sqrt{1 - K^2}$, c'est-à-dire du facteur de puissance, car de la relation :

$$W = E \times I \times \sqrt{1 - K^2}$$

on tire aisément :

$$\sqrt{1 - K^2} = \frac{W}{E \times I}$$

270. Rendement des transformateurs. — Ces appareils donnent lieu comme les dynamos à des pertes d'énergie, par effets Joule, courants de Foucault, et principalement par hystérésis dans le fer de la carcasse magnétique.

On effectuera la mesure directe du rendement, en faisant fonctionner le transformateur à pleine charge et à sa tension normale; on détermine alors les watts utiles aux bornes secondaires et les watts dépensés aux bornes primaires.

Lorsque la résistance extérieure du circuit secondaire est dépourvue de self-induction, comme il arrive dans le cas de l'utilisation des lampes à incandescence, on peut évaluer la puissance secondaire utile, en mesurant la différence de tension efficace et le courant efficace aux bornes du circuit secondaire, avec un voltmètre et un ampèremètre thermiques, ou autres appareils propres à la mesure des courants alternatifs.

Pour la puissance dépensée dans le circuit primaire, qui présente toujours une certaine réactance, il faut recourir à l'emploi du wattmètre.

On peut encore utiliser la méthode des trois voltmètres, pour laquelle nous renverrons le lecteur aux traités spéciaux de mesures électriques. Cette méthode exige d'ailleurs l'emploi d'une génératrice ou d'un transformateur auxiliaire capable de développer une force électromotrice supérieure à la tension primaire du transformateur, et de lui fournir la puissance totale qu'il dépense à pleine charge. On s'exonère de ces sujétions en appliquant aux

transformateurs un procédé analogue à celui des machines compensatrices.

Soient deux transformateurs identiques T et T_1 (fig. 534) ; les primaires p et p_1 sont placés en dérivation sur les bornes B et D du circuit d'alimentation, et les secondaires s et s_1 sont reliés de manière à former un circuit dans lequel leurs forces électromotrices soient en opposition.

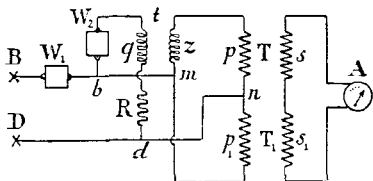


Fig. 534. — Méthode des deux transformateurs.

On peut appliquer ainsi aux bornes m, n des circuits primaires la différence de tension normale ; mais si les choses en restaient là, les tensions secondaires de s et s_1 étant égales et directement opposées, il ne passerait aucun courant dans le circuit de ces bobines, et l'aiguille de l'ampèremètre A intercalé ne subirait aucune déviation.

Pour obtenir le courant normal, on augmente légèrement la force électromotrice dans l'une des bobines, en intercalant dans son circuit le secondaire z d'un petit transformateur t , dont le primaire q , en série avec une résistance R , est relié aux bornes b et d .

On règle cette force électromotrice additionnelle à l'aide de la résistance R , de telle sorte que l'excédent de tension de s sur s_1 détermine dans le circuit de ces bobines le courant d'intensité normale.

Les transformateurs fonctionneront donc ainsi respectivement à leur tension et à leur charge normales, mais la génératrice qui alimente le circuit principal BD , n'a qu'à fournir la différence entre la puissance totale développée dans les transformateurs et la puissance restituée par ceux-ci.

En effet, si le transformateur T est le siège d'une puissance P et que son rendement soit de 0.97 ou K , il transmettra au second transformateur une puissance égale à $0.97 P$ ou $K \times P$, celui-ci restituera à son tour à l'ensemble du système $0.97 K \times P$ ou $K^2 \times P$, de sorte que la perte P_2 dans les deux transformateurs sera

$$P_2 = P - K^2 \times P$$

Outre cette puissance différentielle, la génératrice aura à pourvoir à la puissance p absorbée par le petit transformateur auxiliaire et à celle $r i^2$ relative à la résistance R , de sorte que la puissance totale P_1 fournie par elle sera :

$$P_1 = P_2 + p + r \times i^2$$

D'où :

$$P_2 = P_1 - p - r \times i^2$$

On mesurera la puissance P_1 fournie par la génératrice à l'aide d'un wattmètre W_1 inséré dans le circuit général; un second wattmètre W_2 mesure la puissance distribuée à la résistance et au petit transformateur. On en déduit la puissance P_3 fournie à ce dernier, de sorte qu'en désignant par K' le rendement supposé connu de cet appareil auxiliaire, on aura pour la puissance absorbée par celui-ci :

$$p = P_3 - K' \times (P_3 - r) \times i^2$$

Quant à P , sa valeur résulte du régime normal de tension et de courant auquel on le fait fonctionner.

On connaîtra ainsi toutes les quantités entrant dans l'expression du rendement tiré de la première relation :

$$K = \sqrt{\frac{P - P_2}{P}}$$

CHAPITRE XVIII

TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE

Télégraphie.

271. **Télégraphe Bréguet.** — L'art de la transmission électrique des signaux et de la parole a fait aujourd'hui de tels progrès et comporte des instruments tellement perfectionnés que ces questions ne peuvent être traitées en détail que dans les ouvrages techniques spéciaux; nous nous contenterons donc ici d'exposer le principe du fonctionnement électrique des systèmes les plus nouveaux en usage aujourd'hui.

Au début de cette étude, on ne peut toutefois passer sous silence le télégraphe à cadran de Bréguet, qui fut le précurseur des appareils électriques de télégraphie et qui, à défaut d'autre mérite, a l'avantage d'une simplicité de fonctionnement et de manœuvre qu'on a dû malheureusement sacrifier dans l'établissement des appareils plus perfectionnés.

Comme tous les systèmes télégraphiques, le système Bréguet comporte *un transmetteur* et *un récepteur* dans chacun des postes qui se correspondent. Le transmetteur destiné à envoyer les signaux électriques sur la ligne qui le relie au récepteur, est ici un simple commutateur à manivelle qui, dans le mouvement de rotation qu'on lui imprime à la main, ferme le circuit de la pile locale sur la ligne et l'interrompt alternativement, en passant d'une lettre à la suivante sur le cadran portant les vingt-cinq

lettres de l'alphabet, plus une croix formant le vingt-sixième signe.

Le récepteur est un appareil d'horlogerie à cadran, comportant les mêmes signes et dont l'aiguille est sollicitée à tourner sous l'action de la minuterie et du ressort moteur. A l'état de repos l'aiguille est immobilisée par le doigt de l'armature d'un électro-aimant qui s'engage dans les dents de l'une des deux roues à rochet, à treize dents, montées sur un même axe et disposées de telle sorte que les dents de la roue antérieure sont intercalées entre les dents de la roue postérieure et réciproquement.

Lors de l'émission d'un courant par le transmetteur, l'armature attirée par l'électro-aimant traversé par ce courant, oscille autour de son axe horizontal et le doigt en prise avec la première roue à rochet, l'abandonne et vient se placer dans le plan de la roue antérieure; l'axe des roues est libéré, mais dès qu'il a fait un vingt-sixième de tour, la dent suivante de la roue antérieure vient buter contre le doigt de l'armature et le système se trouve immobilisé. Un instant après le courant est interrompu par le transmetteur et l'armature obéissant à un ressort antagoniste ramène le doigt dans le plan du rochet postérieur, permettant ainsi un nouvel avancement de la minuterie.

Ainsi l'aiguille du récepteur n'avance chaque fois que d'un vingt-sixième de tour et, si l'on a pris soin de ramener toujours au début la manivelle du transmetteur et l'aiguille du récepteur sur la croix du cadran qui sert de point de repère, on voit que l'aiguille suivra exactement le mouvement de rotation du transmetteur et indiquera la lettre transmise, par un arrêt plus ou moins prolongé sur la lettre dont il s'agit.

272. **Télégraphe Morse.** — Ce système ne le cède en rien comme simplicité au précédent; le transmetteur ou *manipulateur* est même réduit, pour ainsi dire, à sa plus simple expression. Toutefois la manœuvre est plus difficile, et exige, tant pour la transmission que pour la lecture des télégrammes reçus, un apprentissage assez long.

Dans ce système, en effet, les lettres et les chiffres sont représentés par une combinaison de traits longs et courts qu'on désigne sous le nom de *points* et de *barres*; ainsi la lettre *a* est constituée par un point suivi d'une barre (— ·); la lettre *n* par l'inverse (· —), la lettre *s* par trois points (· · ·) et ainsi de suite.

Le manipulateur-transmetteur (fig. 535), se compose d'un levier en laiton *U*, oscillant autour d'un axe hori-

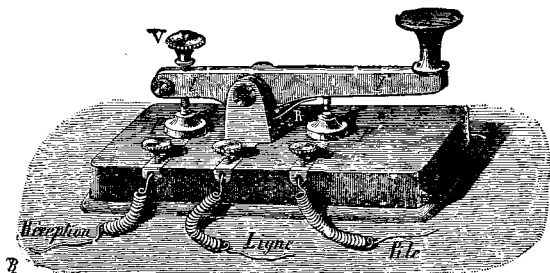


FIG. 535. — Manipulateur Morse.

zontal et pourvu à l'une de ses extrémités d'un bouton à vis réglable *V*, qui au repos vient en contact avec la borne métallique *p*, sous l'action du ressort *R*; à l'autre extrémité ce levier porte un bouton sur lequel appuie la main de l'opérateur.

Comme le montre la figure, l'axe du manipulateur est en relation constante avec la ligne par son support et celle-ci communique, au repos, avec le récepteur du poste considéré, par la vis *V* et la borne *p*. Une deuxième borne *p'* est reliée au pôle positif de la pile locale et sert en quelque sorte d'enclume à un second butoir, placé en regard, au-dessous du levier oscillant.

En abaissant la manette le courant de la pile est lancé sur la ligne par le contact *p'*, l'axe du levier et son support; en même temps, le contact en *p* est interrompu, de sorte que le courant de la pile locale ne peut traverser le récepteur du poste.

L'appareil récepteur, représenté par la figure 536, comporte, d'une part, un mouvement d'horlogerie qui fait avancer la bande de papier destinée à recevoir les traits de l'alphabet Morse et, d'autre part, un électro-aimant rece-

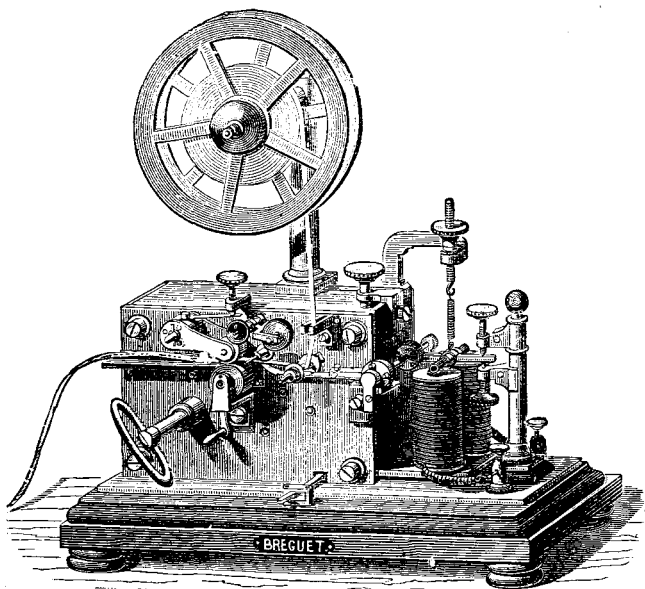


FIG. 536. — Récepteur Morse.

vant les courants émis et servant à enregistrer les signaux correspondants sur la bande.

Le ruban de papier est enroulé sur une poulie, folle sur un axe horizontal planté à la partie supérieure d'une colonne qui surmonte l'appareil d'horlogerie ; l'extrémité libre de ce ruban s'engage d'abord dans une fourchette, puis se recourbe à angle droit pour passer sur la gorge d'une poulie à joues mobiles. A l'extrémité de gauche, la bande de papier s'engage entre deux cylindres d'entraînement, dont l'un inférieur est monté sur un axe qui reçoit

un mouvement de rotation du mécanisme d'horlogerie, l'autre supérieur, est monté à l'extrémité d'un bras pivoté sur un axe fixe et se trouve pressé sur le cylindre inférieur par un ressort qui vient buter contre la pointe d'une vis de réglage.

L'électro-aimant récepteur est placé à droite de l'appareil; les pôles constitués par les extrémités supérieures des noyaux, agissent sur une armature portée par un levier transversal qui pivote autour d'un axe d'oscillation, fixé sur la face antérieure de l'appareil; la course de ce levier est limitée par les deux vis réglables supérieure et inférieure, portées par la colonne placée en avant de l'appareil.

Sur le même axe d'oscillation et du côté gauche, est fixée une lame d'acier dont l'extrémité recourbée forme le couteau ou le style qui produira l'impression des signaux transmis.

A cet effet, une molette actionnée par la minuterie est placée un peu au-dessus de la bande de papier, entre la poulie-guide et les cylindres d'entraînement; sur cette molette appuie un tampon de drap imbibé d'encre grasse qui la lubrifie constamment.

Il est maintenant facile de comprendre le fonctionnement de l'appareil :

Le courant lancé par le poste transmetteur traverse les enroulements de l'électro qui sont reliés à la ligne par l'intermédiaire du manipulateur, dans le poste récepteur; l'armature qui, au repos, est écartée des pôles par le ressort antagoniste auquel elle est suspendue, est alors attirée par ces pôles, ce qui fait basculer de gauche à droite le système du levier d'armature et de la lame du couteau.

Celui-ci soulève donc la bande de papier et vient l'appuyer contre la tranche de la molette; il s'ensuit que celle-ci imprime soit une barre, soit un point, suivant que l'émission du courant est longue ou brève.

Le dessin montre, sur la gauche, la clef qui sert à remonter le ressort de la minuterie et à la base, au ras du socle, la manette qui permet d'enclancher ou de déclancher le mécanisme.

Les vis de butée du levier de l'armature, en avant de l'appareil, doivent être réglées de façon que celle-ci ne vienne pas en contact avec les pôles dont elle ne pourrait se détacher aisément, après l'interruption du courant. La vis du ressort de suspension de l'armature permet de régler la tension de celui-ci, en proportion de l'attraction de l'électro-aimant. Enfin la lame du couteau est également réglable et sa position doit être déterminée de manière à produire une pression convenable du papier contre la molette.

Le bruit produit par les chocs du levier d'armature contre la vis de butée inférieure, permet à un employé exercé de recevoir la dépêche *au son*; si donc on ne juge pas indispensable d'enregistrer le télégramme, on peut réduire le récepteur à l'électro-aimant et à son armature; ces appareils prennent alors le nom de *parleur*.

INSTALLATION D'UN POSTE TÉLÉGRAPHIQUE DE MORSE. — Un poste complet comporte, outre le manipulateur et le récepteur, divers appareils accessoires de contrôle et de sécurité. La figure 537 montre la disposition et les connexions des diverses parties de l'installation.

Le fil de ligne vient s'attacher en P *p* à un paratonnerre à pointes mobiles; puis le circuit traverse un second paratonnerre à fil fin fusible P *f*, un galvanomètre indicateur du passage du courant G et un commutateur à deux directions C. En ce point, le circuit se bifurque, une branche se dirige sur la sonnerie S et de là s'en va à la terre; l'autre se relie au manipulateur M, au récepteur R et finalement aussi à la terre. La pile du poste est reliée par le pôle négatif au sol et par le pôle positif à l'une des bornes du manipulateur. Enfin un rouet I sert à enrouler les bandes de papier ayant reçu l'impression télégraphique.

Les postes intermédiaires entre deux postes extrêmes peuvent être établis en série ou en dérivation sur la même ligne, c'est à dire que les bobines des électro-aimants sont embrochées aux différents postes sur le fil de ligne ou greffées sur ce même fil. Il est évident que dans ce système

des postes embrochés, tous les récepteurs fonctionnent en même temps, à l'exception de celui du poste transmetteur.

RELAIS. — Lorsque les lignes ont une grande longueur, le courant d'émission n'a pas une intensité suffisante à l'arrivée pour faire fonctionner le parleur ou pour opérer

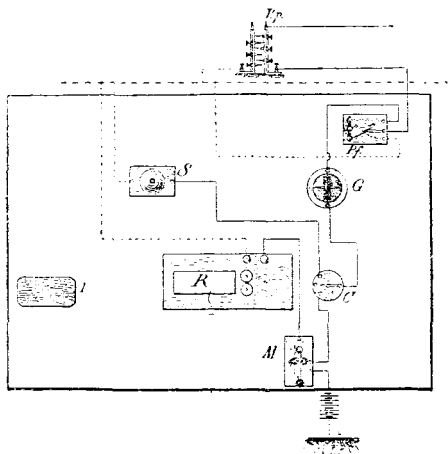


FIG. 537. — Installation d'un poste télégraphique Morse

l'impression des signaux sur les bandes, surtout lorsque l'impression se fait à sec, par simple gaufrage du papier, comme dans certains appareils.

On emploie alors des *relais* intermédiaires qui consistent simplement en électros sensibles dont la fonction se réduit à fermer le courant d'une pile de renfort locale, sur la seconde partie de la ligne aboutissant au récepteur; le relai substitue ainsi au courant d'émission, un courant issu d'une pile plus rapprochée, qui peut même être placée dans certains cas, dans le local et à côté de l'appareil récepteur.

Lorsqu'un poste intermédiaire, récepteur et transmetteur, doit servir en même temps de relai pour les postes extrêmes, cette fonction est remplie par les appareils Morse eux-mêmes qui sont alors disposés au nombre de

deux dans le poste en question et montés comme on dit en *translation*.

Sans entrer dans le détail de cette disposition, on conçoit aisément que le courant envoyé de l'un des postes extrêmes et traversant le poste de translation intermédiaire, pourra être reçu par l'électro de l'un des Morse dont l'armature attirée fermera le courant de l'une des piles locales sur le tronçon de ligne aboutissant au poste opposé; en définitive chacun des transmetteurs respectifs des postes extrêmes joue alternativement le rôle de relai pour le second poste.

On se sert aussi de *relais polarisés*, dans lesquels l'armature constituée par une palette, pivotée sur un axe soudé sur le pôle d'un aimant permanent, prend la même polarité et devient ainsi susceptible d'être attirée alternativement par l'un ou l'autre des pôles de l'électro-aimant, suivant le sens du courant qui traverse celui-ci.

273. — **Télégraphe imprimeur de Hughes.** — Le télégraphe Morse exige plusieurs émissions de courants pour former les signaux d'une lettre; en outre il comporte la traduction d'un alphabet spécial qui demande un personnel expérimenté; l'appareil Hughes remédie à ces inconvénients, car il transmet les caractères d'imprimerie ordinaires, et cela à raison d'une lettre par chaque émission de courant; les télégrammes sont ainsi lisibles pour tout le monde et la puissance de transmission de l'appareil est plus que doublée.

Le manipulateur et le récepteur du télégraphe Hughes, sont disposés sur une même table et fonctionnent mécaniquement, sous l'action d'un appareil d'horlogerie; l'électricité n'intervient par l'intermédiaire d'un électro-aimant que pour opérer le déclenchement du mouvement mécanique, à l'instant voulu.

Le manipulateur est un clavier dont les touches alternativement blanches et noires portent chacune une lettre ou un chiffre; à chaque touche correspond un levier dont l'extrémité T aboutit à une boîte cylindrique dite *boîte à goujons* (fig. 538). Ceux-ci sont constitués par de petites

lames en acier *S* qui s'appuient sur l'extrémité des leviers *T* par leur base et dont les têtes peuvent émerger au-dessus de la plaque *N* de la boîte, par des orifices ménagés

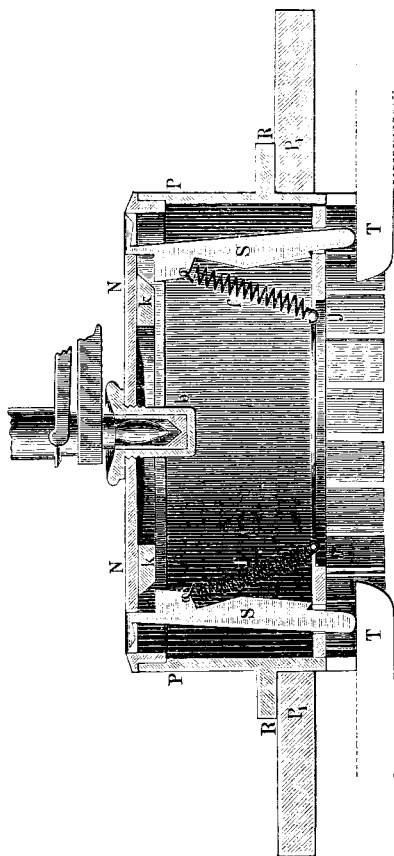


FIG. 538. — Coupe de la boîte à goujons.

sur son pourtour, lorsqu'on abaisse une touche faisant basculer le levier correspondant; des ressorts antagonistes ramènent les goujons à l'intérieur, quand la touche est abandonnée.

Le couvercle porte une crapaudine *b*, dans laquelle

tourne le pivot de l'axe W (fig. 539). Cet axe actionné par le mécanisme d'horlogerie, entraîne dans son mouvement

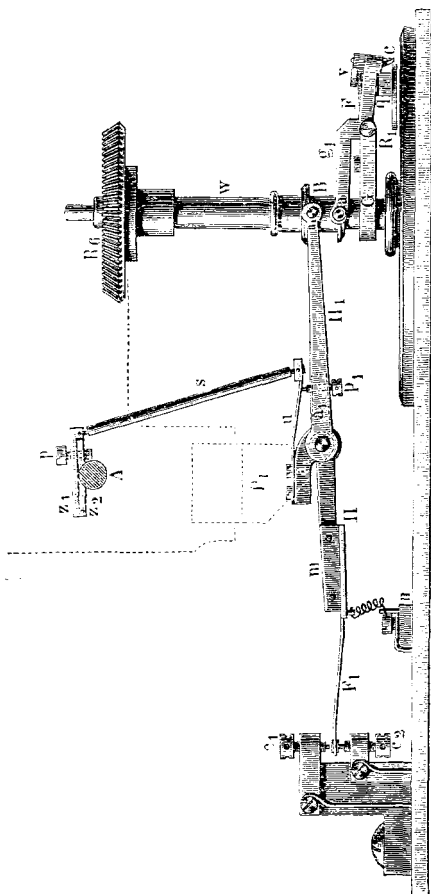


FIG. 539. — Chariot de l'appareil Hughes.

de rotation un équipage mobile F, qui peut osciller. d'autre part, sur les pointes des vis fixées aux extrémités des branches du support à fourche G. L'équipage porte en avant une pièce en saillie C et se prolonge en arrière par

un levier g_1 muni d'un galet qui s'engage dans le collier B. Celui-ci peut monter et descendre en glissant sur l'axe W, mais sans être entraîné dans le mouvement de rotation de ce dernier.

Le levier $II\ II_1$ mobile autour de l'axe a_1 appuie par son extrémité de droite contre le rebord supérieur du manchon; il se termine par un ressort F_1 isolé qui, au repos, est en contact avec la vis c_2 en communication avec la terre.

Lorsque pendant sa révolution, l'équipage rencontre un goujon saillant sur le couvercle N de la boîte, la pièce R_1 le maintient en place, tandis que la lèvres C, passant au-dessus, est soulevée et fait basculer l'équipage de droite à gauche; le manchon est abaissé et le levier solidaire HH_1 amène le ressort E_1 en contact avec la vis de butée supérieure C_1 qui est reliée à l'un des pôles de la pile.

Un courant est ainsi émis sur la ligne et va actionner le poste récepteur, mais en même temps, le levier S du poste transmetteur entraîné par le mouvement du balancier HH , agit par la connexion p sur l'axe A du levier d'échappement dont nous parlerons tout à l'heure. Cette tige S remplit par suite, dans le poste considéré, le même office que l'électro-aimant qui met en jeu le mécanisme imprimeur dans le poste récepteur: elle détermine donc l'impression en local de la dépêche transmise.

La figure 540 montre le profil de l'électro-aimant récepteur de Hughes. Les deux bobines B qui se projettent l'une sur l'autre, dans le dessin, sont montées sur les pôles d'un aimant permanent H en fer à cheval.

La palette de fer doux à deux branches d'équerre E_2 et E_1 est maintenue sur les pôles de l'électro, par le magnétisme de l'aimant permanent et en vertu de l'action différentielle de cette attraction et de l'effort mécanique du ressort e , sous la pression de la vis de réglage b_2 ; il suffira donc d'un courant relativement faible, développant une aimantation inverse, pour que la palette se détache brusquement des pièces polaires.

La palette soulevée développe un effort égal à la tension du ressort; elle vient buter contre le levier d'échappe-

ment G, mobile autour de l'axe A et, dès lors, le fonctionnement du récepteur devient exclusivement mécanique.

Le système imprimeur comporte deux axes, l'un P o I, qui est l'axe des *comes* et l'arbre U V qui porte le nom d'axe des *types*.

L'axe des *comes* comprend deux parties P o et o I, qui sont reliées par un système spécial d'embrayage repré-

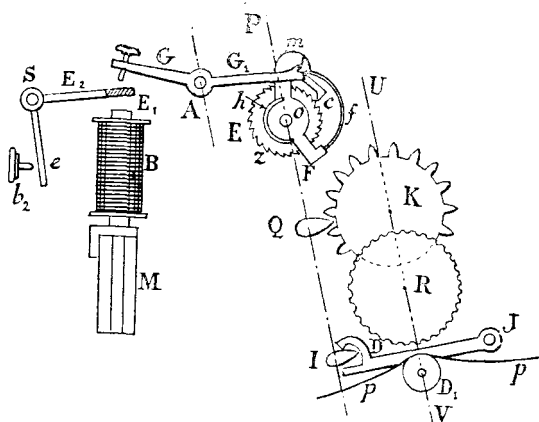


FIG. 540. — Système imprimeur de Hughes.

senté en E. Le demi-axe P o, qui porte le volant destiné à régulariser le mouvement du mécanisme, ainsi que le frein, est aussi pourvu de la roue dentée *z* calée sur son extrémité *o*.

L'axe des *comes* proprement dit o I, porte une pièce F à deux branches dont la supérieure présente une saillie *m*, qui au repos est arrêtée sur le cran du levier d'échappement; la branche inférieure est munie d'un ressort *f* qui tend à appliquer le cliquet C, porté par la même pièce, sur la roue à rochet E. Ce cliquet reste éloigné du rochet à l'état de repos, mais dès que le levier d'échappement bascule sous le choc de la palette S E₂, la pièce *m* tombe et entraîne le cliquet C qui vient en prise avec le rochet *z*.

L'axe des cames se trouve ainsi embrayé avec l'axe du volant qui étant animé d'un mouvement continu, l'entraîne dans sa rotation ; toutefois cet entraînement ne se produit que pendant un tour, car une came en forme de croissant h passe sur la branche G_1 et relève le levier d'échappement qui ramène la palette $S E_2$ au contact des pièces polaires de l'électro, de sorte que le système magnétique se trouve remis en place et prêt pour une nouvelle émission.

L'axe des types $U V$ porte la roue des types R , ainsi appelée parce qu'elle présente en relief, sur sa circonférence, les caractères typographiques enduits d'encre grasse. Cet axe est commandé par une roue d'angle engrenant avec la roue dentée R_6 de la figure 539, et les deux roues ayant même diamètre, le chariot et la roue des types font le même nombre de tours par seconde.

La roue des types doit être calée sur son axe, de telle sorte que la lettre correspondant à chaque goujon soulevé, se trouve à la partie inférieure de cette roue, au moment même où le chariot passe sur le goujon considéré. En même temps, la came I portée par l'axe $o I$, soulève le levier d'impression $D J$, mobile autour de l'axe J et pourvu d'une roue à dentures D_1 sur laquelle passe la bande de papier p ; celle-ci est donc amenée brusquement au contact de la lettre inférieure de la roue des types et la lettre s'imprime au vol pour ainsi dire, pendant le mouvement de rotation.

Nous avons vu que l'impression se fait à la fois au poste transmetteur et au poste récepteur ; les deux appareils doivent donc marcher parallèlement, ou comme on dit synchroniquement, de telle sorte qu'à chaque instant, la même lettre se trouve à la partie inférieure de chacune des roues des types, dans les deux postes.

Pour conserver ce synchronisme, une fois établi, les appareils sont munis de régulateurs très sensibles, qui maintiennent la vitesse du mouvement aussi constante que possible ; néanmoins il se produit des différences entre les rotations des deux roues des types. Pour rectifier ces

écarts, l'inventeur a combiné la disposition suivante. La roue des types au lieu d'être calée sur l'axe est montée sur un manchon, rendu solidaire d'une roue dentée K appelée *roue de correction* ; le système des deux roues est enclanché, au moment de l'échappement provoqué par l'électro, avec une sorte de plateau, monté sur l'axe, à frottement dur, et qui les entraîne dans son mouvement de rotation.

L'axe des cames porte d'autre part, une *came de correction* Q, qui s'engage entre deux dents de la roue K et qui détermine un mouvement d'avance ou de recul de cette roue, suivant que la dent rencontrée est en retard ou en avance sur le mouvement de la came ; comme les cames de chacun des postes sont mises en jeu par la même émission de courant, elles effectuent leur correction simultanément et corrigent les légers écarts qui pourraient se produire, à chaque tour, dans le synchronisme.

La figure 541 montre l'ensemble de l'installation d'un poste de Hughes. Le diagramme comporte, outre les appareils décrits, dans chaque poste un commutateur inverseur tel que 1, 2, 3, 4, un interrupteur M et un ressort *d* sur lequel presse au repos la came de correction.

Les piles des deux postes sont reliées à la terre par les pôles de noms contraires, afin que le courant circule à travers les électros dans le sens voulu.

Lorsque le poste A transmet, le goujon soulevé fait basculer le levier *ef* et le ressort *f* vient en contact avec la vis *a* ; le courant de la pile P est alors fermé sur la ligne par P *f* c L ; le point *c* est le même que le plot *n* de la figure 539. Au même instant, la tige *g* fait basculer le levier d'échappement *l* ; le mécanisme imprimeur fonctionne et la lettre transmise est imprimée au local.

Le courant lancé par l'autre poste arrive à la borne et suit le parcours *c. f, b, d. 4, 1*, traverse l'enroulement de l'électro et gagne la terre T par les bornes 3 et 2 du commutateur. Au passage du courant, la palette se sépare des pôles et fait basculer le levier *l* qui détermine la mise en marche du système mécanique ; au même instant la

came abandonne le ressort *d* et le courant ne traverse plus les bobines.

L'appareil de Hughes, que nous avons exposé d'une manière détaillée, parce qu'il peut être considéré comme le prototype des télégraphes perfectionnés, à transmissions

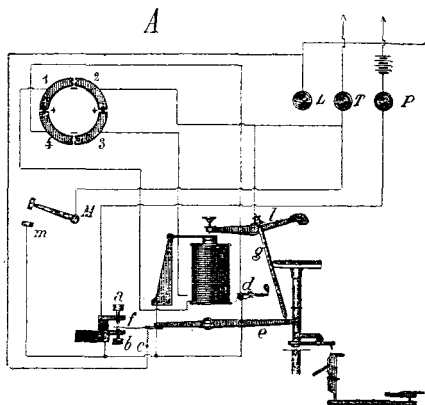


FIG. 541. — Disposition générale d'un poste de Hughes.

rapides et à caractères imprimés, présente néanmoins l'inconvénient d'être d'une construction très coûteuse et très compliquée et d'exiger un long apprentissage de la part du personnel.

274. Télégraphe Wheatstone. — L'inventeur du système s'est proposé de substituer à la transmission manuelle, la transmission mécanique des signaux Morse. A cet effet, les télégrammes sont reproduits au préalable sous forme de trous perforés dans des bandes de papier et combinés de manière à correspondre aux signaux de l'alphabet Morse (fig. 542), de même que

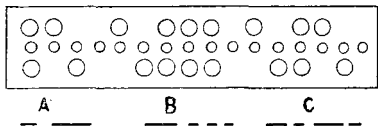


FIG. 542. — Bande perforée du télégraphe Wheatstone.

les cartons perforés du métier à la Jacquard représentent les différents points d'armures des tissus.

Comme on le voit, la bande comporte trois rangées de trous, celle du milieu de diamètre plus petit, sert à l'entraînement du papier au moyen d'une petite roue étoilée; les rangées extrêmes de plus gros diamètre forment les signaux: le point est constitué par deux trous disposés sur une ligne normale aux rangées, le trait par deux trous en

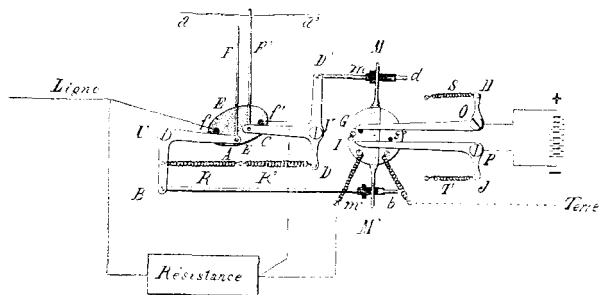


FIG. 543. — Mécanisme du transmetteur Wheatstone.

ligne oblique et les intervalles entre les mots par un trou isolé de la rangée centrale.

Ces bandes perforées servent à lancer le courant sur la ligne, alternativement dans un sens et dans l'autre, à l'aide du transmetteur mécanique représenté par la figure 543.

Un balancier en ébonite E muni de deux goupilles métalliques f, f' , reçoit un mouvement de va et vient continu du mécanisme d'horlogerie qui fait également avancer la bande de papier.

Ces goupilles sont généralement en contact avec deux leviers coudés, oscillant autour des axes U et V et reliés tant mécaniquement qu'électriquement par les ressorts R, R'.

Le système comporte un second plateau G, divisé en deux demi-cercles, isolés par la lame M M', celle-ci est reliée aux leviers coudés par les deux bielles $m d m' b$.

On voit facilement sur la figure que, tant que le mou-

vement des leviers U et V n'est gêné par aucun obstacle, ces leviers transmettent intégralement au plateau G le mouvement d'oscillation du balancier E. Les goupilles g et g' des demi-plateaux, peuvent ainsi se mettre alternativement en communication avec le pôle positif ou le négatif de la pile, par l'intermédiaire des leviers O H, P J. Aux extrémités des bras A et C des leviers coudés sont articulées deux aiguilles F, F' placées directement sous les rangées extrêmes de trous.

Les connexions établies montrent que le courant venant du pôle positif, trouve deux chemins pour passer sur la ligne, soit un premier chemin direct par g , m' , f , C, D, R', R, A et f et un second par une résistance dite de *compensation*.

Quand F et F' dans leur mouvement ascensionnel trouvent passage à travers un trou, un courant positif ou négatif est lancé dans la ligne par la voie directe; mais quand l'une ou l'autre des aiguilles rencontre les parties pleines du papier, elle quitte la goupille correspondante et le circuit direct se trouve interrompu en f ou en f' ; le courant doit alors passer par la résistance, et il arrive affaibli sur la ligne,

Le récepteur est un Morse pourvu d'un électro polarisé (fig. 544). Celui-ci est constitué par un aimant permanent recourbé E; à travers les extrémités polaires échan-crées passe un axe vertical H, portant deux palettes F et G, pouvant osciller entre les plaques polaires supérieures et inférieures de l'électro A B. Suivant que le courant émis est positif ou négatif, c'est-à-dire traverse les bobines dans un sens ou dans l'autre, les palettes polarisées sont alternativement entraînées vers A ou vers B.

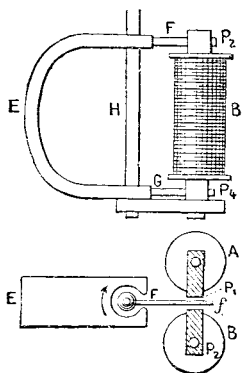


FIG. 544. — Electro-récepteur de Wheatstone.

Ce mouvement alternatif est utilisé pour déterminer le mouvement de rapprochement ou d'éloignement de la molette imbibée d'encre, de la bande de papier qui doit recevoir l'impression des signaux.

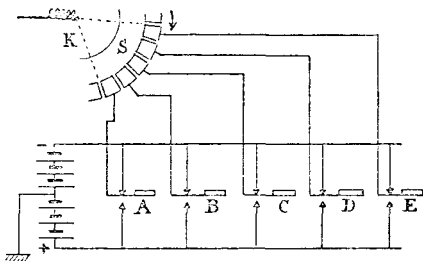
Supposons que le signal composé de deux trous obliques se présente au-dessus des aiguilles ; l'une d'elles traversant le premier orifice déterminera un courant positif qui amènera la molette du récepteur en communication avec la bande ; la seconde aiguille ne rencontrera pas de suite la perforation suivante du couple oblique, mais un plein du papier qui l'arrêtera, d'où rupture du contact de la goupille correspondante. Le courant serait dès lors interrompu, s'il ne trouvait pas une issue par la résistance qui lui permet de se prolonger, tout en s'atténuant. Un moment après, la seconde perforation se place au-dessus de la dernière aiguille qui la traverse et fait émettre un courant négatif ; celui-ci décharge d'abord la ligne faiblement chargée par le courant positif atténué, ce qui retarde suffisamment le moment où la molette se détache de la bande, de manière à parfaire le trait dans toute sa longueur.

Le point Morse au contraire s'obtient par les couples de trous superposés qui permettent aux deux aiguilles d'effectuer leurs mouvements ascensionnels à des intervalles très-rapprochés et par suite d'émettre successivement des courants positif et négatif se succédant immédiatement.

Ces courants de compensation ont donc pour résultat de donner toute la netteté désirable aux signaux, en évitant qu'ils ne chevauchent les uns sur les autres, par suite des retards apportés dans la transmission des courants, par la capacité de la ligne.

275. Télégraphe multiple de Baudot — Comme dans le télégraphe de Hughes, la transmission et la réception des signaux sont basés sur le mouvement synchronique de deux chariots munis de frotteurs qui distribuent les courants successifs sur la ligne, au poste envoyeur et recueillent ces courants dans leur ordre d'émission, au poste récepteur.

Le disque sur lequel glissent les frotteurs est divisé en autant de secteurs que l'appareil doit transmettre de dépêches simultanées ou plutôt successives et chacun de ces secteurs comporte lui même diverses rangées concentriques de contacts, dont les unes notamment sont reliées aux cinq touches d'un clavier dit manipulateur, pour la transmission et d'autres sont en relation avec les appareils récepteurs : un commutateur communiquant avec la ligne permet de mettre l'appareil dans la position de transmission ou de réception.



Comme le montre la figure 545, les touches A B C D E du manipulateur sont reliées respectivement à chacun des contacts de la rangée d'émission S qui est elle-même mise en communication avec la ligne K, par les frotteurs du chariot. Au repos, ces touches appuient sur des butoirs, en communication avec le pôle négatif de l'une des demi-piles du poste, mais quand elles sont abaissées, elles viennent en contact avec les butoirs inférieurs, reliés au pôle positif de la seconde batterie.

On voit donc que les bobines frottant sur les deux contacts S enverront successivement sur la ligne, des courants positifs ou négatifs, suivant la combinaison de touches levées ou abaissées, réalisée par l'opérateur. Ainsi la lettre a par exemple, comportera l'émission d'un courant positif et de quatre négatifs, elle s'indiquera par le symbole (+ — — — —) et sera transmise en abaissant seulement la première touche A du manipulateur.

Ces courants sont recueillis au poste récepteur par le distributeur disposé en réception et qui, tournant syn-

Ces courants sont recueillis au poste récepteur par le distributeur disposé en réception et qui, tournant syn-

chroniquement, envoie les courants successifs, dans l'ordre de leur émission, dans cinq électro-aimants polarisés, reliés respectivement aux contacts de la rangée de réception S (fig. 546).

Les relais récepteurs reproduisent donc, en s'inclinant d'un côté ou de l'autre, la combinaison émise du poste transmetteur. Mais le télégramme doit être imprimé sur une bande en caractères typographiques, comme dans l'appareil de Hughes.

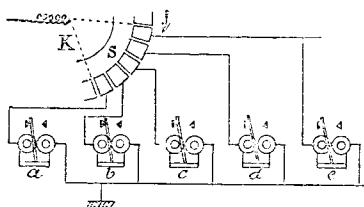


FIG. 546. — Schéma des distributeurs récepteurs de Baudot.

La description de l'appareil très ingénieux qui réalise cet effet, dépasserait les bornes imposées à cet ouvrage : nous dirons seulement que la combinaison des relais, est répétée par des électro-aimants dont les armatures agissent respectivement sur cinq taquets qui sont ainsi poussés au-dessus de la jante garnie de reliefs et de creux d'une roue montée sur le même axe que la roue des types. Tant qu'un seul des taquets se trouve sur l'une des saillies de la roue précitée, tout le système reste soulevé, mais dès que les reliefs et les creux se présentent sous les pieds des taquets dans l'ordre qui correspond à la lettre transmise, tous les pieds tombent dans des creux et le système entraîne dans sa chute un levier qui agit sur l'appareil imprimeur, en appliquant la bande de papier contre la lettre voulue ; celle-ci correspond en effet aux creux et reliefs dont la combinaison a amené la chute du levier imprimeur.

Tout ce que nous avons exposé pour un secteur se passe de même pour les autres. Dans l'appareil quadruple destiné à transmettre successivement quatre dépêches sur le même fil, chacun des employés agit sur le manipulateur dont il dispose, en effectuant une combinaison des touches du clavier pour chaque révolution des frotteurs ; quatre

signaux appartenant à quatre télégrammes différents sont donc lancés à chaque tour et la ligne se trouve ainsi occupée tout le temps, sans interruption.

276. Télégraphie simultanée. — SYSTÈME DUPLEX DIFFÉRENTIEL. — Le système Duplex a pour but de permettre aux deux postes extrêmes de télégraphier simultanément par le même fil unique.

Le système différentiel (fig. 547) emploie dans chaque

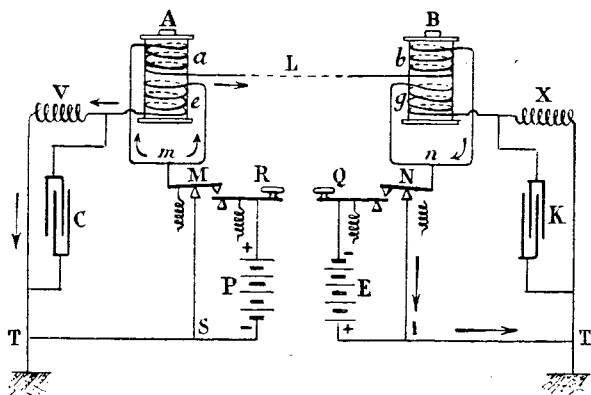


FIG. 547. — Duplex différentiel.

poste, des bobines réceptrices A et B recouvertes chacune de deux bobines différentielles qui, pour des courants excitateurs égaux, déterminent des aimantations égales et inverses des noyaux, qui s'annulent par conséquent.

Les manipulateurs Morse employés, doivent être disposés de telle sorte que le circuit ne soit pas interrompu pendant la manœuvre, lorsque le levier quitte le buttoir de repos, puisque chacun des postes doit être toujours prêt à recevoir une dépêche, même au moment où il en expédie une de son côté. Le schéma représente des manipulateurs doubles tels que R M qui remplissent cette condition.

On remarquera d'autre part que les piles des deux postes son montées en sens inverse sur la ligne, l'une

étant raccordée à celle-ci par son pôle positif, l'autre par son pôle négatif. Enfin le système comporte des résistances réglables V et X , et des condensateurs en dérivation C et K .

Si l'employé du poste de gauche appuie sur le manipulateur R , le levier M est soulevé et rompt la communication avec la terre; le courant de la pile P se bifurque en m et se divise en deux parties égales, dans les deux bobines de A , le rhéostat V étant ajusté de telle sorte que sa résistance soit égale à celle de la ligne et de la bobine b ; dans ces conditions, l'électro A est inactif et n'agit pas sur son armature. L'un des courants se rend à la terre par V , l'autre, par la ligne, au poste de droite. Celui-ci traverse la bobine b et se rend directement à la terre par le circuit n N I T . On remarquera qu'il ne passe pas de courant par la bobine g , le courant dérivé n g X T présentant une résistance considérable vis-à-vis du circuit direct n N I T .

Supposons maintenant que les deux postes transmettent simultanément, le premier un point vers B , le second une barre vers A ; on remarquera alors que les circuits des résistances V et X se trouvent alimentés chacun, avec leurs bobines respectives e g , par la pile correspondante, tandis que les bobines a et b sont en circuit avec les deux piles P et E en série, qui ajoutent ainsi leurs forces électro-motrices.

Dans ces conditions, les électros A et B attireront leur armature, en vertu de l'action prépondérante des bobines a et b ; mais dès que le manipulateur R sera abandonné après le temps nécessaire pour l'émission d'un point, le levier Q continuant seul à transmettre, l'armature de B ne sera plus attirée et l'impression se réduira à un point.

D'autre part, le manipulateur R étant au repos, la bobine A continue à attirer son armature sous l'action du courant lancé par Q et le poste A imprime la barre transmise.

Les condensateurs C et K ont pour but de donner aux circuits dérivés à la terre la même capacité que celle de la ligne, afin que le courant de charge sur celle-ci soit équilibré par un courant équivalent dans la branche différentielle.

DUPLEX PAR LA METHODE DU PONT DE WHEATSTONE. -- Le principe du pont de Wheatstone sur lequel repose le système Duplex dont il s'agit est représenté par le schéma de la figure 548. Un circuit fermé, composé de quatre résistances A B C D, que l'on peut se représenter disposées suivant les quatre côtés d'un losange, est relié aux pôles d'une pile P par les extrémités M N de l'une de ses diagonales, tandis qu'un galvanomètre G est intercalé dans la seconde diagonale.

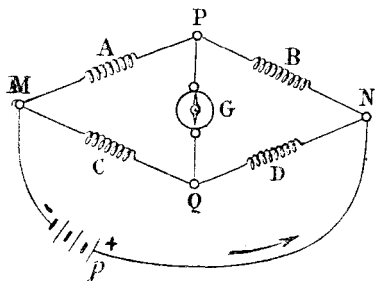


FIG. 548. — Principe du pont de Wheatstone.

Le potentiel du courant de N en M subit la même chute, en passant par P ou par Q; comme les chutes partielles sont proportionnelles aux résistances, il est évident que si le rapport des résistances B et A est le même que celui des résistances D et C, la chute de N à P sera la même que celle de N à Q et les potentiels des points P et Q seront finalement les mêmes; dans ce cas, le galvanomètre G n'accusera le passage d'aucun courant.

Dans le système de transmission en duplex (fig. 549), les branches du pont de Wheatstone sont constituées d'un côté, par deux rhéostats A et C, de l'autre par la ligne, y compris les installations de l'autre poste de résistance L et par le rhéostat D; les conditions précédentes seront réalisées, en ajustant les résistances A, C et D des rhéostats, de telle sorte que l'on ait :

$$\frac{A}{L} = \frac{C}{D}$$

et de même pour le second poste de droite.

On établit en outre les récepteurs S et s sur les dia-

gonales PQ et pq ; la pile s'intercale dans la seconde diagonale qui est ici constituée par MRN , la terre et le point n .

Quand on abaisse le manipulateur double R , le courant de la pile ne peut agir sur le récepteur du même poste, puisque la chute de potentiel est la même sur les branches A et C et qu'il n'y a pas de différence de tension entre les points P et Q ; mais un courant passe dans la

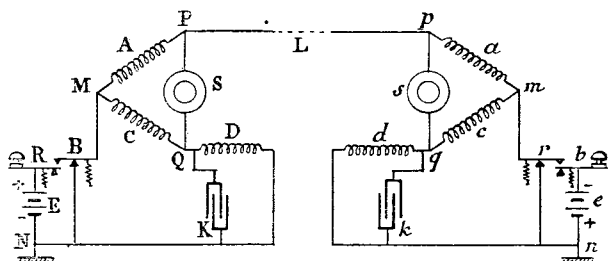


FIG. 549. — Duplex par la méthode du pont de Wheatstone.

branche qui comprend les appareils de l'autre poste et notamment dans le récepteur s qu'il actionne. De même, lorsque le poste de droite agit sur le manipulateur Q , il ne produit aucun effet sur le récepteur s et ne met en jeu que le récepteur S du poste avec lequel il communique.

Cette disposition réalise donc les mêmes conditions que le système différentiel et permet l'envoi simultané de dépêches, des deux postes extrêmes. En effet, quand les deux manipulateurs sont abaissés en même temps, et si nous supposons comme précédemment que les connexions des pôles des piles sont interverties dans les deux postes, ces piles étant mises en série sur le circuit général, ajouteront leur action pour faire fonctionner les relais récepteurs simultanément. Dès que l'un des manipulateurs reviendra à sa position de repos, le second poste continuera à transmettre isolément dans les conditions inhérentes au système du pont de Wheatstone.

DIPLEX EDISON. — Au lieu d'envoyer des dépêches de chacun des postes extrêmes, on peut se proposer de lancer simultanément deux dépêches d'un poste quelconque, dans la même direction. La combinaison imaginée à cet effet par Edison et désignée sous le nom de système *Diplex* est représentée schématiquement dans la figure 550.

Le système comprend, à l'un des postes, deux manipulateurs dont le premier R est pourvu de deux talons *a* et *b*

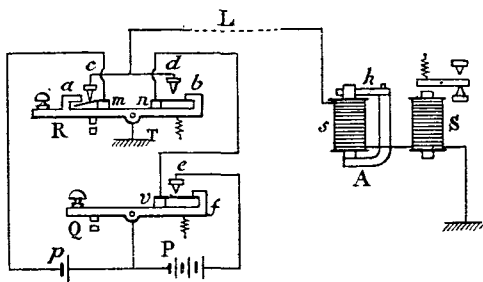


FIG. 550. — Diplex Edison.

et de deux ressorts isolés *m* et *n* ; le second Q présente seulement un talon *f* et un ressort *v*.

En face de ces divers ressorts sont placés des butoirs à vis *c*, *d*, *e* ; le premier *c* est en contact avec le ressort *m* correspondant, pour la position de repos ; les deux autres vis ne viennent en contact avec leurs ressorts respectifs que lorsque leurs commutateurs sont abaissés.

Dans l'autre poste se trouvent deux relais *s* et *S* ; le premier comporte un électro-aimant dont l'armature *h*, pivotant à l'extrémité d'un aimant permanent *A*, est polarisée ; cette armature n'est donc actionnée que par des courants d'un sens déterminé, positifs par exemple, et l'excitation de l'électro est combinée de telle sorte que le déplacement soit obtenu pour une faible intensité de ces courants. L'électro-aimant *S* est établi au contraire de manière à n'obéir qu'à des courants relativement intenses, mais de sens quelconque.

D'après l'exposé ci-dessus, si on abaisse le manipulateur R, le pôle négatif de la petite pile p est relié à la terre par m, a , et l'axe du levier en T ; le pôle positif communique avec la ligne par l'axe du commutateur Q, v, n, d, L . Le relai polarisé s fonctionne donc sous l'action du faible courant positif qui le traverse, et le relai S non polarisé reste au repos.

Quand on abaisse le manipulateur Q, le pôle négatif de p est porté sur la ligne par m, c, L , tandis que le pôle positif de la grande pile P, qui est en série avec p , est relié à la terre par f, v, n, b, T . La ligne est alors traversée par un courant négatif intense qui actionne seulement le relai S.

Enfin, si les deux manipulateurs sont actionnés en même temps, le pôle négatif de p est relié au sol par le plot m et le pôle positif de P à la ligne qui reçoit ainsi un courant positif de grande intensité ; les deux relais entrent donc simultanément en jeu.

Ainsi les choses sont disposées de sorte que les signaux envoyés séparément par chacun des manipulateurs, soient enregistrés respectivement par chacun des relais du poste récepteur, et que les deux relais obéissent également au courant commun envoyé par les deux manipulateurs fonctionnant simultanément.

277. Télégraphie sous-marine. — SIPHON ENREGISTREUR. — Les phénomènes de charge et de décharge dus à la grande capacité des câbles sous-marins de plusieurs centaines de kilomètres de longueur, ne permettent pas d'utiliser les appareils de réception ordinaires. Par suite du retard à la transmission du courant et de la confusion des signaux qui en résulterait, on est obligé d'employer des courants de faible intensité qui n'auraient pas l'énergie nécessaire pour actionner les récepteurs à électro-courants.

On a donc été amené à employer des organes récepteurs très sensibles, tels que le galvanomètre à miroir de Thomson dans lequel le courant agit sur une aiguille aimantée, mobile au centre d'une bobine circulaire traversée par l'émission électrique. L'aimant est appliqué sur la face

postérieure d'un petit miroir suspendu par un fil de cocon. Pour soustraire cet aimant à l'action du magnétisme terrestre, l'appareil est surmonté d'un aimant directeur recourbé N S (fig. 551).

D'après le système de signaux admis conventionnellement, le point Morse est représenté par une déviation à gauche du système mobile et le trait par une déviation à droite.

Ces déviations très faibles sont amplifiées et rendues

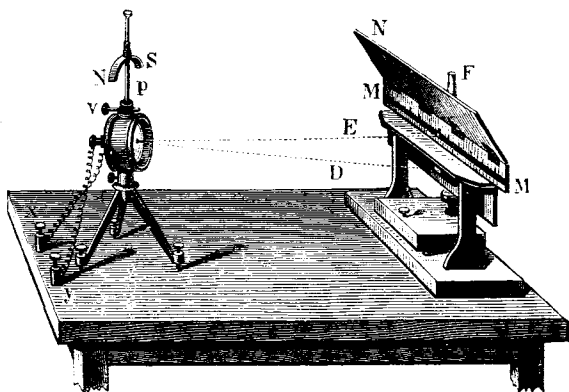


FIG. 551. — Galvanomètre à miroir.

apparentes par le faisceau lumineux E que la lampe F placée derrière une règle transparente graduée M, projette à travers une fente appropriée, sur le miroir du galvanomètre ; le rayon réfléchi D se projette vers l'une ou l'autre extrémité de l'échelle, suivant l'impulsion donnée au miroir par une émission de courant positive ou négative.

Ces déviations sont assez difficiles à suivre et à traduire, elles présentent d'ailleurs l'inconvénient inhérent à tous les signaux fugitifs : c'est pourquoi William Thomson imagina une disposition destinée à enregistrer les oscillations du galvanomètre.

L'appareil enregistreur (fig. 552) porte le nom de

Siphon recorder; il consiste en un petit siphon de verre *s*, dont la courte branche plonge dans un godet d'encre *c* et la longue branche effilée est placée au-dessus et à très faible distance de la bande de papier, entraînée mécaniquement, d'un mouvement continu. L'encre est constamment électrisée par une sorte de condensateur qui constitue un

rechargeur électrostatique, dont une des armatures est à la terre et l'autre en communication avec le godet; dans ces conditions, l'encre électrisée est projetée en gouttelettes sur la bande de papier, de manière à former des traits pointillés.

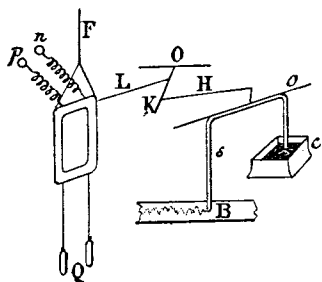


FIG. 552. — Siphon enregistreur.

L'organe récepteur est un petit cadre galvanométrique très léger suspendu par un fil sans torsion *F*, entre les deux pôles placés en regard de deux électroaimants puissants. Ce cadre est relié au siphon par une suite de balanciers et de bielles *L*, *O*, *K*, *H* qui transmettent à l'appareil enregistreur les oscillations, dans un sens et dans l'autre, du cadre galvanométrique.

Quand le cadre est au repos, le siphon trace une ligne droite dans l'axe de la bande de papier; mais toute déviation dans un sens entraîne un crochet encre dans ce sens et inversement. C'est la succession de ces écarts, de part et d'autre de la ligne médiane, qui figurent par convention, les traits ou les points de l'alphabet Morse.

278. Télégraphie sans fil. — TÉLÉGRAPHE MARCONI. — L'invention récente de Marconi repose sur l'action *cohérente* ou de *cohésion* que les ondes électriques exercent sur de petites masses métalliques très divisées, telles que les limailles de nickel et d'argent. Ces limailles insérées dans un circuit conducteur, présentent en effet une très grande résistance au passage du courant, mais si elles

viennent à être frappées par les ondulations électriques de Hertz, le système, désigné sous le nom de *cohéreur*, devient *radioconducteur*, et sa résistance diminue considérablement.

Le transmetteur de Marconi est donc constitué par un *vibrateur* ou *radiateur* destiné à engendrer les ondes électriques; il se compose (fig. 553) d'une bobine d'induction B, dont le circuit primaire est muni d'un trembleur, comme une bobine de Ruhmkorff, et d'une clef Morse M.

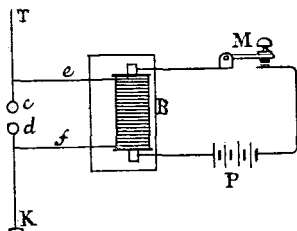


Fig. 553. — Transmetteur, radiateur de Marconi.

Le circuit secondaire se termine par deux sphères métalliques dont l'une c communique avec la terre, l'autre d avec un fil dressé le long d'un poteau vertical K. La terre et le fil remplacent les deux plaques du condensateur de l'oscillateur de Hertz; plus la distance de transmission est grande, plus la hauteur du fil doit être élevée afin de permettre aux ondes de franchir les obstacles provenant des dénivellations du sol.

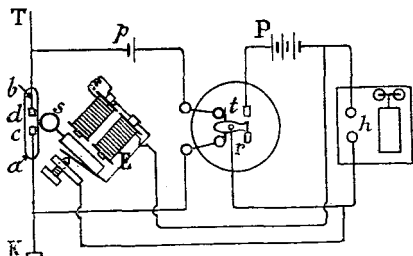


Fig. 554. — Récepteur, cohéreur de Marconi.

Le *cohéreur* placé au poste de réception (fig. 554) consiste en un petit tube de verre a b, pourvu de deux électrodes c d entre les extrémités desquelles se trouve une certaine quantité de limailles radioconductrices. Le tube récepteur des ondes électriques est disposé comme le

vibrateur, la tige *b* étant à la terre et la tige *c* en relation avec un fil dressé verticalement.

Sur les bornes du cohéreur est dérivé le circuit d'une pile *p* et d'un relais *r*. Tant que le récepteur n'est frappé par aucune onde électrique, il ne passe aucun courant dans le circuit du relais, mais quand les ondes viennent cohérer les limailles, la diminution de résistance permet au courant de la pile de s'établir et le relais est actionné. L'armature *t* de celui-ci ferme alors le circuit local d'un récepteur Morse qui enregistre le signal. Le courant doit s'interrompre aussitôt : à cet effet, un trembleur *s*, dont les bobines sont en dérivation sur le récepteur Morse, vient frapper le radioconducteur à chaque émission, afin de décoherer la limaille.

M. Marconi est arrivé à établir ainsi des communications électriques à travers des bras de mer et entre les phares et les navires. On voit quels services un pareil système est susceptible de rendre soit dans la navigation, soit pour les communications entre les divers corps d'armée, en temps de guerre.

Téléphonie.

279. Principe et classification. — La téléphonie a pour but de permettre la transmission de la parole, au moyen d'appareils propres à transformer les ondes sonores en courants ondulatoires et réciproquement ; la première transformation a lieu dans l'appareil transmetteur, l'autre dans l'appareil récepteur.

Les divers systèmes, très nombreux aujourd'hui, peuvent se diviser en deux grandes classes : ceux qui sont fondés sur l'induction des champs magnétiques variables et qui comportent l'emploi de *téléphones magnétiques*, d'une part ; ceux qui mettent en œuvre le courant des piles et utilisent les appareils microphoniques ou *microphones*, d'autre part.

Nous rappellerons que les ondes sonores qui correspon-

dent à l'émission de la parole, sont la résultante d'ondes complexes produisant, les unes, le son fondamental qui donne la hauteur variable avec le nombre d'ondulations par seconde ; les autres, des sons harmoniques de plus faible amplitude qui dépendent de la conformation de la bouche, différente suivant la consonne ou la voyelle émises et qui, par leur superposition au son fondamental, produisent les modulations de la parole.

Quand on parle devant un diaphragme élastique, les vibrations de l'air provoquées par la parole, se transmettent au diaphragme qui vibre synchroniquement. Ces vibrations peuvent d'ailleurs être facilement enregistrées à l'aide d'un style de platine, porté par le diaphragme et qui vient imprimer, dans la couche de cire superficielle d'un cylindre tournant à proximité, les ondulations de l'air

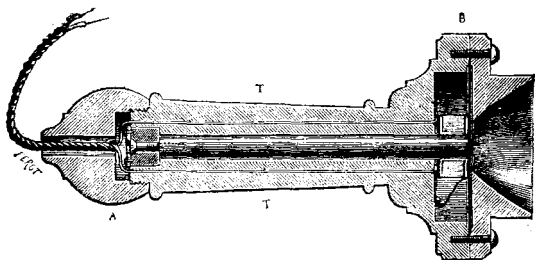


FIG. 555. — Coupe longitudinale du téléphone Bell.

exhalé par les poumons. Si l'on fait repasser le style sur le fond ondulé des sillons ainsi creusés, le diaphragme, conduit cette fois par le style, renvoie les mêmes ondulations et vibrera de la même manière, en reproduisant la parole incrustée pour ainsi dire dans la cire : c'est là le principe du *phonographe* d'Edison.

280. **Téléphone électro-magnétique.** — Le téléphone a été découvert en 1876 par Graham Bell. La figure 555 représente la disposition de cet appareil. Un barreau cylindrique aimanté est placé dans l'axe d'un étui en bois ou en

ébonite T, qui présente à l'une de ses extrémité une partie élargie B, sur laquelle vient se visser un couvercle à ouverture évasée D.

Le barreau aimanté est fixé par une de ses extrémités sur le fond de l'étui et porte à sa partie antérieure libre une bobine en bois recouverte d'un fil de cuivre de 0,8 millimètre de diamètre ; les extrémités du fil de la bobine traversent toute la longueur de l'étui, pour venir se rattacher au cordon à double fil isolé *f* qui sort par l'axe du bouchon fileté A.

Entre les bords rainés de la chambre B C et le couvercle D, se trouve pincée une plaque vibrante, très rapprochée de l'extrémité de l'aimant, mais disposée toutefois de manière à ne pas venir en contact, pendant ses vibrations, ni avec l'aimant, ni avec le fond du couvercle.

Lorsque la plaque entre en vibration, sous l'action de la parole, elle oscille en se rapprochant et s'éloignant du pôle de l'aimant, et ces ondulations varient de fréquence et d'amplitude suivant l'émission de la parole.

Or la plaque fait partie du circuit magnétique et les modifications de réluctance qui résultent des mouvements de la dite, déterminent une variation du flux de force, qui développe dans la bobine des courants d'induction dont les ondes sont en parfaite concordance de durée et d'intensité, avec les ondes sonores excitatrices.

Ces ondes sont reçues dans la bobine d'un téléphone identique au premier ; elles produisent à leur tour un flux ondulatoire qui fait varier l'aimantation du système magnétique. Les ébranlements moléculaires qui en résultent dans la masse des pièces de fer aimantées, et les vibrations transversales produites dans la plaque par les variations successives de la force attractive du noyau, communiquent à l'air des mouvements ondulatoires de même fréquence, reproduisant les mêmes sons que ceux émis par le téléphone transmetteur.

On remarquera que le noyau du téléphone ne doit pas être en fer doux, mais être polarisé, c'est-à-dire présenter un certain magnétisme rémanent d'excitation.

Les perfectionnements que comportent les divers systèmes imaginés à la suite du téléphone Bell consistent principalement dans l'emploi d'électro-aimants à deux branches, dont les pôles nord et sud sont ramenés vers le centre de la plaque vibrante, afin de concentrer sur ce point le flux magnétique.

C'est ainsi qu'est établi le téléphone Ader (fig. 556). Il est formé par un aimant en anneau qui sert de poignée à l'instrument. Les extrémités polaires sont surmontées de deux pièces d'équerre en fer constituant les noyaux des bobines inductrices B ; celles-ci sont enfermées dans une chambre sonore M, recouverte par la plaque vibrante. Au-dessus, est inscrusté dans l'épaisseur du couvercle C un anneau de fer doux X qui joue le rôle d'armature et concentre les lignes de force vers le centre de la plaque. Les extrémités des fils de bobines aboutissent à deux bornes fixées sous la boîte sonore et reliées par des fils souples, avec les autres appareils de transmission.

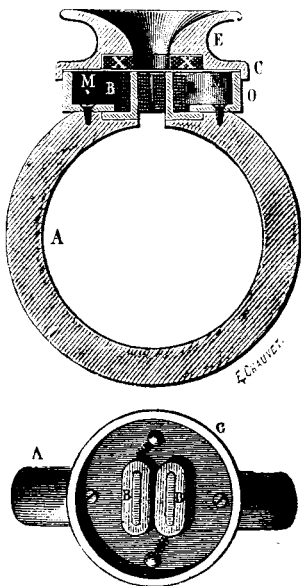


FIG. 556. — Coupe et plan du téléphone Ader.

281. **Appareils microphoniques.** — Dans le système précédent, l'agent de transmission n'est autre que le courant d'induction produit par le système magnétique dont la plaque vibrante joue le même rôle que l'armature mobile, dans les alternateurs à réluctance variable ou à fer tournant. Ces mouvements vibratoires de minime amplitude ne peuvent engendrer que des courants d'intensité et de force électro-motrice très faibles.

Quand on veut correspondre à de grandes distances, il faut avoir recours au second système, dans lequel l'énergie électrique est empruntée au courant d'une pile. La disposition imaginée par Hughes, pour moduler l'intensité du courant suivant les ondulations sonores, constitue l'appareil microphonique (fig. 557).

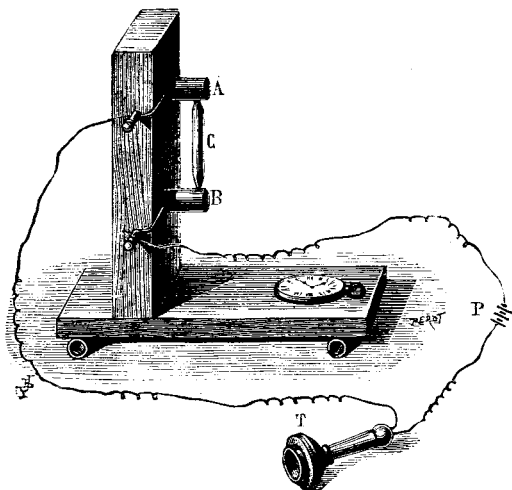


FIG. 557. — Microphone de Hughes.

Il est constitué, sous sa forme la plus simple, par trois pièces de charbon, dont deux A et B fixées dans une planchette en bois verticale, servent de support à la troisième C. Celle-ci est formée d'un cylindre de charbon dont les extrémités taillées en pointe s'engagent librement dans des trous percés dans les autres pièces. Si l'on parle près de la planchette, les vibrations de celle-ci se communiquent au système microphonique dont elles font varier les contacts et par suite la résistance. Ces variations de résistance dans le circuit produisent des variations parallèles dans l'intensité du courant qui devient ondulatoire et propre à reproduire la parole, dans le récepteur électro-magnétique T.

L'appareil ainsi disposé est d'une très grande sensibilité, et le tic-tac d'une montre posée sur le support de la planchette ou le léger frottement des barbes d'une plume se répercutent très distinctement dans le téléphone.

Comme les variations de résistance du circuit ne se produisent que dans l'appareil microphonique, on conçoit que ces variations seront d'autant moins sensibles, sur l'ensemble du circuit, que celui-ci sera plus long et présentera par suite une résistance plus considérable. Ce procédé simple n'est donc pas susceptible de transmettre la parole à grande distance. Pour tourner cette difficulté, Edison a imaginé de séparer le circuit à résistance variable du microphone, du circuit de transmission au récepteur.

On forme ainsi deux circuits distincts (fig. 558), dont l'un contient le microphone M , la pile P et le circuit primaire à gros fil d'une bobine d'induction à double enroulement g ; le second enroulement à fil fin f est intercalé dans le circuit de la ligne de transmission L qui contient également le téléphone récepteur r . Ce dernier circuit peut être fermé par la terre ou par le fil de retour marqué en pointillé.

Grâce à cette disposition, les variations de résistance du circuit microphonique conservent toujours la même influence sur l'intensité du courant de la pile, quelle que soit la résistance du circuit extérieur. Le courant primaire variable développe par induction, dans la bobine secondaire à fil fin et par suite sur la ligne de transmission, des courants ondulatoires dont la tension peut être élevée au degré voulu pour franchir les lignes les plus longues et les plus résistantes.

Pour augmenter la sensibilité de l'appareil transmetteur, on a combiné des dispositions de microphone à con-

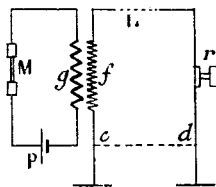


FIG. 558. — Disposition des circuits séparés.

tacts multiples; tel est le microphone Ader, constitué par deux séries de petits cylindres de charbon, disposés parallèlement entre trois blocs de même substance qui leur servent de support et qui sont fixés sous une planchette de sapin, devant laquelle on émet les ondulations vocales.

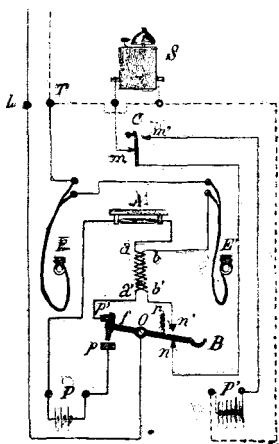


FIG. 559. — Diagramme d'un poste téléphonique.

La figure 559 donne le diagramme d'un poste téléphonique. Le circuit local du microphone A contient l'enroulement à gros fil aa' de la bobine d'induction, et est alimenté par une pile spéciale P de 2 à 3 éléments au maximum. Au repos, ce circuit est ouvert grâce au basculeur B, au crochet duquel doit être suspendu le récepteur téléphonique E.

L'axe O du basculeur est relié à la borne L d'arrivée du fil de ligne; si donc le poste correspondant lance un courant d'appel, celui-ci entre en L, arrive en O, passe par le contact n sur lequel s'appuie l'extrémité du basculeur, traverse la clef C en m et enfin la sonnerie, pour se perdre à la terre en T ou revenir par le fil de retour attaché au même point.

L'employé du poste appelé décroche alors les téléphones E et E'; le basculeur, obéissant au ressort antagoniste r , se relève, en quittant le contact n et coupant ainsi le circuit de la sonnerie, tandis qu'il ferme le circuit du microphone, en reliant les deux contacts p, p' . En même temps l'extrémité B vient en contact avec le plot n' ; le fil de ligne L se trouve ainsi raccordé à la bobine secondaire bb' et aux deux téléphones E et E' insérés en série dans le circuit.

Le poste est alors disposé pour recevoir les courants ondulatoires de la parole, lancés par le poste correspon-

nant. Il peut également transmettre la parole, comme le précédent; à cet effet, l'employé parle devant la planchette A, ce qui détermine des courants d'induction dans la bobine secondaire, lesquels se rendent par la ligne aux récepteurs du second poste, comme ils traversent ceux du poste qui nous occupe, à l'émission.

Pour appeler lui-même le poste correspondant, l'appareil étant dans la position de repos, l'opérateur, sans décrocher les téléphones, appuie sur la clef C, coupe ainsi le circuit de la sonnerie locale en m et ferme en m' le courant de la pile sur la ligne. Celui-ci passe donc par m' , n , l'axe O et pénètre dans la ligne par la borne L.

Dans le cas d'un poste central, destiné à communiquer avec un nombre plus ou moins grand de postes particuliers, la station comprend un tableau comportant autant d'électro-aimants, auxquels aboutissent les lignes des divers postes; sous l'action du courant d'appel, l'armature de ces appareils, dits *annonciateurs*, libère un volet qui tombe, en démasquant le numéro du poste correspondant.

Les tableaux sont disposés, non seulement pour la communication avec le poste central, mais encore pour mettre en correspondance deux postes particuliers qui désirent communiquer entre eux.

Nous renverrons le lecteur aux ouvrages spéciaux, pour la description détaillée des installations d'un poste central, qui dépasserait les limites de notre programme.

282. Perturbations sur les lignes téléphoniques. — SYSTÈMES ANTI-INDUCTEURS. — Les courants ondulatoires qui font parler les téléphones sont d'une intensité très faible, ne dépassant pas un cent millième d'ampère. On conçoit donc que le moindre courant parasite, courant dérivé ou d'induction, apporte des perturbations considérables dans les communications téléphoniques.

Les courants télégraphiques traversant des lignes parallèles aux fils téléphoniques induisent dans ces fils des courants instantanés qui, agissant sur le diaphragme récepteur, le font vibrer, en reproduisant tous les bruits des appareils télégraphiques, à tel point que l'on peut lire

au son, très nettement, les signaux du télégraphe Morse.

Lorsqu'une ligne téléphonique prend une de ses terres à proximité de celles d'une ou plusieurs lignes électriques, les courants de ces lignes se dérivent en partie dans le fil téléphonique et viennent troubler la transmission de la parole.

Le moyen le plus radical pour obvier à ces perturbations consiste à construire les lignes téléphoniques à double fil ; sans employer le retour par la terre. Mais ce procédé a l'inconvénient d'augmenter notablement les frais d'établissement des lignes.

Quand il s'agit de transformer un réseau existant à simple fil, on peut se contenter, au lieu de doubler les lignes sur tout leur parcours, de n'ajouter les fils de retour que sur les parties soumises aux influences perturbatrices, et de les relier ensemble à un conducteur servant de retour commun jusqu'au poste central.

Le procédé imaginé par M. Van Rysselberghe permet d'annuler les effets d'induction sur une ligne téléphonique à un seul fil. Il est basé sur la loi même de la génération des courants d'induction, d'après laquelle les courants induits sont dus à des variations toujours rapides de l'intensité du champ magnétique ou du courant inducteur.

Or, les courants perturbateurs sont des courants intermittents qui s'établissent ou cessent brusquement, condition favorable à l'influence inductrice. Le procédé de M. Van Rysselberghe consiste donc à amortir pour ainsi dire l'émission du flux électrique, en retardant l'établissement et l'annulation du courant télégraphique.

A cet effet, il emploie la disposition indiquée dans la figure 560. Des électro-aimants A et B, dont les enroulements présentent chacun une résistance de 500 ohms, sont intercalés dans le circuit de la ligne, l'un entre la pile et la borne d'émission du manipulateur, l'autre à la suite de cet appareil. En outre, un condensateur C est placé en dérivation sur la ligne et la terre du poste.

Quand on abaisse la clef du manipulateur, le courant lancé sur la ligne doit traverser les deux bobines ou *gra-*

duateurs en série; la période variable d'établissement de ce courant est donc augmentée par la self-induction des électros, suivant la loi générale; l'intensité ainsi graduée ne peut développer une induction appréciable dans la ligne. Le flux électrique se trouve encore amorti par la présence du condensateur qui absorbe une partie de son énergie. En outre, ce condensateur se décharge sur la ligne, quand la clef revient dans sa position de repos et neutralise l'effet du courant de rupture à la fin de l'émission.

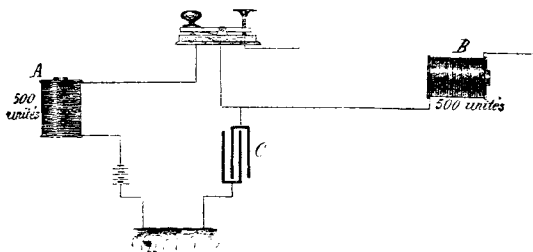


FIG. 560. — Système anti-inducteur Van Rysselberghe.

On arrive ainsi à supprimer tout bruit d'induction des lignes télégraphiques sur les fils téléphoniques placés dans le voisinage.

283. Télégraphie et téléphonie simultanées. — Le système anti-inducteur de Van Rysselberghe permet de transmettre simultanément, par un même fil, les signaux télégraphiques et les conversations téléphoniques.

Considérons (fig. 561) deux postes télégraphiques, système Morse par exemple, munis du dispositif anti-inducteur ci-dessus décrit. En chacun des postes ont été branchées des dérivations contenant un téléphone *t* et un condensateur *c* en série.

Si nous faisons d'abord abstraction du condensateur, nous voyons que le courant télégraphique émis par le poste de gauche par exemple, passera en partie sur la ligne, en partie dans la dérivation du téléphone; il actionnera

donc le récepteur télégraphique correspondant, mais ce courant gradué n'aura aucun effet pour faire vibrer la plaque sonore du téléphone.

Toutefois la suppression supposée du condensateur entraînerait une perte de courant à la terre, qui nuirait à la transmission des signaux télégraphiques. Le condensateur a donc été placé pour jouer le rôle de séparateur, isolant la dérivation du téléphone en *c*, et empêcher les courants télégraphiques de s'écouler en partie à la terre.

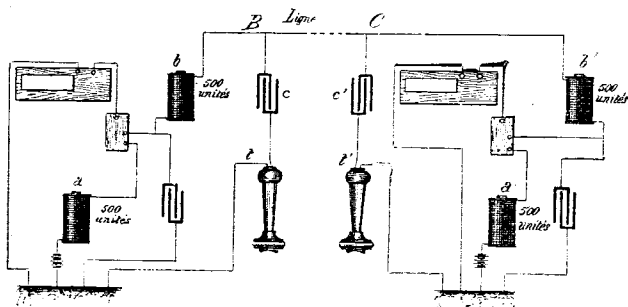


FIG. 561. — Transmissions télégraphiques et téléphoniques simultanées.

Les courants ondulatoires émis par le téléphone, se transmettent au contraire, par l'intermédiaire du condensateur; les courants d'induction développés par les vibrations du téléphone, chargent en effet l'armature du condensateur reliée à cet appareil; cette charge développe par influence une charge de signe contraire sur l'armature opposée; dès lors le fil de ligne, qui peut être considéré comme le prolongement de cette armature est le siège d'un courant ondulatoire qui charge synchroniquement les armatures du condensateur du poste récepteur et fait vibrer le téléphone correspondant, à l'unisson.

Les courants ondulatoires ne peuvent d'ailleurs se dériver sensiblement sur les appareils télégraphiques, car les bobines *b* du système anti-inducteur opposent au passage

de ces courants une résistance apparente énorme provenant de leur self-induction.

Dans le cas de plusieurs lignes téléphoniques, on ne peut équiper chaque ligne télégraphique de cette manière, car la parole transmise sur un fil se répercute sur l'autre par induction téléphonique; on devra donc employer un couple de fils télégraphiques pour chaque circuit téléphonique; les courants ondulatoires qui parcourent les deux fils, en sens inverse, produisent sur les lignes voisines les inductions opposées qui s'annulent.

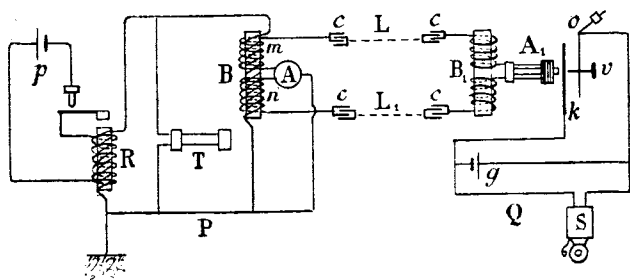


FIG. 562. — Translateur et relai phoniques.

TRANSLATEURS PHONIQUES. — Pour obtenir ce double flux ondulatoire, on utilise des appareils spéciaux nommés *translateurs phoniques*, qui consistent en une sorte de transformateur dont la bobine secondaire, formée de deux enroulements différentiels m et n (fig. 562), est reliée aux deux fils télégraphiques L L_1 par l'intermédiaire de condensateurs-séparateurs c , et la primaire est intercalée dans le circuit du téléphone T . Ce sont donc les courants induits par les ondes électriques dues aux vibrations du téléphone qui sont transmis sur la double ligne.

On ne peut utiliser pour l'appel les courants de sonneries, toujours relativement intenses, qui influenceraient les communications téléphoniques à travers les condensateurs c . On emploie alors le *relai* et l'*avertisseur phonique*.

ques, dont la disposition schématique est représentée au poste de droite Q ; sa position est simplement indiquée dans le poste de gauche P par le cercle A.

Le système d'appel phonique comprend un téléphone électro-magnétique A_1 dont la bobine est reliée aux enroulements secondaires du translateur B_1 ; sur la plaque vibrante K de celui-ci s'appuie la pointe d'une vis v portée par un basculeur mobile autour de l'axe O. Au repos, ce système ferme le circuit de la pile locale g , qui est également en dérivation sur la sonnerie-avertisseur S.

Si le poste P, par exemple, veut appeler le poste Q, il ferme le circuit primaire d'une bobine de Ruhmkorff, excité par la pile p et envoie ainsi dans l'enroulement primaire du translateur B, des courants alternatifs à courte période qui n'ont aucune action sur les appareils télégraphiques. Ces courants transmis à la ligne par le translateur, font vibrer la plaque du relai téléphonique A_1 .

Cette plaque vibre donc à l'unisson du trembleur de la bobine de Ruhmkorff et détermine des variations de contact entre elle et la vis v . Il en résulte un accroissement de la résistance du circuit de la plaque, qui devient supérieure à celle de l'avertisseur S ; la dérivation de la sonnerie est alors alimentée par un courant suffisant pour la mettre en mouvement et l'appel se fait entendre, sans que les courants ondulatoires émis troublent en rien les communications télégraphiques.

FIN

TABLE

CHAPITRE XII. — Distribution des courants électriques	1
Divers modes de distribution. — Distributions en série, en dérivation, mixte	1
Distributions par feeders ; par conducteurs multiples. . .	18
Distributions par courants alternatifs ; par courants diphasés ; par courants triphasés	38
Transformateurs à courants alternatifs ; à courants polyphasés. — Transformateurs polymorphiques	67
Transformateurs Gaulard ; Zipernowski ; Westinghouse ; Ganz ; Ferranti ; d'Œrlikon ; Swinburne	96
Distributions indirectes par courants alternatifs — Bobines de réaction. — Régulateurs. — Mesures de sécurité.	111
Transformateurs à courants continus. — Transformateurs rotatifs. — Accumulateurs. — Installation. — Entretien	128
Accumulateurs Faure ; Gadot ; Société des métaux ; Tudor ; Laurent Cely ; Mouterde ; Commelin.	156
Distributions indirectes par accumulateurs. — Régulation au moyen de batteries	165
CHAPITRE XIII. — Transmission électrique de l'énergie. Moteurs	176
Transmission de l'énergie — Calcul de la ligne de transport	176
Electro-moteurs à courant continu. — Caractéristiques. — Démarrage ; changement de marche	194
Moteurs à courants alternatifs. — Moteurs à courants polyphasés. — Champs tournants. — Moteurs synchrones ; asynchrones	222
Dispositifs de démarrage. — Qualités des moteurs polyphasés	247
CHAPITRE XIV. — Applications mécaniques de l'énergie électrique	255
Traction électrique. — Conducteurs aériens. — Perturbations des courants de retour	255

Conducteurs souterrains. — Conducteurs à contacts superficiels. — Distributions Westinghouse : Claret Vuilleumier. — Diatto.	277
Frotteurs pour prise de courant. — Trolley automoteur.	291
Tramways à accumulateurs. — Moteurs. — Combinateurs. — Chemins de fer électriques. — Stations génératrices. — Coût de la traction électrique	314
Telphérage. — Diverses applications mécaniques	327
CHAPITRE XV. — Eclairage électrique	336
Radiations lumineuses et électriques. — Rayons cathodiques. — Expériences de Herz et de Tesla	336
Lampes à incandescence. — Lampes à arc. — Régulateurs. — Lampes à arc Jaspar; Gramme; Siemens; Pilsen; Bardon; Brienne; Jandus; Hegner.	366
Photométrie. — Etalons d'intensité. — Eclairement	380
CHAPITRE XVI. — Electrochimie	392
Electrolyse. — Electro-métallurgie. — Galvanoplastie	392
Chlorures alcalins. — Carbure de calcium. — Soudure électrique	406
CHAPITRE XVII. — Canalisations. — Appareils de mesure. — Conduite des dynamos.	412
Canalisations aériennes. — Canalisations souterraines. — Installations intérieures	412
Ampèremètres et Voltmètres industriels. — Appareils de mesure alternatifs. — Compteurs électriques Aron; Thomson; Schallenberger; polyphasés	428
Appareils photométriques de Foucault; de Rumfort; de Bunsen; de Weber; de Blondel; de l'auteur	452
Conduite des dynamos. — Dérangements et vérifications. — Mesure du rendement des dynamos; des transformateurs.	461
CHAPITRE XVIII. — Télégraphie et téléphonie.	484
Télégraphes Bréguet; Morse; Hughes; Wheatstone; Baudot	484
Télégraphie simultanée. — Télégraphie sous-marine. — Télégraphie sans fil. — Téléphone électro-magnétique. — Microphone. — Perturbations téléphoniques. — Télégraphie et téléphonie simultanées	514

TABLE ALPHABÉTIQUE

- Accumulateurs, II, 129, 165.
 - (batterie d'), II, 321.
 - au cadmium, II, 164.
 - (charge des) II, 305.
 - au cuivre Commelin-Desmazures, II, 163.
 - (description de divers types d'), II, 156.
 - (entretien des), II, 151.
 - Faure-Sellon-Wolckmar, II, 135.
 - (installation des) à la station II, 143.
 - Julien et Paul Gadot, II, 158.
 - Laurent Cely, II, 161.
 - à la lithanode, II, 162.
 - Mousterde, II, 162.
 - Planté, II, 131.
 - Tudor, II, 159.
- Affinage électrique, II, 400.
 - des métaux, II, 393.
- Aimantation, I, 99.
 - (courbes d'), I, 127.
 - par l'électricité, I, 101.
 - (intensité d'), I, 94.
 - (retard à l'), I, 121.
- Aimant, I, 78.
 - et courants, leur équivalence magnétique, I, 109.
 - (force portante des) I, 95.
- Alternateurs, I, 459.
 - Brown, I, 494.
 - couplage des, I, 471.
 - Farcot, I, 481.
 - Ferranti, I, 474.
- Alternateurs Ganz, I, 477, 489.
 - Henrion, I, 492.
 - (mesure des), II, 481.
 - Mordey-Victoria, I, 483.
 - d'Örlikon, I, 485.
 - (régulation des), I, 495.
 - Thury, I, 487.
- Aluminium (électro-métallurgie de l'), II, 397.
- Ampère, I, 28.
- Ampèremètres industriels, II, 429.
- Ampères-tours, I, 116.
- Antivibrateurs, II, 267.
- Appareils de mesure, II, 413, 429.
 - de mesure des courants alternatifs, II, 433.
- Arc voltaïque, II, 357.
 - (lampes à), II, 355, 369.
 - (régulateurs à), II, 361.
- Argent (raffinage de l'), II, 401.
- Argenture, II, 405.
- Arrêt des moteurs, II, 210.
- Ascenseurs électriques, II, 332.
- Association des générateurs, I, 67.
- Attraction à distance, I, 158.
 - d'un solénoïde sur un noyau de fer doux, I, 158.
- Auto-excitation, I, 315.
- Auto-induction, I, 193.
- Balais, I, 249.
 - (décalage des), I, 228.

- Batterie d'accumulateurs, II, 321.
- Blanchiment, II, 393.
- Bobines annulaires, I, 105.
- égalisatrices, II, 120.
- de réaction, II, 119.
- de Ruhmkorff, II, 96.
- Boîte à goujons de Hughes, II, 492.
- de jonction pour dérivation, II, 424.
- Bornes d'un générateur, I, 49.
- Bougies Jablochhoff, II, 380.
- Câbles armés, II, 423.
- (jonction des extrémités des) II, 424.
- Calcul des conducteurs, I, 56.
- de la ligne de transport, II, 188.
- de latension d'un fil aérien, II, 417.
- Canalisations, II, 413.
- aériennes, II, 413.
- souterraines, II, 418.
- Caniveaux souterrains, II, 277.
- Caoutchouc, II, 277, 298.
- Capacité des conducteurs, I, 434, 448.
- (effets de la), I, 450, 453.
- Carborundum, II, 410.
- Carbure de calcium, II, 409.
- de silicium, II, 410.
- Chaleur équivalence magnétique de la, I, 6.
- Champ galvanique des courants, I, 101, 105.
- intérieur d'un solénoïde, I, 115.
- magnétique, I, 81, 87.
- tournant, produit par un enroulement Gramme, II, 229.
- tournant, produit par les courants diphasés, II, 226.
- Changement de marche, II, 210.
- de vitesse des moteurs polyphasés, II, 247.
- Charge des accumulateurs, II, 305.
- Chariot de l'appareil Hughes, II, 494.
- Chemins de fer électriques, II, 314.
- Chlorures alcalins (électro-chimie des), II, 407.
- Circuit complexe, I, 148.
- conducteur (résistance du), I, 32.
- électrique (travail d'un), I, 172.
- magnétique, I, 141.
- magnétique fermé, I, 97.
- magnétique ouvert, I, 146.
- Claret Vuilleumier (système), II, 284.
- Coefficient économique des générateurs, I, 64.
- de susceptibilité relative, I, 135.
- Cohéreur de Marconi, II, 513.
- Collecteur, I, 215, 249, 469.
- sectionné, I, 224.
- Combinateur, II, 310.
- Compteurs électriques, II, 441.
- Aron, II, 443.
- diphasé, II, 450.
- Edison, II, 442.
- Schallenger, II, 449.
- Thomson, II, 446.
- triphasé, II, 451.
- Condensation électrique, I, 442.
- Conducteurs aériens, II, 262.
- (calcul des), I, 56.
- capacité des, I, 434, 448.
- fonctionnement des, II, 423.
- fusion des, I, 41.
- à l'intérieur des habitations, II, 426.
- multiples (distribution à), II, 28.
- nus, II, 420.
- sectionnés à contacts superficiels, II, 281.
- souterrains, II, 277.
- Conduite des dynamos, II, 413, 464.

- Conduite des voitures, II, 310.
 Conservation de l'énergie, I, 4.
 Corps diamagnétiques, I, 133.
 — magnétiques, I, 133.
 Coulomb, I, 27.
 Coupe-circuit, I, 42.
 Couplage des alternateurs, I, 471.
 — en dérivation, II, 311.
 — des dynamos, I, 359.
 — des générateurs, I, 67.
 Courant (densité du), I, 37.
 — (distribution du), II, 262.
 — (intensité d'un), I, 28, 418.
 — (puissance d'un), I, 30.
 — (travail d'un), I, 29.
 Courants alternatifs, I, 409.
 — (champ galvanique des), I, 101.
 — dans les conducteurs, I, 189.
 — continus, I, 220.
 — dérivés ou bifurqués, I, 50, 54.
 — diphasés, I, 213.
 — électriques, I, 13.
 — de Foucault, I, 185.
 — de Foucault dans les dynamos, I, 244.
 — (génération des), dans les dynamos, I, 206.
 — induits, I, 162.
 — induits (sens des), I, 169.
 — magnétiques, I, 112.
 — redressés, I, 216.
 — de retour. Perturbations qu'ils occasionnent, II, 272.
 — de rupture, I, 197.
 — de self-induction, I, 196.
 Courbes d'aimantation, I, 127.
 — d'induction, I, 138.
 Courts-circuits, I, 43; II, 468.
 Creuset électrique, II, 409.
 Cuivrage, II, 405.
 Cuivre (raffinage du), II, 409.
 Décalage des balais, I, 228.
 Défaut de courant, II, 467.
 Démarrage, II, 210.
 Démarrage (effort au), II, 259.
 — des moteurs polyphasés, II, 247.
 Densité du courant, I, 37.
 Dépôts électro-chimiques, II, 405.
 Dérangement des dynamos, II, 467.
 Dérivation (distribution en), II, 9, 113.
 — par boîte de jonction, II, 424.
 — (couplage en), II, 311.
 — magnétique, I, 151.
 — à la terre, II, 273.
 Désaimantation (retard à la), I, 121.
 Désinfection, II, 393.
 Diatto (système), II, 287.
 Diélectriques, I, 446.
 Diplex Edison, II, 509.
 Disjoncteur Bardon, II, 149.
 Disque de Faraday, I, 181.
 Distributeurs manipulateurs de Baudot, II, 503.
 Distribution à conducteurs multiples, II, 28.
 — du courant pour la traction, II, 262.
 — par courants alternatifs, II, 38.
 — par courants diphasés, II, 45.
 — par courants triphasés, II, 55.
 — des courants électriques, II, 1.
 — en dérivation, II, 9, 113.
 — directe, II, 3.
 — par feeders, II, 18.
 — indirecte, II, 67.
 — indirecte par accumulateurs, II, 165.
 — indirecte par courants alternatifs, II, 111.
 — indirecte par courants polyphasés, II, 117.
 — mixte, II, 17.
 — en série, II, 3, 111.

- Distribution par sous-stations à deux batteries, II, 167.
- Dorure, II, 405.
- Duplex différentiel, II, 505.
- par la méthode du pont de Wheatstone, II, 507.
- Dynamos, I, 201.
- Alioth, I, 392, 395.
- Belfort, I, 373.
- Brown Boveri, I, 381.
- (conduite des), II, 413, 464.
- (couplage des), II, 359.
- à courant alternatif, I, 459.
- à courant continu, I, 248, 369.
- (dérangements des), II, 467.
- Disque Desrozières, I, 406.
- (entretien des), II, 464.
- (excitation des), I, 312.
- Farcot, I, 387.
- (fonctionnements des), I, 312.
- Gramme, I, 369.
- Hillairet-Huguet, I, 381.
- Limb, I, 375.
- multipolaires, I, 383.
- d'Œrlikon, I, 374, 389.
- à pôles consécutifs, I, 378.
- Rehniewski, I, 370.
- (rendement des), I, 355.
- (réversibilité des), II, 180.
- Sautter-Harlé, I, 378.
- Schuckert à anneau plat, I, 403.
- Siemens, I, 372.
- Siemens à induit extérieur, I, 397.
- Thury, I, 383.
- (vérification des), II, 467.
- Dyne, I, 83.
- Éclairage électrique, II, 337.
- Effort au démarrage, II, 259.
- de traction en rampe, II, 258.
- Électricité, I, 1.
- induite, I, 180.
- (quantité d'), I, 26.
- Electro-aimant, I, 103, 157.
- Electrochimie, II, 393.
- des chlorures alcalins, II, 407.
- Electrode Faure-Sellon, II, 157.
- Electro-dynamomètres, II, 435.
- Electrolyse, II, 393.
- Electro-metallurgie, II, 393.
- de l'aluminium, II, 397.
- du zinc, II, 399.
- Electromètres, II, 437.
- à quadrants, II, 439.
- Electro-moteurs à courant continu, II, 194.
- (entraînement de l'), II, 194.
- récepteur de Wheatstone, II, 501.
- typique, II, 405.
- Élévateurs de tension, II, 117.
- Energie, I, 2.
- (conservation de l'), I, 4.
- des courants décalés, I, 455.
- efficace, I, 425.
- électrique (applications mécaniques de l'), II, 255.
- électrique (générateur d'), I, 59.
- en mécanique, I, 7.
- (récupération de l'), II, 306.
- (transformateurs de l'), I, 3.
- (transmission électrique de l'), II, 176.
- Enroulements d'une dynamo Compound, I, 335.
- Gramme produisant un champ tournant, II, 229.
- induit à anneau de Gramme, I, 266.
- à tambour, I, 279.
- Entraînement de l'électro-moteur, II, 194.
- Entretien des accumulateurs, II, 151.
- Equivalence magnétique des aimants et des courants, I, 109.
- mécanique de la chaleur, I, 6.
- Erg, I, 93.
- Excitation, I, 469.

Excitation compound, I, 322.
 — en dérivation, I, 319.
 — des dynamos, I, 312.
 — série, I, 315.
 — schunt, I, 319.

Feeders d'alimentation, II, 18, 263.

Feuilletts magnétiques, I, 112.

Fils aériens (ligature des), II, 416.

Flux antagonistes et transversaux, I, 238.
 — de force, I, 85.
 — de force magnétique, I, 87.

Fonctionnement des moteurs, II, 200.

Force, I, 2.
 — électro-motrice, I, 242.
 — (flux de), I, 85.
 — d'induction, I, 165, 177.
 — magnétique (flux de), I, 87.
 — magnéto-motrice, I, 143.
 — portante des aimants, I, 95.
 — portante d'un électro-aimant, I, 157.
 — variable, I, 208.

Forces (mesure des), I, 7.

Frotteurs de prise de courant, II, 291.

Fusion des conducteurs, I, 41.

Galvanomètre à miroir, II, 511.
 — thermique, II, 433.

Galvanoplastie, II, 393, 402.

Générateurs électriques, I, 18.
 — (association des), I, 67.
 — (bornes d'un), I, 49.
 — (coefficient économique des), I, 64.
 — (couplage des), I, 67.
 — d'énergie électrique, I, 59.
 — (rendement des), I, 64.

Génération des courants dans les dynamos, I, 206.

Gutta-percha, II, 419.

Haute tension, I, 22.

Hydrogène (production industrielle de l'), II, 410.

Hystérésis, I, 244.

Incandescence (lampes à), II, 350, 355.

Inducteurs, I, 251.

Induction, I, 99, 130.
 — (courbes d'), I, 138.
 — électro-magnétique, I, 162.
 — (force d'), I, 165, 177.
 — mutuelle, I, 191.

Induits, I, 262.
 — à disque, I, 287.
 — ouverts, I, 293.
 — à tambour de Siemens, I, 276.

Installation des accumulateurs à la station, II, 143.
 — à l'intérieur des habitations, II, 426.

Intensité d'aimantation, I, 94.
 — des champs galvaniques, I, 105.
 — d'un courant, I, 28.
 — — alternatif, I, 418.

Isolateurs à colliers, II, 268.
 — à double cloche, II, 414.

Jonctionnement des conducteurs, II, 423.

Jonctions des extrémités de câbles, II, 424.

Joule, I, 29.

Lampes à arc les plus usuelles, II, 369.
 — à arc voltaïque, II, 355.
 — Bernstein, II, 354.
 — Edison, II, 351.
 — à incandescence, II, 350.
 — à incandescence de Nernst, II, 355.

Ligature des fils aériens, II, 416.

Lignes de force, I, 79.
 — téléphoniques (perturbations sur les), II, 276, 521.

Ligne de transport (calcul de la), II, 188.

Locomotives électriques, II, 315.

Lois de Faraday, I, 26.

— de Joule, I, 36.

— de Kirchhoff, I, 50.

— de Lenz, I, 168.

— d'Ohm, I, 35, 47.

Lumen-mètre Blondel, II, 459.

Lummer-Brodhum, II, 456.

Machines-outils actionnées par l'électricité, II, 329.

Magnétisme, I, 78.

— (mesure des quantités), I, 83.

Manipulateur Morse, II, 487.

Marche (changement de), II, 210.

Mesure des alternateurs et des transformateurs, II, 481.

— (appareils de), II, 413, 429.

— des courants alternatifs (appareils de), II, 433.

— des forces, I, 7.

— du potentiel, I, 21.

— des quantités de magnétisme, I, 83.

— du rendement des dynamos, II, 476.

— de la résistance, I, 33.

Mesures de sécurité, II, 125.

Métaux (affinage des), II, 393.

Microphone de Hughes, II, 518.

Microphoniques (appareils), II, 517.

Moment magnétique, I, 91.

Montage Scott, I, 489.

Moteurs asynchrones, II, 237.

— — à courants alternatifs simples, II, 219.

— — à courants alternatifs, II, 214.

— (caractéristiques des), II, 204.

— (conditions de fonctionnement des), II, 200.

— à courant polyphasé ou à champ tournant, II, 223, 253.

Moteurs électriques, II, 176.

— électro-magnétique de Froment, II, 179.

— d'induction à courant alternatif simple, II, 246.

— polyphasés (démarrage des), II, 247.

— sphérique Lundell, II, 335.

— synchrones, II, 232.

— — à courants alternatifs simples, II, 214.

— des tramways, II, 306.

Nickelage, II, 405.

Ohm, I, 33.

Or (raffinage de l'), II, 401.

Oscillations électriques, II, 344.

Oxygène (production industrielle de l'), II, 410.

Ozone (production industrielle de l'), II, 410.

Paraffine, I, 419.

Perméabilité, I, 136.

Phases (différences de), I, 412.

Phonographe d'Edison, II, 515.

Photomètre de Bunsen, II, 454.

— de Foucault, II, 453.

— de Rumfort, II, 454.

— de Weber, II, 455.

Photométrie, II, 381.

— des rayons de diverses directions, II, 461.

Photométriques (appareils), II, 453.

Pile de Lalande, II, 163.

— secondaire de Planté, II, 132.

Plaques Gadot, II, 158.

— jumelles, II, 157.

— Tudor, II, 160.

Plomb (raffinage du), II, 401.

Pôles, I, 79.

Pont de Wheatstone, II, 507.

Porte-balais, I, 249.

Poste télégraphique Morse, II, 491.

Poste téléphonique, II, 520.
 Potentiel, I, 13, 21, 227.
 Prise de courant (frotteurs de prise de), II, 291.
 Production d'un champ tournant par les courants diphasés, II, 226.
 Puissance d'un courant. I, 30.
 — efficace, I, 425.
 — (réglage de la), II, 210.
 Quantité d'électricité, I, 26.
 Radiations lumineuses et électriques, II, 337.
 Radiographie, II, 343.
 Raffinage de l'argent, de l'or, du plomb, II, 401.
 — du cuivre, II, 400.
 Rail Broca, II, 256.
 Rayons Roentgen, II, 343.
 — X, II, 343.
 Réaction d'induit, I, 233.
 Récepteurs, I, 76.
 — cohéreur de Marconi, II, 513.
 — Morse, II, 488.
 Récupération de l'énergie, II, 306.
 Réducteur, II, 147.
 Réglage de la vitesse et de la puissance, II, 210.
 Régulateurs à arc voltaïque, II, 361.
 — de tension, II, 117.
 Régulation, I, 341.
 — des alternateurs, I, 495.
 — des machines schunt, I, 343.
 — des machines série, I, 350.
 Relais phoniques, II, 525.
 — d'un poste télégraphique Morse, II, 491.
 Rendement des dynamos, I, 355; II, 476.
 — des générateurs, I, 64.
 — mécanique, II, 185.
 — des transformateurs, II, 482.
 Résistance des circuits conducteurs, I, 32, 33.
 Résistance réduite, I, 53.

Résonnateur de Hertz, II, 347.
 Retard à l'aimantation et à la désaimantation, I, 121.
 Réversibilité des dynamos, II, 180.
 — des transformateurs de l'énergie, I, 3.
 Roue de Barlow, I, 181.
 Schuntage des appareils, I, 55.
 — des inducteurs, II, 312.
 Sécurité (mesures de), II, 125.
 Self-induction, I, 426, 453.
 Sens des courants induits, I, 169.
 Série (distribution en), II, 3, 111.
 Siphon enregistreur, II, 512.
 Solénoïde, I, 102.
 — (attraction d'un), par un noyau de fer doux, I, 158.
 — (champ intérieur d'un), I, 115.
 Soudure électrique, II, 411.
 Sources électriques, I, 18.
 Stations génératrices pour la traction électrique, II, 319.
 Susceptibilité magnétique, I, 120, 135.
 Télégraphe Bréguet, II, 485.
 — imprimeur de Hughes, II, 492.
 — Marconi, II, 512.
 — Morse, II, 486.
 — multiple de Baudot, 502.
 — Wheatstone, II, 499.
 Télégraphie, II, 485.
 — sans fil, II, 512.
 — simultanée, II, 505.
 — sous-marine, II, 510.
 — et téléphonie simultanées, II, 523.
 Téléphone Ader, II, 517.
 — Bell, II, 515.
 — électro-magnétique, II, 515.
 Téléphonie, II, 514.
 — et télégraphie simultanées, II, 523.
 Téléphoniques (lignes), II, 276, 251.

Téléphoniques (postes), II, 520.
Telphérage, II, 327.
Tension, I, 16.
 — d'un fil aérien (calcul de la), II, 417.
 — (régulateurs de), II, 117.
Traction électrique, II, 255.
 — dépenses d'exploitation, II, 325.
 — (effort de), en rampe, II, 258.
 — électrique, coût, frais d'établissement, II, 323.
Tramways à accumulateurs, II, 299.
 — à fil aérien et à accumulateurs, II, 303.
 — (moteurs des), II, 306.
Transformateurs, II, 67.
 — à courants alternatifs, II, 69.
 — à courants continus, II, 121.
 — pour courants polyphasés, II, 84.
 — de l'énergie, I, 3.
 — fixes de tension, II, 96.
 — industriels, II, 98.
 — (mesure de), II, 481.
 — (rendement des), II, 482.
 — (réversibilité des), I, 3.
 — rotatifs, II, 128.
Translateurs phoniques, II, 525.
Transmetteur radiateur de Marconi, II, 513.
 — **Wheatstone**, II, 500.
Transmission électrique de l'énergie, II, 176.

Transmissions télégraphique et téléphonique simultanées, II, 524.
Travail, I, 2.
 — d'un circuit électrique dans un champ magnétique, I, 172.
 — d'un courant, I, 29.
 — d'hystérésis, I, 125, 140.
 — magnétique (unité de), I, 93.
 — et puissance, I, 5.
Trolley, II, 292.
 — **automoteur de Lombard-Gerin**, II, 296.
 Tubes de Crookes, II, 300.
 — de **Geissler**, II, 341.
Unité de travail magnétique, I, 93.
Ventilateur électrique, II, 334.
Vérification des dynamos, II, 467.
Vitesse (changement de), I, 247.
 — (réglage de la), II, 210.
Voie Marsillon, II, 256.
Voitures (conduite des), II, 310.
Voltmètres industriels, II, 429.
Watt, I, 30.
Wattmètres, II, 433.
Westinghouse (système), II, 281.
Zinc (électro-métallurgie du), II, 399.