



ALFRED SOULIER

Ingénieur Electricien

MUSÉE

COMMERCIAL

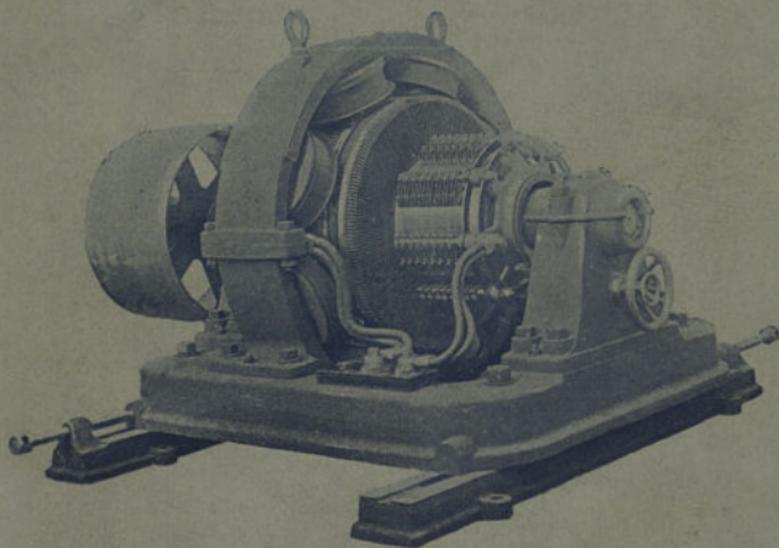
LILLE

LES GRANDES

APPLICATIONS

DE

L'ÉLECTRICITÉ



*Eclairage Électrique,
Transmission de la force à distance,
Tramways, Chemins de fer Electriques,
Electrochimie, Extraction des Métaux,
Fabrication des Couleurs.*

IRIS - LILLIAD - Université Lille

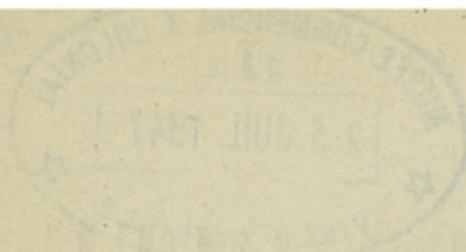
GARNIER FRÈRES

Editeurs, Paris.



LES GRANDES APPLICATIONS

DE L'ÉLECTRICITÉ



DE L'ÉLECTRICITÉ

LES GRANDES APPLICATIONS

~~388~~ N° 388 474/1

1650

LES GRANDES APPLICATIONS

DE

L'ÉLECTRICITÉ

PAR

ALFRED SOULIER

INGÉNIEUR-ÉLECTRICIEN *

Chargé du service électrique de la Section technique de l'Artillerie,
Secrétaire de la rédaction de *l'Industrie électrique*.

Éclairage électrique.
Transmission de la force à distance.
Tramways électriques.
Chemins de fer électriques.
Électrochimie. — Extraction des métaux.
Fabrication des couleurs.

PARIS

GARNIER FRÈRES, LIBRAIRES-ÉDITEURS

6, RUE DES SAINTS-PÈRES, 6

—
1904

LES GRANDES APPLICATIONS

ELECTRICITE

TOME SECOND

PAR M. L. BRUNEL, Ingénieur en chef des Ponts, des Chaussées et de la Navigation, et de la Compagnie des Chemins de Fer de l'Etat.

Transmission de l'énergie électrique.
Travaux électriques.
Moteurs de la traction.
Eclairage. Exécution des lignes.
Fabrication des câbles.

PARIS

CHAMPAGNE, Librairie-Éditeur
10, rue de Valenciennes

1901

INTRODUCTION

De tout temps les phénomènes électriques ont attiré l'attention des savants, et nous retrouvons dans l'antiquité classique l'origine des études dont ils furent l'objet; toutefois les connaissances de cette époque étaient extrêmement restreintes et on ne pouvait penser à leur application pratique, car les observations se bornaient aux manifestations électriques de l'atmosphère, à l'éclair et aux propriétés électriques de l'ambre qui, une fois frotté, pouvait pendant quelques instants attirer les corps légers qu'on lui présentait.

La relation étroite qui existe entre ces deux phénomènes dus à la même énergie naturelle, bien qu'apparemment étrangers l'un à l'autre, est restée un secret pendant des milliers d'années.

On oublia même les observations des anciens qui avaient constaté dans l'ambre frotté la propriété d'attirer les corps légers, et pendant tout le moyen âge cette particularité resta ignorée. Ce n'est qu'en 1600 que l'électricité devint une science, et à partir de

*

cette époque elle se forma peu à peu jusqu'à devenir une branche spéciale de la physique.

C'est en cette année même que le savant anglais *Gilbert* publia un ouvrage dans lequel il fit remarquer la propriété de l'ambre frotté et démontra que cette même propriété existait aussi dans toute une autre série d'autres corps.

A partir de cette époque tous les savants s'intéressent à l'électricité et l'étudient. Parmi les grands noms qui se rattachent aux premiers essais et découvertes, nous ne mentionnerons que celui d'*Otto de Guericke* qui construisit en 1650 la première machine à influence. Cet appareil permit d'obtenir de grandes quantités d'électricité et facilita l'étude de l'étincelle électrique et des phénomènes qui l'accompagnent.

Pendant les cent premières années qui suivirent, il ne fut fait aucune autre découverte sérieuse; il ne fut apporté aux premiers essais que quelques changements ou compléments plus ou moins importants.

Le premier nom célèbre que nous rencontrons dans l'histoire de l'électricité est celui de *Benjamin Franklin*. Ce fut le premier savant qui établit une théorie des phénomènes électriques et démontra la parenté des phénomènes de l'éclair avec ceux produits par la machine électrique à influence.

Nous lui devons aussi la première invention pratique du domaine de l'électricité, le paratonnerre, qui date de 1750.

A cette même époque, vers le milieu du XVIII^e siècle, on découvrit également les propriétés calorifiques

et chimiques du courant électrique et on les étudia sans cependant être en état d'en tirer le moindre profit pratique, car l'électricité, telle qu'elle se manifeste dans l'éclair ou telle qu'elle est produite par la machine à influence, ne peut, suivant nos idées actuelles, étant donné son état, être utilisée pratiquement.

Les découvertes qui ont fait de l'électricité la reine de la science et de la technique moderne, entre autres la première production de courants utilisables en pratique, sont des conquêtes du XIX^e siècle. Suivant le mode de production du courant, il faut distinguer ici deux périodes : celle de l'électricité par contact et celle de l'électricité par induction.

Dans la première période, ce sont les essais de *Volta* qui ont servi de point de départ, et, dans la deuxième, les recherches de *Faraday*.

La source d'électricité voltaïque, autrement dit la pile, était cependant trop incertaine et trop coûteuse pour la plupart des applications pratiques et n'a acquis d'importance durable que dans la télégraphie, la téléphonie et la galvanoplastie. En 1812, *Ærsted* observa l'influence du courant sur l'aiguille aimantée et il fit ainsi qu'*Ampère* toute une série d'essais intéressants sur les relations existant entre le courant électrique et le magnétisme; ces essais furent d'une importance fondamentale pour les progrès de la technique. En 1837, *Morse*, *Steinheil*, *Cook* et *Wheatstone* inventèrent le premier télégraphe pratique et c'est sur cette base que s'est développée la télégraphie actuelle.

La galvanoplastie, ou production de dépôts métalliques au moyen du courant électrique, date également de cette époque. Cependant, les recherches faites sur l'induction, dont le principe avait été mis en évidence par Faraday, furent d'une bien plus grande portée et d'une importance capitale sur le développement de l'électrotechnique. Stimulé par les essais de Faraday, *Pixii* construisit en 1832 la première machine capable de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique ; pendant la période qui suivit, il y fut apporté un certain nombre de perfectionnements qui n'aboutirent cependant pas par cette voie à la création d'un générateur pratique de courants.

Ce ne fut qu'en 1873 que *Gramme* créa la machine à courant continu à anneau qui devait immortaliser son nom, et presque à la même époque *Werner Siemens* construisit sa machine à enroulement en tambour ; ces deux machines permirent d'obtenir le courant électrique à un prix suffisamment modique pour permettre son emploi en grand. C'est depuis cette époque que la science électrique a pris sa course victorieuse à travers le monde, où elle conquiert tous les jours de nouveaux domaines.

Les applications industrielles de l'électricité. —

Les principales applications industrielles de l'électricité qui ont été mises en pratique depuis la fin du siècle dernier sont :

- 1° L'éclairage électrique ;
- 2° La transmission de la force à distance ;

3° L'électrochimie ou la préparation des produits chimiques et l'extraction des métaux de leurs minerais par l'électricité.

Éclairage électrique. — Cette première application a été étudiée au point de vue purement domestique dans notre *Traité pratique d'Électricité*, mais nous nous étendrons ici-même davantage sur l'éclairage des villes dans un prochain chapitre.

Transmission de la force à distance. — La transmission de la force à distance que nous examinerons ensuite est un des plus beaux problèmes que les électriciens aient résolu. Il repose sur ce fait que la machine dynamo-électrique, telle que Gramme l'avait créée, n'est pas autre chose qu'un outil pouvant transformer le travail mécanique en énergie électrique et réciproquement. Nous savons, en effet, que les machines dynamos reçoivent leur mouvement d'un moteur (machine à vapeur, turbine ou moteur à gaz); elles absorbent la puissance mécanique que leur fournit ce moteur et elles restituent dans les fils ou câbles qui leur sont reliés de l'énergie électrique qui nous révèle sa présence dans les nombreuses lampes qu'elle permet d'illuminer.

Prenons la même machine et fournissons-lui de l'énergie électrique en reliant les fils ou câbles qui y aboutissent à une source de courant électrique appropriée, nous verrons aussitôt la poulie de la dynamo se mettre en mouvement à une allure des plus rapides.

**

Supposons maintenant que la source qui fournit le courant soit une autre dynamo et nous aurons réalisé un transport d'énergie.

Historique. — S'il faut en croire la légende, c'est à l'effet du hasard que serait due cette grande découverte. En 1873, à l'Exposition de Vienne, deux machines Gramme étaient voisines; l'une tournait sous l'action du moteur à vapeur qui la commandait, l'autre attendait son tour d'essai. De nombreux fils traînaient à terre; c'était l'ouverture et, comme on sait, rien n'était encore bien prêt. Au lieu de fermer le circuit de la dynamo sur les lampes que l'on devait éclairer, l'ouvrier chargé de ce service se trompa et relia accidentellement les deux machines. A la grande surprise des spectateurs, la seconde dynamo se mit à tourner.

M. H. Fontaine, qui dirigeait et représentait la maison Gramme à l'Exposition, eut l'idée de répéter cette expérience devant un grand nombre d'ingénieurs attirés par l'annonce de ce fait inattendu. Le résultat fut saisissant; à travers un conducteur de plus de 1 000 mètres de long, le courant fourni par une première machine Gramme fut amené à une deuxième qui se mit à tourner et put à son tour actionner une pompe centrifuge. Enfin, solennellement répétée le 3 juin 1873 devant l'empereur d'Autriche, cette expérience fut couronnée de succès.

Principe. — La figure 1 est un exemple d'une transmission d'énergie. Supposons, en effet, que l'on

dispose d'une chute d'eau assez puissante, mais située dans des montagnes peu accessibles ou dans tout autre endroit éloigné de tout centre industriel. Ces chutes, qui se comptent encore par milliers, sont le plus souvent inutilisées.

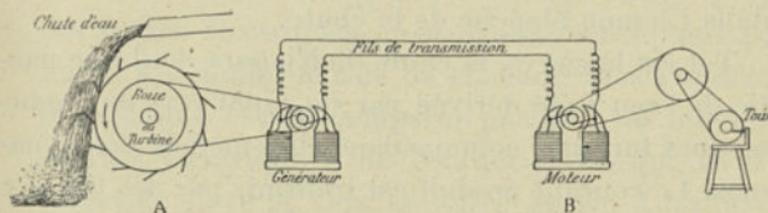


Fig. 1. — Transmission à distance de l'énergie d'une chute d'eau.

Avec les moyens que nous offre la science électrique, qu'allons-nous faire ?

En A nous établissons une roue ou une turbine hydraulique que l'eau fera tourner en en frappant les ailes. A l'aide d'une courroie, nous transmettons ce mouvement à une dynamo. Cette dynamo, en échange de l'énergie motrice qu'elle reçoit, pourra nous donner de l'énergie électrique, et à l'aide de fils qui traverseront montagnes et vallées nous conduirons cette énergie électrique vers un centre industriel, en B, par exemple, où nous pourrons l'utiliser et faire marcher des usines. Pour cela nous installerons en ce point B une dynamo identique à la première et à laquelle nous attacherons les deux fils. La machine recevant de l'énergie électrique se mettra à tourner et nous rendra de l'énergie mécanique que nous uti-

liserons à faire mouvoir un tour, une scie ou un ventilateur, par exemple.

Le courant électrique, on le voit, n'est qu'un intermédiaire, un précieux intermédiaire, dirons-nous, qui nous a servi à transporter en B, grand centre industriel, de l'énergie inutilisable en A et qui se perdait dans l'écume blanche de la chute.

Tel est le cas de la chute du Niagara dont une partie de l'eau a été dérivée par un canal vers de gigantesques turbines commandant elles-mêmes des dynamos. Le courant produit est transmis par des fils aux localités voisines, en particulier à la ville de Buffalo dont il alimente toutes les usines.

Nous pouvons citer également en France la ville de Limoges qui utilise, grâce à une transmission électrique de l'énergie, les chutes de la Vézère, situées dans le département de la Corrèze, à 75 kilomètres de Limoges.

Enfin la Société Méridionale d'Électricité a récemment entrepris la transmission de l'énergie électrique dans les villes du département de l'Aude tout entier et même de quelques départements voisins en utilisant des chutes puissantes captées dans les montagnes des Corbières et inutilisables en cet endroit.

Mais ces transmissions, si simples à première vue, ne se font pas sans difficultés, et pour bien comprendre comment se réalisent économiquement ces grands transports, nous demanderons au lecteur un peu de patience et d'attention pour les notions qui vont suivre.

Définitions générales. — La question économique du transport de l'énergie à distance ne peut se résoudre avec avantage que si l'on tient compte des facteurs caractéristiques qui représentent cette énergie.

Dans notre *Traité pratique d'Électricité*, à propos des unités électriques, nous avons montré que, pour mieux s'assimiler le rôle de chacune de ces unités, le plus simple est de comparer pendant un instant le courant électrique à un courant d'eau qui va d'un réservoir élevé A vers un autre bassin à un niveau plus bas B.

Ce courant d'eau a pour cause la *différence de niveau* qui existe entre les deux réservoirs, enfin le

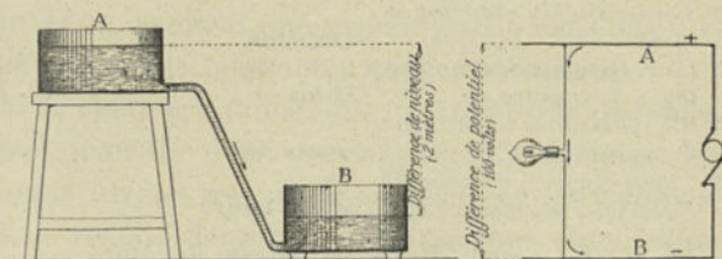


Fig. 2. — Comparaison hydraulique.

volume d'eau que laisse passer la canalisation en une seconde dépend évidemment de la largeur de cette canalisation et de la pression de l'eau (fig. 2).

De même pour le courant électrique : entre deux fils A et B nous établissons une différence de niveau électrique qui prend ici le nom de *différence de potentiel*. Cette différence de potentiel est provoquée

par un générateur d'énergie électrique (pile ou dynamo). Tant que les deux fils ne sont pas reliés entre eux, rien ne passe, mais vient-on à les réunir par un conducteur un courant électrique s'établira, et comme le courant d'eau, il sera d'autant plus intense que la canalisation sera plus large et la pression plus élevée.

C'est l'expression même de la loi d'Ohm qui dit que l'intensité du courant électrique est proportionnelle à la différence de potentiel et inversement proportionnelle à la résistance que lui opposent les conducteurs (1).

(1) Rappelons le nom des unités électriques (*Traité Pratique d'Électricité*, page XIV).

- | | | |
|--|-------------|----------------------|
| 1° La différence de potentiel se mesure en..... | volts | on la désigne par U. |
| 2° L'intensité du courant se mesure en..... | ampères | — I. |
| 3° La résistance des conducteurs se mesure en..... | ohms | — R. |
| 4° La puissance électrique se mesure en..... | watts | — P. |
| 5° Le travail ou énergie électrique se mesure en.. | watts-heure | — W. |

La loi d'Ohm s'écrit $I = \frac{U}{R}$ ce qui veut dire que

$$\text{l'intensité du courant} = \frac{\text{différence de potentiel}}{\text{résistance}}$$

En d'autres termes l'intensité du courant est le *quotient* de la différence de potentiel par la résistance électrique du circuit considéré.

D'autre part, la puissance électrique, avec du courant continu peut s'écrire $P = UI$, ce qui veut dire que :

la *puissance électrique* = *différence de potentiel* \times *intensité*
 en d'autres termes c'est le produit de la différence de potentiel que l'on fournit à un appareil électrique par l'intensité du courant qui le traverse.

EXEMPLE : 1° Une lampe de 16 bougies a une résistance à

Mais arrivons au fait qui nous intéresse et étudions sous quelles formes la nature nous présente les chutes d'eau.

Tout d'abord en Suisse, pays de la houille blanche, par excellence, nous en trouvons de nombreuses qui jaillissent des flancs de montagnes élevées. Leur débit est quelquefois plutôt maigre (quelques litres par seconde), mais leur hauteur atteint parfois des centaines de mètres (1). Le génie humain les a captées, elles sont en grande partie canalisées et actionnent des turbines très puissantes.

Allons un peu plus loin et en suivant le cours du Rhône français que trouvons-nous ?

A Bellegarde d'abord, près de Lyon ensuite, de forts barrages retiennent l'eau de ce fleuve impétueux et en envoient une grande partie dans des turbines non moins puissantes que les premières.

Ici la chute est faible, elle n'atteint que quelques mètres, mais le débit est très grand, témoins les énormes tuyaux qui amènent l'eau sur les turbines.

Nous voyons donc que nous pouvons obtenir une même puissance par deux moyens :

chaud de 200 ohms, nous la montons entre deux fils entre lesquels il existe une diff. de pot. de 100 volts. Quelle est l'intensité du courant qui traversera la lampe ?

$$\text{D'après la loi d'Ohm} \quad I = \frac{U}{R} = \frac{100}{200} = 0,5 \text{ ampère.}$$

2° Quelle puissance absorbera cette même lampe ?

$$P = UI = 100 \times 0,5 = 50 \text{ watts.}$$

(1) L'usine électrique de Vouvry, près de Saint-Maurice (Valais) possède la plus haute chute du monde, la différence de niveau y atteint près de 950 mètres.

1° Avec de hautes chutes (hautes pressions) et un débit relativement petit (tuyaux étroits);

2° Avec de faibles hauteurs de chutes (basses pressions) et un fort débit (grosses canalisations).

La puissance d'une chute s'évaluant en multipliant la hauteur de la chute en mètres par le débit en litres par secondes, on voit que ces deux genres de chutes peuvent être équivalents dans certains cas.

Les hautes chutes nécessiteront des tuyaux étroits, mais très solides pour pouvoir résister à la forte pression; les basses chutes exigeront des canalisations très larges pour laisser passer tout le volume d'eau nécessaire, et on conçoit facilement que ce seront les plus encombrantes et souvent les plus coûteuses à cause de la quantité de matériaux qu'elles exigeront.

Mécanisme des transmissions d'énergie électrique. — Les transports ou les distributions d'énergie électrique peuvent également se diviser en deux classes : ceux à haute tension et ceux à basse tension.

Mais pourquoi ces deux variétés ? Car tandis que nous sommes obligés de prendre les chutes telles que nous les offre la nature, nous pouvons obtenir l'énergie électrique à volonté à haute ou à basse tension, rien qu'en modifiant l'enroulement des fils sur nos dynamos. Il semble que nous pourrions adopter un tension, convenablement choisie, partout uniforme et en tout cas assez basse pour ne pas être dangereuse.

La raison est une pure question d'économie, un calcul bien simple va nous le montrer.

Supposons une grande ville qui aurait besoin de 1 000 lampes à incandescence de 16 bougies pour son éclairage particulier et qui disposerait d'une chute assez puissante à 20 kilomètres de là.

Les lampes à incandescence se faisant couramment pour fonctionner avec une pression ou différence de potentiel de 100 à 110 volts, nous sommes obligés de distribuer dans la ville l'énergie sous cette tension. Chaque lampe laissant passer un courant de 0,5 ampère, les 1 000 lampes absorberont 500 ampères lorsqu'elles seront toutes allumées.

Voici qui est parfait comme toutes les théories. Mais en pratique? — En pratique, nous serons obligés de prévoir une canalisation capable de laisser passer ces 500 ampères et comme dans le cas des basses chutes il faudra de gros câbles. Ce qui veut dire que les conducteurs qui amèneront l'énergie à travers les campagnes sur un parcours de 20 kilomètres devront être en cuivre pour présenter le minimum de résistance (le cuivre étant un des métaux les plus conducteurs); et ils devront avoir au moins 250 millimètres carrés de section soit un câble presque de la grosseur du bras! On voit d'ici la dépense et la difficulté de pose à travers la campagne!

Mieux vaut y renoncer.

Nous pouvons nous tirer d'embarras en changeant les facteurs qui constituent la puissance électrique. De même que la puissance d'une chute s'évalue en faisant le produit de la hauteur de chute en mètres

par le débit en litres par seconde, de même la puissance électrique :

$$P = UI = \text{nombre de volts} \times \text{nombre d'ampères.}$$

Dans le cas qui nous occupe nous avons :

$$P = 100 \times 500 = 50\,000 \text{ watts.}$$

Ces 50 000 watts nous sont acquis, ils nous appartiennent, ils représentent la puissance de la chute d'eau transformée en puissance électrique par la dynamo.

Mais on peut les obtenir d'une foule de façons différentes, ainsi par exemple : $5 \times 10\,000 = 50\,000$.

Tout de suite une idée vient à l'esprit : Prenons 10 000 volts et avec 5 ampères nous aurons nos 50 000 watts.

Il est en effet aujourd'hui relativement facile pour nos électriciens de bobiner une dynamo pour lui faire donner 10 000 volts. De même qu'avec les hautes chutes on aura à lutter contre une forte pression ou tension électrique, ce qui exigera de bons isollements; de même les conducteurs de la canalisation pourront être très minces et dans l'espèce un simple fil de 2 à 3 millimètres de diamètre, un fil télégraphique, suffira pour laisser passer nos 5 ampères.

Voilà donc le problème résolu; il reste cependant un point obscur : comment allons-nous éclairer nos lampes à 100 volts tandis que notre canalisation nous en fournit 10 000? L'industrie ne pouvant faire des

lampes à 10 000 volts, les électriciens ont tourné la difficulté en plaçant au point d'utilisation, à l'arrivée des fils au centre de la ville à éclairer, des appareils appelés *transformateurs*.

Ces appareils, très simples comme on le verra, recevront le courant à 10 000 volts et 5 ampères dans un premier enroulement et rendront par un deuxième bobinage 100 volts et 500 ampères ou tous autres facteurs si cela est nécessaire.

Nous citerons par exemple des transformateurs utilisés pour la soudure électrique, lesquels recevant du courant à 100 volts et quelques ampères rendent la même puissance ou à peu près sous forme de plusieurs milliers d'ampères et une fraction de volt.

Donc, en résumé, plus la distance à franchir est grande et plus élevée doit être la pression ou tension électrique entre les deux fils.

Traction électrique. — Une des plus remarquables applications de la transmission de l'énergie électrique à distance est la traction électrique. C'est toujours la vieille expérience classique; dans une usine nous faisons tourner de puissantes dynamos génératrices, le courant qu'elles produisent est conduit par des fils isolés le long d'une voie de chemin de fer. Sur l'essieu d'un wagon nous montons la dynamo réceptrice que nous relions aux fils isolés à l'aide de frotteurs.

Que va-t-il arriver ?

La dynamo du wagon recevant du courant va se

mettre en mouvement, elle fera tourner l'essieu et les roues, et le wagon roulera sur la voie tant que les frotteurs maintiendront en communication constante les dynamos génératrices et réceptrices.

A ce wagon automoteur nous attacherons un train et nous aurons un chemin de fer électrique.

L'usine génératrice pourra utiliser une chute d'eau, comme c'est le cas des chemins de fer électriques de Chamonix et de Cauterets; la traction électrique sera alors obtenue presque gratuitement par les cascades et les torrents.

Dans d'autres cas, dans l'intérieur des villes, par exemple, on trouvera avantageux de brûler le charbon dans une usine centrale dans le but d'actionner à distance des locomotives électriques traînant les trains à travers les souterrains, procédé bien plus économique et bien plus hygiénique que les nombreuses locomotives à vapeur dont la fumée asphyxiante aurait tôt fait de remplir les tunnels. Tel est le cas des chemins de fer de Versailles et du Métropolitain.

Applications électrochimiques. — Mais nous ne sommes pas au bout des grandes applications de l'électricité; espérons même que nous n'y serons jamais. A côté de ces manifestations imposantes de l'énergie il en est d'autres où le travail s'accomplit d'une façon silencieuse pour ainsi dire, mais qui n'en sont pas moins captivantes. C'est de l'électrochimie que nous voulons parler.

L'électrochimie industrielle.— Née d'hier, quoique ses débuts très lointains remontent aux premières observations des actions chimiques du courant, l'électrochimie rend aujourd'hui de signalés services dans la fabrication de certains produits chimiques.

Grâce aux chutes d'eau trop longtemps méconnues, on a pu disposer, à grands frais d'installation. c'est vrai, de formidables usines où naturellement on a installé des dynamos pour convertir en énergie électrique cette énergie mécanique qui jusqu'à présent était perdue pour tous. Le courant, grâce à ses merveilleuses propriétés, a été utilisé pour rompre certaines combinaisons chimiques et en former d'autres.

Le vulgaire sel marin, le chlorure de sodium des chimistes, a été transformé en soude caustique et hypochlorite de chaux ou chlorure décolorant ; dans d'autres cas, ce sont des couleurs éclatantes qui apparaissent silencieusement dans les cuves électrolytiques.

Enfin, en utilisant la température énorme de l'arc électrique, on a pu fondre et unir ensemble des composés réputés jusqu'ici infusibles, tels que la chaux vive et le charbon. Le carbure de calcium est sorti du four électrique et avec lui l'acétylène.

Est-il besoin d'insister pour faire saisir combien est plein d'avenir le domaine des réactions électrochimiques ? On comprendra pourquoi des travailleurs obstinés cherchent et arrivent à extraire, grâce au courant électrique, les métaux de leurs minerais en rompant à l'aide d'une énergie supérieure des

combinaisons que la nature a réalisées depuis des siècles.

L'aluminium, le cuivre, le zinc et l'antimoine commencent déjà à s'obtenir par cette voie et tout fait prévoir qu'on ne s'arrêtera pas là.

LES GRANDES APPLICATIONS
DE
L'ÉLECTRICITÉ

PREMIÈRE PARTIE
LES SOURCES INDUSTRIELLES D'ELECTRICITE
ET LES TRANSFORMATEURS

CHAPITRE PREMIER
LES SOURCES INDUSTRIELLES
D'ÉLECTRICITÉ

La source industrielle d'électricité la plus importante à l'heure actuelle est la machine dynamo-électrique, source indirecte d'énergie si l'on veut, car au fond cette machine nous sert à tirer parti soit de l'énergie des chutes d'eau, soit de celle produite par la combustion du charbon, du pétrole, etc.

Nous passons sous silence les piles auxquelles notre *Traité pratique* a consacré plusieurs pages et qui ne conviennent qu'à de très petites applications. Peut-être les choses changeront-elles le jour où, à la suite de nouvelles découvertes, l'homme saura mieux utiliser l'énergie de la combustion du charbon en obte-

nant directement le courant par la combustion même de ce produit, comme on obtient le courant dans les piles par la dissolution du zinc. Fini, ce jour-là, des machines à vapeur encombrantes et des moteurs à gaz; — malheureusement nous n'en sommes pas encore arrivés à ce point et, pour le moment, du moins, il nous faut passer par les machines, intermédiaires peu économiques, qui nous gaspillent les trois quarts de l'énergie dont nous pourrions disposer.

Nous en sommes donc réduits à utiliser le mouvement d'une roue, ou d'un arbre de transmission quelconque; le mieux est de chercher à ne rien perdre et à transformer le plus possible en énergie électrique. Mais comment allons-nous procéder? — Bien simplement: nous allons mettre à profit une très ancienne expérience, celle de Faraday, qui amena la découverte de l'induction. L'histoire nous apprend, en effet, que ce savant, ayant un jour approché un barreau d'acier aimanté d'une bobine de fil de cuivre recouvert de soie, dont les extrémités étaient mises en communication avec un galvanomètre (1) sensible, un courant prit naissance dans le fil.

Chaque fois que l'on approchait ou que l'on éloignait l'aimant de la bobine, on voyait l'aiguille du galvanomètre dévier.

Cette expérience bien simple se vérifie facilement si l'on dispose d'un aimant un peu puissant et d'un galvanomètre sensible (un ampèremètre à cadre mobile Chauvin et Arnoux convient très bien pour cela), relié aux deux extrémités du fil d'une bobine (un électro-aimant, par exemple.)

(1) Appareil comportant une aiguille extrêmement mobile, dont le déplacement indique le passage d'un courant.

On constate que dès que l'on approche l'aimant de la bobine, l'aiguille de l'indicateur de courant dévie dans un *certain sens* (1), puis quand on l'éloigne l'aiguille dévie brusquement en *sens inverse*. En somme le *courant change* de sens quand le *mouvement change* lui-même de sens. Nous avons donc d'ores et déjà le moyen de produire un courant *alternatif*.

Remarquons, tandis que notre expérience est encore montée, que la déviation est d'autant plus grande que le mouvement que nous produisons est plus rapide. — Premier point.

Ensuite, si nous avons eu la précaution d'enrouler une grande longueur de fil sur notre bobine, la déviation sera d'autant plus grande qu'il y aura plus de fils. — Deuxième point.

Enfin plus l'aimant dont nous disposons sera puissant et plus l'aiguille déviera. — Troisième point.

Si donc nous voulons construire une petite machine électrique produisant des courants appréciables, nous devons :

- 1° Réaliser un déplacement rapide;
- 2° Enrouler une grande longueur de fil sur nos bobines;
- 3° Employer de puissants aimants.

On remarque, et ceci est une conséquence de la dernière condition, que l'introduction d'un barreau de fer doux au centre de la bobine augmente considérablement l'effet produit par notre aimant. Le fer doux jouit en effet de la propriété d'être très perméable aux lignes de force magnétique qui s'échappent de l'aimant, il les concentre alors qu'elles se disper-

(1) Le sens du courant est tel qu'il tend constamment à *s'opposer* au déplacement de la bobine et de l'aimant.

raient dans l'air, les aspire pour ainsi dire et les fait ainsi passer dans la bobine. C'est grâce à cela que la déviation est fortement augmentée.

Machine élémentaire. — Les premières machines ont été construites sur ces principes; elles étaient bien simples : celle de Pixii (fig. 3), en particulier, se

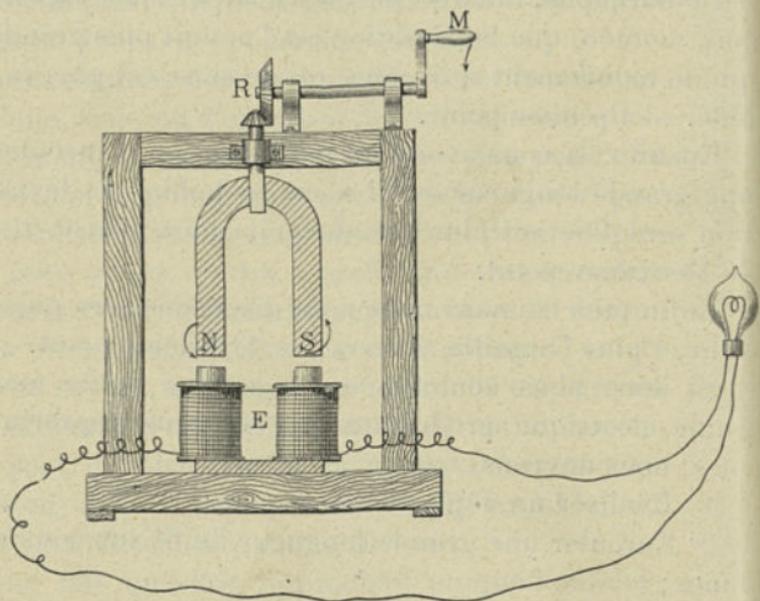


Fig. 3. — Machine de Pixii.

composait d'un bâti en bois supportant un fort aimant en fer à cheval NS que l'on pouvait faire tourner rapidement à l'aide d'une manivelle M actionnant l'aimant par l'intermédiaire de deux roues d'angle R.

Au-dessous de l'aimant, et vis-à-vis ses pôles, on place deux bobines E fixées solidement sur le socle en bois de l'appareil. Un fil de cuivre recouvert de soie est enroulé sur ces bobines comme sur les élec-

tro-aimants que l'on trouve partout dans le commerce.

En faisant tourner la manivelle, l'aimant va participer au mouvement et ses pôles s'approcheront et s'éloigneront des bobines. Chaque fois qu'ils s'approcheront un courant d'un certain sens prendra naissance dans les bobines si le circuit est fermé (par une lampe à incandescence, par exemple). Dès que les pôles de l'aimant s'éloigneront des bobines le courant changera de sens.

La lampe sera donc parcourue par des courants allant alternativement dans un sens puis dans l'autre, et si nous tournons la manivelle suffisamment vite, elle s'illuminera.

Elle s'illuminera quoique n'étant pas parcourue par un courant continu parce que les alternativités, autrement dit la fréquence des établissements du courant est très grande et que la lampe n'a pas le temps de se refroidir et de s'éteindre entre deux émissions consécutives de courant, mais pour cela il faut tourner vite.

C'est ainsi qu'a été réalisé dès le début l'éclairage des phares, c'est ainsi encore que l'on distribue le courant dans beaucoup de villes, à cause de la simplicité de production et aussi, nous le verrons, à cause de la grande facilité de transformation des courants alternatifs ainsi obtenus.

Nous voici donc en possession d'un appareil pouvant nous transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.

Entre ces vieilles machines de Pixii et nos grandes machines industrielles, il n'y a qu'un pas : nous allons le franchir.

1° Dynamos industrielles à courants alternatifs.

Au lieu d'employer des aimants, on préfère aujourd'hui employer des électro-aimants qui sont beaucoup plus puissants.

Rappelons qu'un électro-aimant est constitué par un noyau en fer doux, autour duquel on enroule un fil de cuivre isolé. Si on fait passer dans ce fil le courant continu d'une pile, d'un accumulateur ou d'une machine dynamo à courant continu, le fer s'aimante tant que dure le passage du courant, l'aimantation ainsi obtenue est beaucoup plus puissante que celle que l'on réalise avec les aimants, ce qui fait que la dépense de courant à laquelle on est obligé de consentir pour exciter l'électro-aimant est largement compensée par l'augmentation de puissance de notre machine.

En fait, les grosses machines industrielles à courant alternatif, appelées couramment *alternateurs*, celles qui remplissaient les galeries de machines de l'Exposition de 1900, étaient constituées par une série de bobines disposées sur le pourtour du volant d'une machine à vapeur. La figure 4 qui représente une de ces machines démontées permet de voir aisément ces bobines. Ce sont les aimants de notre machine élémentaire ; le courant continu nécessaire à leur excitation est fourni par une petite dynamo auxiliaire actionnée par l'arbre même du moteur à vapeur. Cette machine trouve sa place en avant de la figure 4 ; on distingue très bien le bout d'arbre qui l'actionne et les pièces qui la supportent.

La vue d'ensemble de la page 115 montre une de ces excitatrices montée devant son alternateur.

Les bobines dans lesquelles le courant alternatif doit prendre naissance sont placées vis-à-vis des aimants ou plutôt des électro-aimants sur une couronne en fonte entourant le volant.

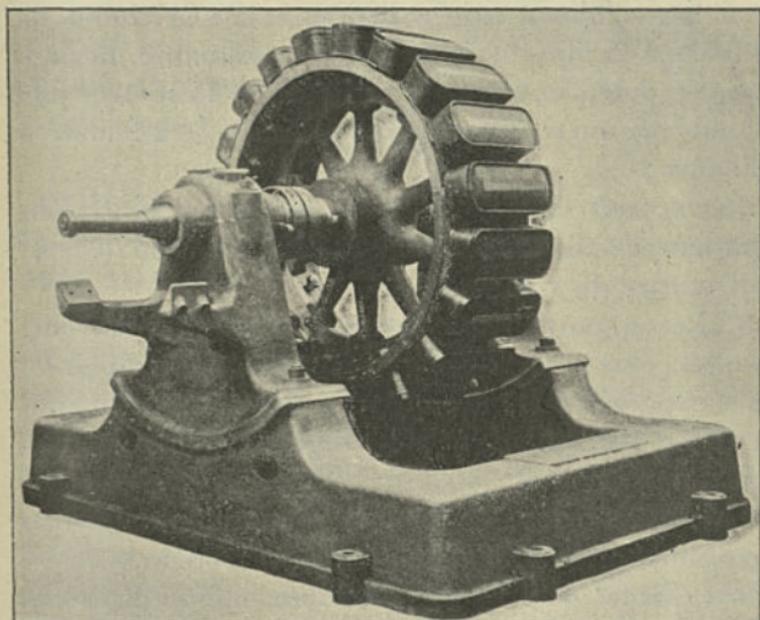


Fig. 4. — Alternateur démonté; système inducteur.

Cet ensemble de bobines est appelé *induit* de la machine. On appelle *inducteur* l'ensemble des aimants ou des électro-aimants qui provoquent le courant dans l'induit.

Lorsqu'on met en marche la machine à vapeur, les électro-aimants que porte le volant passent très rapidement devant les bobines fixes de la couronne; un

courant alternatif prendra donc naissance dans ces dernières si le circuit est fermé.

Il est facile de voir qu'une telle machine sera autrement puissante que notre machine primitive de Pixii :

1° Le déplacement des aimants se fait rapidement ; en effet, si le volant a seulement 3 mètres de diamètre et si la machine à vapeur l'entraîne à une vitesse de 90 tours à la minute, allure très raisonnable, nos bobines se déplacent avec une vitesse de 14 mètres par seconde, ce qui représente une allure de 50 kilomètres à l'heure ;

2° On peut enrouler sur les bobines une grande longueur de fil, étant donné la place dont on dispose tout autour du volant ;

3° Les aimants employés sont puissants ; ils sont, en effet, plus énergiques que des aimants ordinaires, car l'expérience montre qu'avec des électro-aimants on triple facilement à poids égal la puissance des aimants ordinaires.

La figure 5 représente une coupe d'une dynamo à courants alternatifs d'un plus petit modèle système Ganz, établie d'après les principes indiqués précédemment : A est une des bobines induites fixée solidement à la carcasse par des boulons, — F est une bobine inductrice mobile, c'est un des électro-aimants, — B représente le noyau de fer de l'électro-aimant dépourvu de sa bobine inductrice.

Dynamos à courants alternatifs triphasés. — Nous pourrions arrêter là notre étude sur les machines puisque tous les constructeurs ont suivi le principe ci-dessus dans les nombreux modèles qu'ils

livrent à l'industrie. Il nous reste cependant à dire un mot des machines à courants alternatifs triphasés de plus en plus répandues depuis que l'on transmet l'énergie à de grandes distances. Tout d'abord, qu'est-ce que des courants alternatifs triphasés ?

Principe des machines à courants triphasés.

— Considérons une machine ana-

logue à la précédente, composée d'une couronne fixe en fonte MN reposant sur le sol. Dans cette couronne nous fixons trois bobines analogues à notre bobine d'essai aux trois sommets d'un triangle équilatéral (fig. 6) (1, 2 et 3).

Faisons tourner au milieu un aimant NS que pour plus de clarté nous supposerons fixé en N à l'arbre d'une machine à vapeur.

Que va-t-il arriver ?

Quand l'aimant passera devant la bobine 1, nous savons qu'un courant alternatif prendra naissance dans le fil de cette bobine si le circuit est fermé. — De même devant 2, de même quand l'aimant passera devant 3.

Jusqu'ici rien de bien nouveau. Couplons ces bobines ensemble et pour cela attachons une des extré-

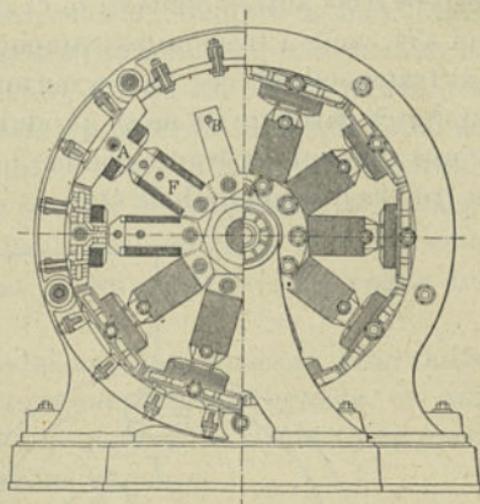


Fig. 5. — Coupe d'un alternateur.

mités du fil qui les entoure à la carcasse métallique de la couronne, ce qui les réunira entre eux; il nous restera trois autres bouts *a*, *b*, *c*; ce sont ces trois fils qui s'en vont à travers les campagnes et les villes et qui transmettent ces trois courants que l'on appelle *triphases* parce qu'ils ne se produisent pas en même temps; ils sont *déchronés* comme le dit M. Hospitalier, ce qui traduit mieux leur état.

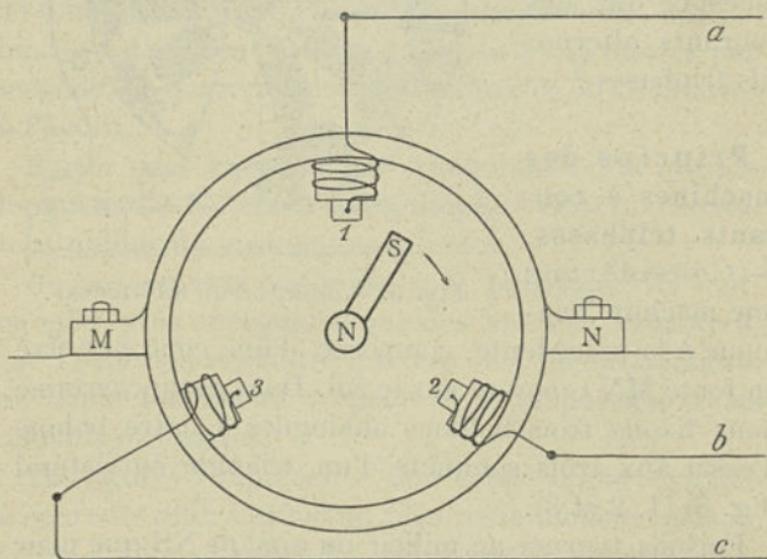


Fig. 6. — Principe des machines à courants triphasés.

Mais à quoi bon compliquer ainsi les choses et employer ces trois courants alors qu'il est si facile d'obtenir du courant alternatif simple.

La raison doit être recherchée dans la question si importante de la transmission de l'énergie à distance; nous savons que pour utiliser une chute nous faisons tourner au départ une dynamo génératrice qui envoie du courant à travers les fils de ligne, et à l'arrivée

nous nous servons de ce courant pour éclairer des lampes et surtout pour faire marcher des moteurs (tramways électriques, usines, chemins de fer). Mais tandis que les lampes s'illuminent, quel que soit le courant qui les alimente, il n'en est pas de même des moteurs. Avec le courant alternatif simple, pour le moment du moins, on ne sait pas faire des appareils puissants démarrant sous de lourdes charges; la chose est beaucoup plus facile au contraire avec les courants triphasés; c'est ce qui explique leur vogue actuelle.

Les dynamos produisant des courants alternatifs sont appelées couramment des *alternateurs*, ce qui simplifie beaucoup le langage et l'écriture; c'est ainsi que nous les désignerons toujours.

Détails de construction des alternateurs. — Dans l'industrie, les dynamos à courants alternatifs sont analogues comme forme à notre machine de démonstration; mais pour augmenter leur puissance, l'aimant NS est remplacé par un électro-aimant.

De plus, au lieu d'un seul aimant nous en avons plusieurs; on en met même le plus possible sur la jante d'un volant, absolument comme dans les alternateurs à courant alternatif simple. Sur la couronne fixe, au lieu de disposer trois bobines induites, comme dans la figure théorique, nous en mettrons un grand nombre, mais il faudra qu'il y en ait trois par électro-aimant inducteur. Pour mieux utiliser la place, ces groupes de trois bobines sont enchevêtrées, elles constituent un enroulement d'apparence bizarre mais très simple au fond. C'est le même fil qui est enroulé sur un même groupe de bobines et qui fait le tour de la

couronne; en somme, tout se passe comme dans la machine théorique : les effets des diverses bobines d'un même groupe s'ajoutent, voilà tout.

On dispose donc de six bouts de fil ; ces six bouts on peut les réunir de deux manières différentes : soit en triangle comme dans notre machine de démonstration (fig. 6), soit en étoile (fig. 7). Les électriciens

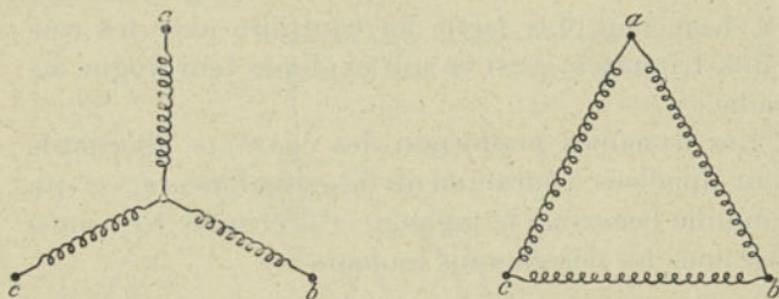


Fig. 7. — Groupement des bobines d'un système triphasé.

choisissent généralement l'un ou l'autre de ces montages, suivant les conditions d'installation.

Les alternateurs triphasés étant généralement construits en vue de transmettre l'énergie à travers de grandes distances doivent produire une différence de potentiel souvent très élevée. Tandis que les réseaux d'éclairage de la plupart de nos grandes villes fonctionnent sous la tension de 110 volts, on fait couramment produire 10 000 volts aux alternateurs; on est même allé jusqu'à 30 000 volts et rien ne dit qu'on s'arrêtera là.

Mais ces enroulements à haute tension ne sont pas sans présenter de grandes difficultés d'isolement. Les fils ne sont plus, comme dans les petites machines, simplement isolés avec du coton verni à la gomme

laque, ce serait totalement insuffisant; ils sont passés dans des tubes en caoutchouc vulcanisé ou dans des gaines en toile à la micanite (matière formée par des débris de mica agglomérés avec de la gomme laque) et on apporte de grands soins à l'enroulement.

Nous avons vu que la présence d'un noyau de fer dans notre bobine d'expérience augmentait beaucoup le courant produit, par suite de la propriété que possède le fer d'être très perméable aux lignes de force magnétiques qui s'échappent de l'aimant.

Donc, dans les machines nous enroulerons nos bobines sur des noyaux en fer choisi le plus doux possible.

Dans les alternateurs, la couronne fixe, qui, nous l'avons vu, supporte les bobines induites, est généralement en fonte, mais ici la fonte n'agit qu'au point de vue purement mécanique; c'est à l'intérieur que l'on a fixé solidement, à l'aide de boulons, une autre couronne formée de feuilles de tôle douce de 4 à 5 dixièmes de millimètre d'épaisseur, séparées entre elles par du papier et fortement serrées

Ainsi que nous l'avons fait remarquer dans notre *Traité pratique d'électricité*, on isole les tôles les unes des autres dans les dynamos à courant continu et encore mieux dans les dynamos à courants alternatifs, pour éviter des courants de circulation parasites dans le fer doux, appelés *courants de Foucault*.

Pour loger notre enroulement les tôles portent des rainures faites avec soin; chaque bobine enroulée à l'avance sur un gabarit vient trouver sa place dans deux rainures: on réalise donc bien la forme classique de la bobine et de son noyau. Tous les soins, avons nous dit, sont apportés à l'isolement; c'est pour cela

que l'on éloigne avec grand soin de la masse métallique les fils qui réunissent les bobines entre elles ; c'est également pour cela que dans toutes les machines récentes on laisse l'induit fixe et on fait tourner les électro-aimants inducteurs, à l'inverse de ce qui

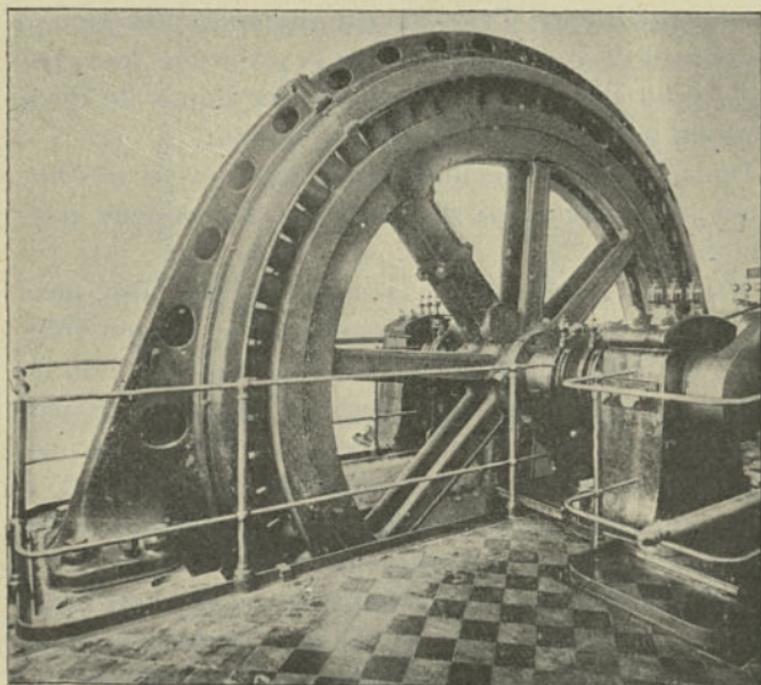


Fig. 8. — Vue d'ensemble d'un alternateur-volant monté.

arrive avec les dynamos à courant continu. Il est en effet bien plus facile de conserver et de surveiller un bon isolement pendant la marche avec une telle disposition ; si, au contraire, l'induit tourne, les bobines peuvent se déplacer pendant la rotation, et on ne peut souvent y remédier que trop tard, quand un accident s'est produit.

Les anciennes machines étaient à induit tournant; de nos jours, on préfère laisser tourner les inducteurs, plus faciles à isoler, puisqu'ils peuvent être alimentés par du courant continu à 100 volts ou à une tension moindre si on le désire.

2° **Dynamos industrielles à courant continu.**

Tandis que le courant alternatif nous sert pour franchir les grandes distances à cause des hautes tensions qu'il nous permet d'obtenir facilement, le courant continu nous est indispensable pour certaines applications : la charge des accumulateurs, les moteurs électriques (tramways et chemins de fer électriques) et enfin pour les applications électrochimiques du courant.

Dans notre *Traité pratique d'électricité* nous avons exposé le principe et la théorie de ces machines, nous n'y reviendrons pas, nous nous contenterons d'en indiquer les points principaux.

La dynamo à courant continu, telle que Gramme l'a créée se compose de trois parties :

- 1° Les inducteurs ;
- 2° L'induit ;
- 3° Le collecteur.

Les inducteurs sont les aimants ou plus généralement les électro-aimants qui engendrent le champ magnétique dans lequel tournera l'induit (fig. 9).

Entre les pôles ou pièces polaires N.-S. des inducteurs, tourne l'induit formé généralement d'un anneau en feuilles de tôle douce séparées par du papier sur

lequel est disposé un fil de cuivre recouvert de coton. Ce fil est enroulé sous forme d'une série de bobines reliées entre elles comme le montre la figure, de façon à ce que le bout sortant de l'une soit soudé au bout entrant de l'autre et ainsi de suite. Chaque soudure est reliée de plus par une tige à une lame du collecteur, sorte de cylindre composé d'autant de lames isolées qu'il y a de bobines sur l'anneau.

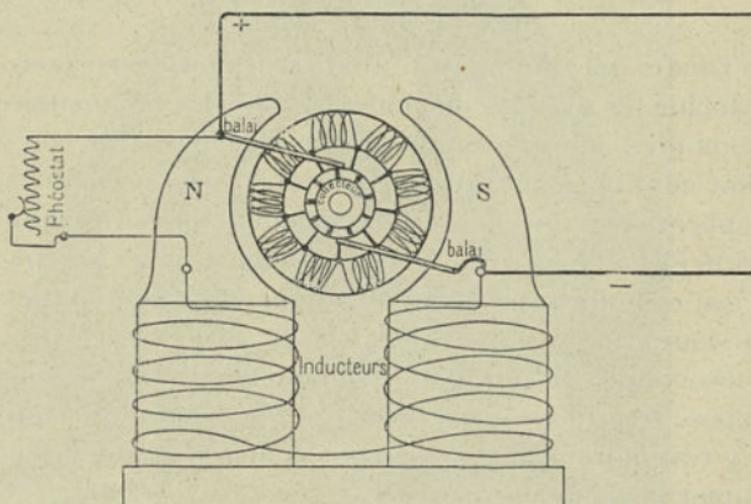


Fig. 9. — Schéma d'une machine dynamo-électrique à courant continu.

Nous avons montré dans notre *Traité pratique d'électricité* qu'il suffisait de faire appuyer deux frotteurs métalliques ou balais sur la surface du collecteur pour recueillir du courant continu pendant la rotation de l'anneau dans le champ magnétique.

Le courant nécessaire à l'excitation, c'est-à-dire à l'entretien du champ magnétique des inducteurs, peut être fourni par une source extérieure, mais le plus gé-

néralement on l'emprunte à la dynamo elle-même; pour cela les deux extrémités de l'enroulement des électro-aimants inducteurs sont reliées aux deux bails. On interpose généralement dans ce circuit une résistance que l'on peut faire varier à la main et que l'on nomme *rhéostat* (fil de maillechort dont on introduit plus ou moins de longueur dans le trajet du courant). Cet appareil joue pour le courant le rôle d'un véritable robinet; lorsqu'on le manœuvre il diminue ou il augmente le courant, et par cela même il permet de régler l'excitation des électro-aimants inducteurs.

Tel est le principe des dynamos dont la machine Gramme est le type.

Les dynamos génératrices industrielles à courant continu comportent toujours ces trois parties et il sera facile de les distinguer. La forme générale est souvent changée et on peut dire: autant de constructeurs, autant de formes. Cependant les dynamos actuelles paraissent se rapprocher d'un modèle de plus en plus robuste, dont le moteur de tramway a été le point de départ. Il s'agissait, en effet, pour la traction électrique de commander les essieux des voitures par des moteurs électriques non seulement puissants, mais aussi peu fragiles et à l'abri des chocs et de la poussière. On a créé alors le moteur blindé dont le principe est toujours celui de notre dynamo type, dynamo qui serait enfermée dans une cage en fonte s'ouvrant en deux pièces et ne laissant sortir que l'arbre moteur et les fils conducteurs.

Induit. — L'enroulement de l'induit ne se fait presque plus en anneau; on préfère adopter l'enroulement en tambour d'un bobinage plus économique et bien

plus commode depuis que l'on emploie des induits dentés, comme nous le verrons à propos des moteurs (page 66).

On utilise un cylindre au composé de feuilles de tôle douce, isolées entre elles par du papier et fortement serrées.

Ces tôles sont découpées d'avance à l'emporte-pièce, elles comportent des dents absolument comme une roue dentée. En les assemblant on a soin de mettre les dents en regard, de sorte que le cylindre de fer une fois monté présente sur sa circonférence extérieure une série de gorges ou rainures dans lesquelles on logera l'enroulement. Le fil, au lieu de passer à l'intérieur, va d'une gorge à l'autre suivant un diamètre; c'est ce qui a fait donner le nom de tambour à cet enroulement; c'est tout comme si on enroulait une corde sur un tambour suivant sa longueur et en passant sur les deux faces vibrantes de cet instrument (fig. 10).

L'enroulement du fil se continue ensuite sur les autres dents comme dans l'anneau, les fils entrant et sortant de chaque bobine partielle étant soudés ensemble et à une lame du collecteur.

Le collecteur n'offre pas de particularités, si ce n'est qu'on isole les lames entre elles avec du mica; chacune d'elles est reliée à deux bobines de l'induit, et par bobine nous désignons l'ensemble des fils allant d'une rainure à l'autre suivant un diamètre; nous donnons du reste au chapitre des moteurs une description détaillée de cet enroulement, ainsi que du collecteur.

Les balais ou frotteurs sont en charbon aggloméré; c'est ce qui a obligé les constructeurs à isoler les collecteurs au mica; ce corps étant à la fois incombustible et un excellent isolant les étincelles que l'on ne

peut jamais éviter complètement sous les balais n'ont par suite aucune prise dessus.

L'emploi des balais en charbon est des plus avantageux; on ne trouve en effet presque plus de dynamos, sauf les anciennes avec des balais en fil de laiton ou en toile de cuivre; cela tient à ce que le balai en charbon s'use peu et en tous cas n'use pas le collec-

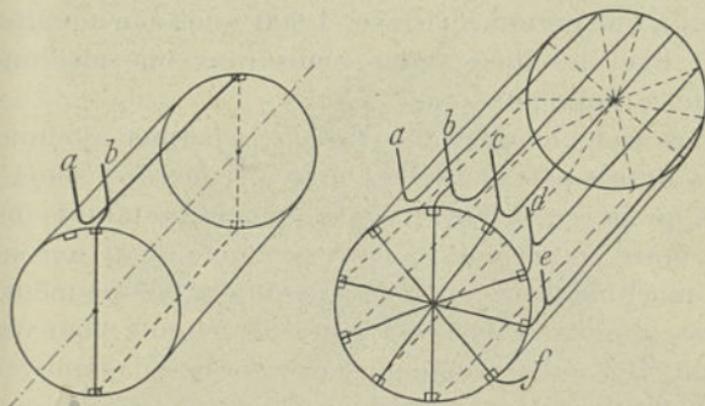


Fig. 10. — Enroulement en tambour.

teur. Il permet la marche de la machine en avant et en arrière, condition très précieuse pour les moteurs de tramways. Enfin, ces balais ne nécessitent aucune surveillance ainsi que l'expérience nous l'a montré, à condition toutefois d'employer du charbon graphitique de bonne qualité.

Inducteurs. — Les inducteurs des machines industrielles actuelles ne ressemblent plus à ceux des anciennes dynamos; on les fait gros et courts. Grâce à l'emploi d'induits dentés, d'une part, et de l'acier doux qui a la perméabilité du fer doux, d'autre part, on a

pu diminuer beaucoup la dépense d'excitation et réduire les dimensions des électro-aimants.

Les grosses machines industrielles au lieu d'être à deux pôles comme notre machine type en comportent un plus grand nombre, généralement d'autant plus qu'elles sont plus puissantes; il est facile de comprendre pourquoi :

Prenons un induit, faisons-le tourner entre deux pôles à une certaine vitesse, 1 000 tours par minute, pour fixer les idées, nous réaliserons une machine d'une certaine puissance.

Sans rien changer et si la place le permet, ajoutons deux autres pôles entre les deux premiers et supposons qu'ils produisent, pris séparément, autant d'effet sur notre induit que les deux premiers, nous aurons une machine deux fois plus puissante avec une même vitesse angulaire de 1 000 tours par minute pour cet induit. Il y a donc économie et plutôt que d'employer deux dynamos à deux pôles ou bipolaires nous avons avantage à prendre une dynamo à 4 pôles.

En somme, plus il y a de pôles et mieux l'induit est utilisé, puisque pendant un tour chacune de ses bobines travaille bien plus avec un grand nombre de pôles qu'avec deux.

Les électro-aimants sont disposés à l'intérieur d'une couronne en fonte (fig. 11) qui leur sert de support ou à l'intérieur d'une cage en acier doux (moteurs de tramways). Les pièces polaires entre lesquelles doit tourner l'induit sont soigneusement alésées et tournées de façon à laisser le moins de jeu possible entre le fer de l'induit et le métal des inducteurs. C'est cet espace dénommé *entrefer* qui joue un grand rôle dans le bon fonctionnement des dynamos et, généra-

lement, on a intérêt à le rendre aussi faible que possible.

C'est pour cela que dans les enduits dentés, grâce aux dents, le fer de l'induit affleure et vient passer très près des pièces polaires, permettant ainsi de mieux utiliser le champ magnétique inducteur toujours cher

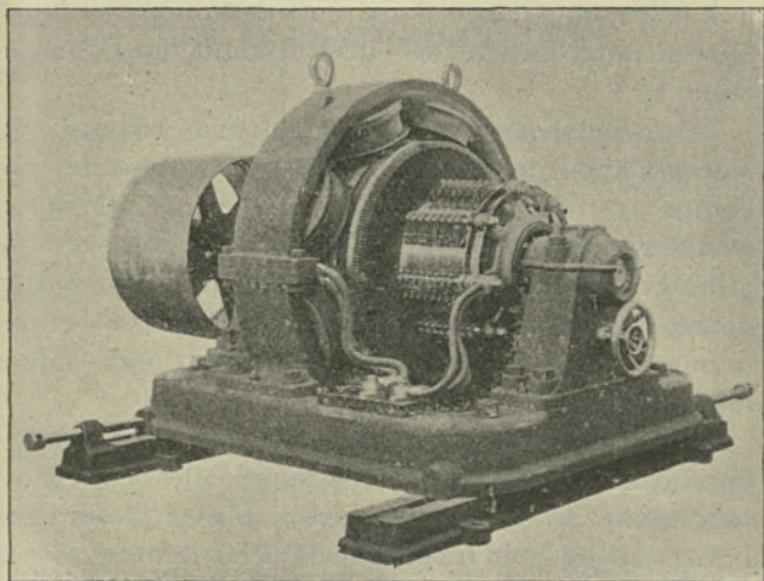


Fig. 11. — Dynamo multipolaire à courant continu.

à produire et de réduire au minimum la dépense nécessaire pour son excitation.

Avantages des machines multipolaires. — Les machines multipolaires ont l'avantage de n'exiger que de faibles vitesses angulaires pour leur fonctionnement.

Prenons en effet deux machines dynamo de même

puissance; supposons l'une bipolaire et l'autre à 4 pôles. Il est évident que si on a des électro-aimants identiques pris individuellement et des induits analogues sur les deux machines il faudra que la dynamo bipolaire tourne deux fois plus vite que sa voisine pour fournir la même puissance; en effet, l'induit de ces deux machines étant le même, un tour de la machine à 4 pôles équivaut à deux tours de la machine bipolaire au point de vue des effets produits dans l'enroulement.

Cette remarque va nous permettre de réduire considérablement si nous le voulons la vitesse des machines dynamo pour obtenir une même puissance. Doublons, triplons, etc., le nombre de pôles et nous réduisons d'autant la vitesse qui n'aura plus besoin d'être si élevée et d'atteindre 1 000 à 2 000 tours par minute, comme c'est le cas de beaucoup de dynamos bipolaires.

En réduisant cette vitesse à 200 ou 300 tours par minute nous rendons la commande de la dynamo très facile, au point de pouvoir placer l'induit sur l'arbre même de la turbine ou de la machine à vapeur en supprimant les courroies et les poulies; l'installation et l'entretien y gagnent en simplicité (fig. 23). Mais nous ne devons cependant pas perdre de vue que les dynamos multipolaires à faible vitesse sont plus chères à puissance égale que les machines à grande vitesse. Il n'y a pas de rose sans épines!... même en électricité.

MUSÉE
COMMERCIAL
LILLE

CHAPITRE II

LES TRANSFORMATEURS

Entre les appareils générateurs et les appareils d'utilisation de l'énergie électrique viennent se placer les transformateurs, dont le rôle est d'approprier le courant électrique à nos besoins.

Nous distinguerons plusieurs sortes de transformateurs :

1° Ceux qui ne changent pas la forme du courant (transformateurs de courants alternatifs à haute tension en courants alternatifs à basse tension par exemple ou, de même, transformation du courant continu de haute en basse tension);

2° Ceux qui modifient la forme du courant, par exemple les transformateurs de courants alternatifs simples ou triphasés en courant continu.

Dans la première classe nous examinerons le cas du courant alternatif, puis celui du courant continu.

1° Transformateurs de courants alternatifs. — Ces appareils sont de tous les plus simples, les plus commodes et ceux dont l'entretien est presque insi-

gnifiant. Si leur théorie est compliquée leur principe est du moins facile à comprendre, ainsi qu'on va le voir.

Principe. — Considérons une bobine de fil de cuivre recouvert de soie reliée à un appareil sensible, capable de nous déceler la présence d'un faible courant.

Nous savons que si nous approchons et si nous éloignons un aimant de cette bobine, un courant alternatif prendra naissance dans le fil qui l'entoure, ce que nous constaterons au va-et-vient de l'aiguille de l'appareil indicateur (page 2).

Au lieu d'un aimant, prenons un morceau de fer sur lequel nous enroulerons un fil de cuivre long et fin dont nous relierons les extrémités à une pile. Nous savons que dans ces conditions, le fer devient un aimant tant que dure le passage du courant de la pile; nous pourrions donc répéter avec cet aimant artificiel l'expérience de tout à l'heure et elle réussira parfaitement.

Au lieu de nous fatiguer à approcher et à éloigner les deux bobines, laissons-les à côté l'une de l'autre et établissons et interrompons le passage du courant en appuyant sur un bouton de sonnerie par exemple. Nous obtiendrons le même effet sur l'aiguille, car cela revient à faire naître et à faire disparaître l'aimantation dans la bobine d'expérience tout comme on le faisait en approchant et en éloignant l'aimant.

Si maintenant nous remplaçons la pile par une source de courant alternatif, nous obtiendrons un effet analogue; car, le courant alternatif aimante et désaimante le barreau tantôt dans un sens tantôt dans l'autre, il crée les *variations d'aimantation* dont

nous avons besoin et que nous obtenions en appuyant sur le bouton, tout va donc pour le mieux.

Le premier circuit est appelé *primaire* et celui qui est en communication avec l'appareil est le *secondaire*.

Nous retiendrons de tout ceci une chose c'est que si deux circuits fermés sont en présence, et si l'un d'eux est parcouru par un courant alternatif, il induira dans le deuxième un courant alternatif semblable ;

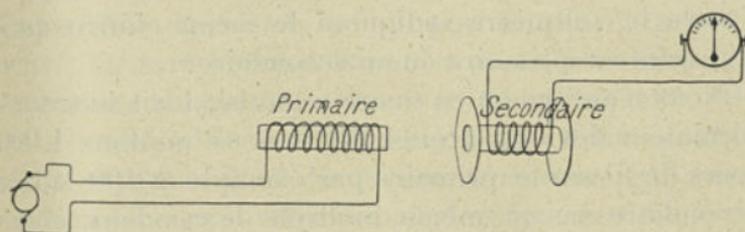


Fig. 12. — Théorie du fonctionnement des transformateurs de courants alternatifs.

cependant à première vue nous ne nous expliquons pas bien pourquoi on passe par cet appareil intermédiaire.

C'est ici que se place la question de la transformation.

Fonctionnement. — Rappelons-nous que le courant produit par induction dans un circuit possède une tension ou différence de potentiel proportionnelle à la longueur du fil enroulé.

Prenons nos deux bobines de l'expérience précédente, enroulons 100 tours de fil sur la bobine reliée à l'appareil de mesure, un voltmètre par exemple, nous lisons sur l'appareil une certaine déviation de l'aiguille que nous notons. Enroulons maintenant 1 000 tours de fil et nous aurons une déviation dix

fois plus grande. Grâce à ce procédé, nous pourrons avoir la tension qu'il nous plaira rien qu'en enroulant plus ou moins de fil. Voilà qui est commode et facile à faire.

Si nous continuons à étudier de près notre appareil de démonstration nous verrons que la longueur du fil enroulé sur le primaire influe également.

Nous remarquerons en particulier que si les deux bobines comportent autant de tours de fil l'une que l'autre le voltmètre indiquera le même chiffre qu'il soit relié au primaire ou au secondaire.

Nous n'aurons en ce cas rien gagné, mais le transformateur devient intéressant si nous mettons 1 000 tours de fil sur le primaire par exemple et 100 sur le secondaire ou un même multiple de ces deux nombres. Dans ces conditions, en reliant le primaire à une canalisation recevant du courant à 1 000 volts par exemple, on retrouvera 100 volts sur le secondaire. On a donc un moyen simple de passer de la haute à la basse tension. Il suffit en somme d'enrouler sur les deux bobines un certain nombre de tours de fil dans le rapport de la transformation à obtenir.

Analogie mécanique. — On ne peut mieux comparer cette transformation qu'à la transmission d'énergie mécanique réalisée dans une bicyclette par la chaîne et les pignons.

Près des pédales nous avons un grand pignon avec beaucoup de dents, c'est notre primaire ; sur la roue arrière, un petit pignon avec quelques dents, c'est le secondaire. Une chaîne relie entre eux ces deux pignons c'est le fer de notre transformateur.

Nous savons que la vitesse des deux pignons est transformée dans le rapport du nombre de dents.

Sur le grand pignon nous exerçons avec nos pieds un grand effort avec une vitesse modérée. Le petit pignon rend à la roue la même puissance, mais elle est transformée, nous avons une plus grande vitesse et un plus petit effort.

Dans le transformateur tout se passe d'une façon analogue. Sur un même noyau de fer nous montons deux bobines, une première bobine portant un fil long et fin faisant de nombreux tours, ce sera le primaire, une deuxième bobine portant un fil gros et court, ce sera le secondaire. La première absorbera du courant à haute tension et à faible intensité, elle transmettra cette énergie sous forme d'aimantation par le noyau de fer à la bobine secondaire qui nous rendra un courant intense mais de basse tension.

Le rapport de transformation sera celui du nombre de dents avec la bicyclette et celui du nombre de tours de fil dans notre appareil.

Les transformateurs industriels sont identiques comme principe à celui qui est représenté au bas de la

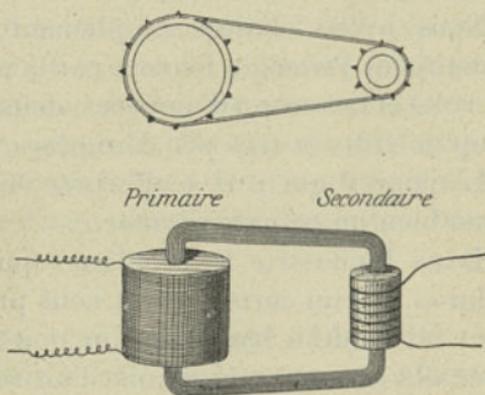


Fig. 13. — Principe des transformateurs.

quelquefois le primaire et le secondaire sont enroulés sur le même noyau de fer tout en étant séparés par de l'isolant, tel est le cas de la bobine de Ruhmkorff.

Oui, la bobine de Ruhmkorff est un transformateur,

probablement le premier en date; nous retrouvons en effet un fil gros et court, qui est ici l'enroulement *primaire*, un fil long et fin, c'est le *secondaire*.

Dans le primaire nous envoyons un courant intense et à basse tension (4 à 5 volts) fourni par quelques piles. Ce courant continu ne produira de courant dans le secondaire que s'il présente des variations, c'est pour cela que l'on met un trembleur ou interrupteur qui *hache* ce courant; les variations d'aimantation du noyau de fer doux qui en résultent font naître dans le secondaire un courant alternatif qui a une tension d'autant plus élevée que le fil de ce secondaire est plus long.

On arrive ainsi, en partant des 4 ou 5 volts que nous donne la pile, à produire des étincelles de plus de dix centimètres de longueur représentant des dizaines de milliers de volts.

Nous avons changé simplement les facteurs qui constituent l'énergie fournie par la pile; au lieu de peu de volts et beaucoup d'ampères, nous retrouvons beaucoup de volts et très peu d'ampères.

L'appareil qui sert à effectuer ce changement est donc bien un *transformateur*.

Dans l'industrie le problème qui se présente est celui-ci. En un certain point nous produisons du courant alternatif à haute tension, nous savons comment, avec des alternateurs munis d'un fil induit relativement long et fin. Ce courant que, pour fixer les idées, nous supposons être produit à la tension de 10 000 volts, est transmis par une ligne à deux fils bien isolés vers le centre de consommation, au milieu d'une grande ville par exemple. Cette haute tension de 10 000 volts, outre qu'elle est dangereuse, ne convient

pour aucun usage, en effet les lampes dont on se sert ne peuvent guère être construites pour des tensions dépassant 200 volts. Nous devons donc abaisser la tension et passer de 10 000 volts à 100 volts. C'est là que nous installerons le transformateur, vraie solution du problème : il comportera deux bobines et le rapport entre le nombre de tours de fil de ses deux enroulements devra être de 1 000; en d'autres termes cela veut dire que si nous avons 100 tours de fil sur le secondaire ou un multiple de 100, nous devons avoir 10 000 tours de fil sur le primaire ou un même multiple de 10 000.

Dans ces conditions la transformation se fera exactement comme on le désire. Bien entendu le fil du primaire pourra être pris suffisamment fin, juste assez gros pour laisser passer le courant de ligne, le secondaire qui donne du courant à basse tension fournira comme compensation une intensité 1 000 fois plus grande que celle qui traverse le primaire; il faudra donc un gros fil capable de laisser passer ce courant et de supporter son intensité. C'est ce qui explique la présence de conducteurs formés de grosses barres ou de lames de cuivre rouge sur l'enroulement à basse tension.

Description d'un transformateur industriel. —

Chaque constructeur a son modèle de transformateur, mais ils sont identiques au fond et n'offrent aucune particularité nouvelle de sorte qu'il nous suffira de décrire l'un d'eux.

La Société: *l'Éclairage électrique* en particulier, construit les transformateurs Labour, dont le noyau de fer est formé par des lames minces de fer doux de

3 à 5 dixièmes de millimètre d'épaisseur découpées en forme d'U. Ces tôles sont superposées en nombre

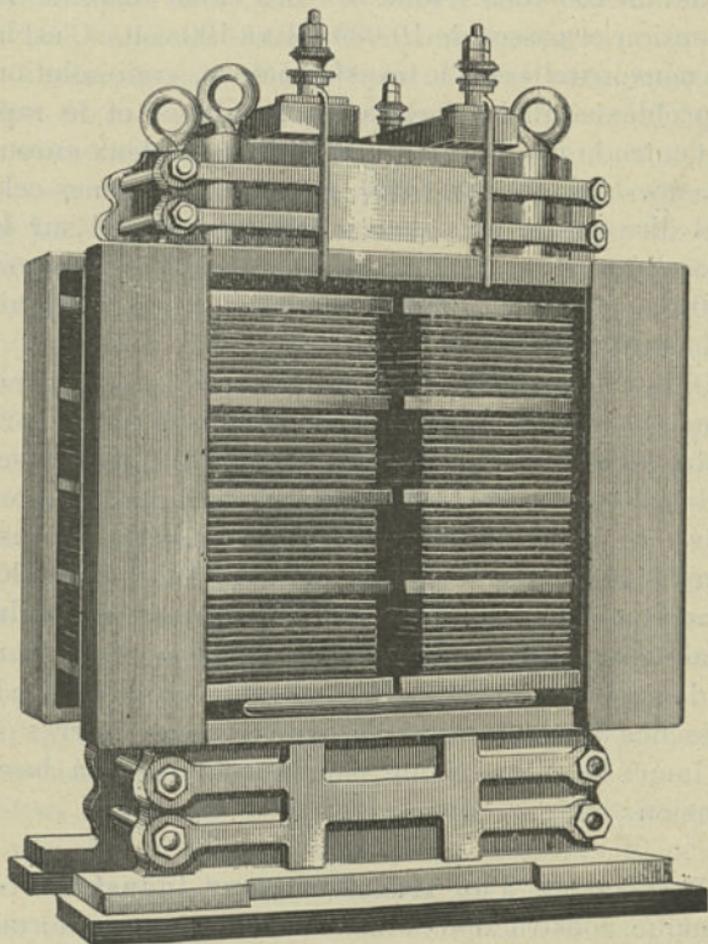


Fig. 14. — Transformateur à courant alternatif simple.

variable pour atteindre l'épaisseur suffisante ; elles sont isolées les unes des autres à l'aide d'un vernis.

Les bobines primaires et les bobines secondaires sont enroulées sur des manchons en matière isolante,

séchée et imprégnée à chaud de gomme laque et de bitume de Judée: on les enfle ensuite sur les branches de l'U.

La partie ouverte des tôles correspondant au haut des branches de l'U, est ensuite fermée de force à l'aide des tôles enfoncées par pression. De la sorte, le noyau de fer est continu et offre la forme d'un O dans lequel les variations d'aimantation se produiront aisément. Des dents ménagées sur les côtés des tôles permettent à l'air de circuler et de refroidir le fer qui s'échauffe toujours un peu pendant le fonctionnement. Cet échauffement est dû précisément à ces variations d'aimantation qui se font toujours avec un léger retard appelé *hystérésis*.

Les transformateurs sont montés sur des plaques de fonte leur servant de base; des planchettes en bois ou des plaques en porcelaine sont disposées pour recevoir les bornes, pièces en cuivre jouant le rôle de serre-fils et auxquelles aboutissent les extrémités des enroulements primaires et secondaires (fig. 14).

Jusqu'à 3 000 volts et pour les locaux abrités, les transformateurs sont seulement recouverts d'une tôle percée de trous. Les transformateurs devant fonctionner à l'extérieur et avec des tensions supérieures à 3 000 volts sont placés dans des bacs en tôle galvanisée avec ailettes extérieures pour le refroidissement et remplis de paraffine épurée fondant à 35°.

La Société l'*Éclairage électrique* est arrivée à construire des transformateurs pour 5 000, 10 000, 15 000 et même 100 000 volts, grâce à des soins minutieux apportés à l'isolement des circuits.

Transformateurs de courants triphasés en cou-

rants triphasés. -- Ces appareils sont identiques quant au principe aux transformateurs que nous venons de voir, les courants triphasés n'étant autres que 3 courants alternatifs ne se produisant pas aux

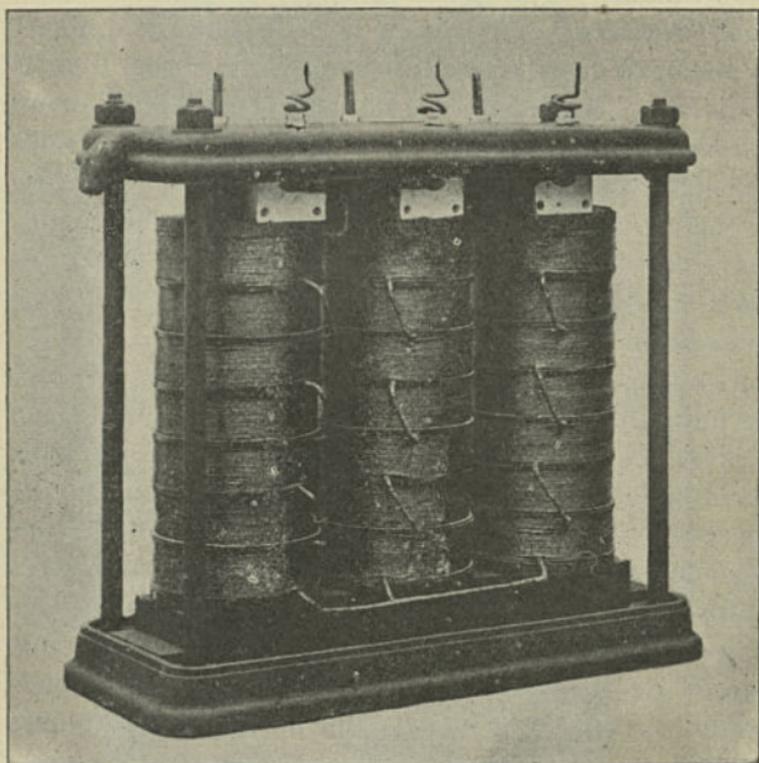


Fig. 15. — Transformateur de courants triphasés.

mêmes instants. Leur forme et leur construction ne diffèrent pas de celui de la figure précédente ; au lieu de deux colonnes il y en a trois correspondant aux trois fils, voilà tout (fig 15).

On distingue très nettement les 3 fils à haute tension et les extrémités des 3 gros fils à basse tension.

Transformateurs de courant continu en courant continu. — Ces appareils, dont l'emploi est relativement restreint vu le petit nombre de transmissions à haute tension à courant continu, reposent sur la vieille expérience de la transmission de la force à distance réalisée pour la première fois à Vienne par M. Fontaine.

Le problème qui se pose est toujours le même, nous installons près d'une chute d'eau et actionnée par elle une dynamo, non plus à courants alternatifs mais bien à courant continu produisant 1000 à 2000 volts par exemple. Nous transmettons ce courant par une ligne à deux fils au centre d'utilisation et c'est là qu'il s'agit de résoudre le problème de la transformation.

La solution est bien simple; nous savons que si nous envoyons du courant continu dans une dynamo identique à celle qui a servi à le produire, cette dynamo réceptrice va se mettre à tourner et nous aurons transmis la force inutilisable près de la chute en un point où elle nous rendra les plus grands services.

Dans le cas qui nous occupe nous voulons éclairer des lampes fonctionnant à 100 volts; nous nous servons de la dynamo réceptrice comme d'un moteur pour lui faire actionner une autre dynamo construite spécialement pour donner 100 volts.

L'ensemble des deux dynamos réceptrice à haute tension et génératrice à basse tension que l'on place généralement sur un même socle est appelé *transformateur à courant continu*.

On a surtout reproché au transformateur à courant continu d'être compliqué, cher et encombrant par suite de la réunion de deux dynamos; de plus, cet appareil est en mouvement, il exige une certaine surveillance

pour le graissage, etc. Le transformateur à courant alternatif tient au contraire peu de place, il se dissimule dans un armoire, sur un poteau, enfin il n'exige pas de soins puisque rien n'est en mouvement dans cet appareil.

Tous ces avantages, joints à la grande simplicité des alternateurs, font que le courant alternatif, abandonné dès le début aussitôt après la création de la dynamo à courant continu par Gramme a été repris avec succès pour l'éclairage d'un grand nombre de villes très éloignées de l'usine génératrice.

Un constructeur a osé tenir tête à ces procédés ancrés aujourd'hui dans la pratique industrielle, et faire avec le courant continu ce que l'on fait avec les courants alternatifs et il a parfaitement réussi. Ce constructeur n'est pas un américain comme on pourrait le croire; c'est M. Thury, de Genève. Ainsi qu'on le verra plus loin dans la description de plusieurs installations de transmission d'énergie, M. Thury, grâce à l'emploi de dynamos à courant continu admirablement construites et d'un réglage entièrement automatique, est arrivé à transmettre une puissance de plusieurs milliers de chevaux avec des installations d'une simplicité remarquable. Plusieurs de ses usines fonctionnent depuis de nombreuses années, ce qui donne la sanction de la pratique à un système que beaucoup ont critiqué.

La production des hautes tensions directement avec des machines à courant continu était un des problèmes les plus délicats à résoudre qui se présentait avec l'emploi de tels courants.

Là où beaucoup de constructeurs avaient échoué, M. Thury est arrivé à force d'ingéniosité à créer des

machines à courant continu donnant 25000 volts entre balais alors que 10 000 volts paraissaient être la tension limite que l'on pouvait appliquer sur un collecteur à courant continu.

2° Transformation de courants alternatifs en courant continu. — Un des problèmes qui a donné le plus de mal aux électriciens pour être convenablement résolu est bien celui de la transformation des courants alternatifs en courant continu.

Prenons d'abord le cas des courants alternatifs simples ; la première idée qui vient à l'esprit est de faire avec eux ce que l'on a déjà fait avec le courant continu. Nous installerons une dynamo réceptrice ou un moteur à courant alternatif, et ce moteur nous lui ferons actionner une dynamo génératrice à courant continu.

Tout cela serait très bien si on avait des moteurs à courant alternatif possédant les qualités du moteur à courant continu ; malheureusement il n'en est pas ainsi et un tel moteur reste encore à trouver. Les moteurs actuels ne démarrent pas facilement, il faut les lancer ; ensuite, si on les charge trop ils n'hésitent pas à s'arrêter, au lieu qu'un moteur à courant continu peut supporter momentanément 3 ou 4 fois sa charge sans broncher.

On pourrait presque dire du moteur à courant alternatif que « ce qu'il ne peut pas faire il le laisse », — qu'on nous passe cette expression. A cause de cela et jusqu'à présent, les transmissions à courants alternatifs simples sont peu employées pour transmettre la force à distance ; on préfère les utiliser lorsque

aucun moteur n'est nécessaire, par exemple pour l'éclairage.

Nous savons que les lampes à incandescence fonctionnent aussi bien avec du courant continu que du courant alternatif, nous avons donc avantage à employer ce dernier courant pour éclairer les villes

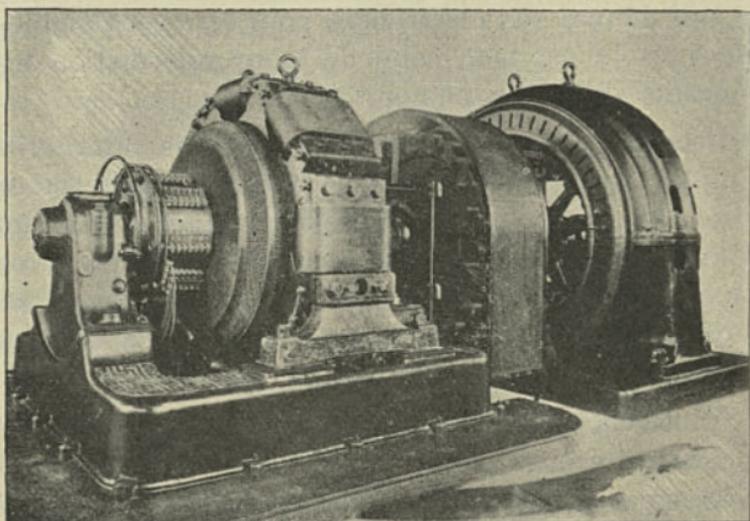


Fig. 16. — Groupe convertisseur. — A gauche, dynamo à courant continu ; à droite, moteur à courant alternatif.

éloignées de leur usine génératrice ; le courant sera transmis à une haute tension que l'on réduira à l'aide de transformateurs, si simples et si petits qu'on les loge souvent au sommet des poteaux.

Si la ville désire posséder un réseau de tramways électriques, en même temps que son éclairage, et c'est le cas de beaucoup de localités, le courant alternatif simple ne s'y prête pas à cause des mauvaises qualités de ses moteurs.

Dans ces conditions, c'est aux courants triphasés que nous devons nous adresser : car nous ne devons pas oublier que leur seule raison d'être dans l'industrie à l'heure actuelle tient précisément à ce qu'ils permettent la transmission de l'énergie à haute tension en vue de sa transformation relativement facile en courant continu à basse tension si utile pour tant d'applications.

Transformation de courants triphasés en courant continu. — Un premier moyen consiste à prendre un moteur triphasé, et il en existe d'excellents, et de l'atteler à une machine dynamo à courant continu (fig. 16), mais ce procédé qui est souvent employé, est plus encombrant et un peu plus coûteux que le système suivant :

Prenons une machine à anneau Gramme; d'un côté de l'induit nous avons le collecteur et de l'autre la poulie, tournons-nous face à la poulie et choisissons sur l'anneau trois points à 120° c'est-à-dire à égale distance sur la circonférence de cet anneau, dénudons le fil en ces 3 endroits en grattant l'isolant, puis, sur le cuivre ainsi mis à nu, soudons trois conducteurs *a*, *b*, *c*, que nous relierons à 3 bagues fixées sur l'arbre et isolées de ce dernier (fig. 17).

Si nous faisons tourner notre dynamo et si, pendant qu'elle est en marche, nous faisons appuyer 3 balais sur ces 3 bagues, l'expérience montre que tandis que la dynamo fournit du courant continu par son collecteur ordinaire on recueille des courants triphasés à l'aide des 3 balais.

Un instant de réflexion va nous montrer que c'est évident ; nous avons en effet réalisé un petit alterna-

teur à courants triphasés à 3 bobines, constituées par chacun des tiers de l'anneau Gramme ainsi partagé. Ces 3 bobines tournent et, en s'approchant des pôles de la machine, elles seront parcourues par des courants qui ne se produiront pas dans chacune d'elles en même temps mais bien successivement, tout comme dans notre alternateur d'expérience de la page 00; la seule différence est qu'avec notre machine Gramme ce sont les bobines qui tournent au lieu d'être l'aimant, mais le raisonnement n'est pas changé.

Jusqu'ici nous avons supposé que nous faisons tourner notre anneau Gramme à l'aide d'une poulie, mais nous connaissons une autre manière de le faire tourner, c'est en lui fournissant du courant continu par son collecteur ordinaire; nous savons, et c'est là l'expérience classique et historique de la transmission de la force à distance, que la machine fonctionnera en réceptrice et nous pourrons utiliser ce mouvement. Mais en même temps nous aurons aussi des courants triphasés par les 3 bagues et en somme cet appareil sera un *transformateur* de courant continu en courants triphasés.

La réciproque est vraie, car si à la machine lancée à sa vitesse nous fournissons des courants triphasés par les 3 bagues *a, b, c*, nous recueillerons sur le collecteur du courant continu, comme l'expérience le montre.

Voilà bien le transformateur désiré; il est plus simple que la combinaison d'un moteur et d'une dynamo, il peut de plus être réalisé facilement à l'aide de la première dynamo venue, pourvu que nous trouvions sur l'arbre assez de place pour caser les 3 bagues.

Cette machine a reçu le nom de *commutatrice* ; on en retrouve aujourd'hui des spécimens dans presque toutes les installations triphasées où elle sert à transformer ces courants en courant continu si précieux pour toutes sortes d'applications.

Le chemin de fer Métropolitain de Paris, les Compagnies d'Orléans et de l'Ouest ont installé des sous-stations de commutatrices en divers points de leurs réseaux pour transformer en courant continu les courants triphasés provenant des usines lointaines éta-

blies presque toutes hors Paris et en tous cas au bord de la Seine où le ravitaillement en eau et en charbon est plus facile. Ces commutatrices fournissent aux locomotives électriques le courant continu nécessaire à leur propulsion.

Exemples d'installations. — Nous ne pouvons mieux faire que de prendre comme exemple la sous-station de la gare d'Orléans (Quai d'Orsay) qui réunit

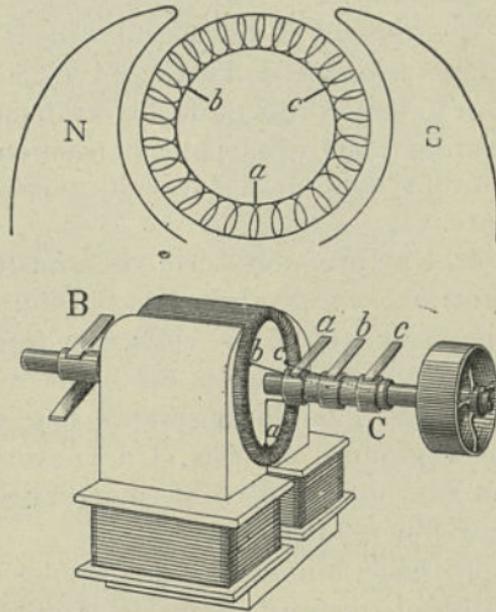


Fig. 17. — Schéma d'une *commutatrice* ou d'un transformateur de courants triphasés en courant continu.

tous les appareils de transformation que nous venons de décrire et dont nous donnons une photographie que nous devons à la *C^{ie} Thomson-Houston* créatrice de ce matériel.

Il s'agissait en l'espèce d'utiliser des courants triphasés transmis de l'usine d'Ivry sous une haute tension (5 000 volts) et de les transformer en courant continu à 500 volts pour la traction des trains et en courant continu à 110 volts pour l'éclairage de la gare.

1° Une première série de *transformateurs à courants alternatifs* abaisse la tension des courants triphasés de 5 000 à 350 volts. Ces appareils qui ressemblent à trois colonnes ou mieux à trois bornes sont situés au fond de la salle le long du mur ; il y en a deux groupes de trois. Un ventilateur placé sur le côté devant la fenêtre permet de les refroidir pendant leur fonctionnement.

2° *Deux commutatrices* à 4 pôles reçoivent par trois bagues le courant alternatif triphasé à 350 volts des transformateurs et rendent de l'autre côté, sur le collecteur, du courant continu à 550 ou 500 volts qui sert à actionner les locomotives électriques.

Ces deux machines sont visibles chacune devant son groupe de trois transformateurs.

3° *Un groupe convertisseur* formé d'un moteur triphasé recevant directement le courant à la haute tension de 5 000 volts, ce moteur actionne une dynamo à courant continu à 6 pôles, ce qui permet de transformer d'une autre manière les courants triphasés en courant continu. Ce groupe visible sur la partie droite de la figure sert de groupe de secours soit pour l'éclairage soit pour la traction.

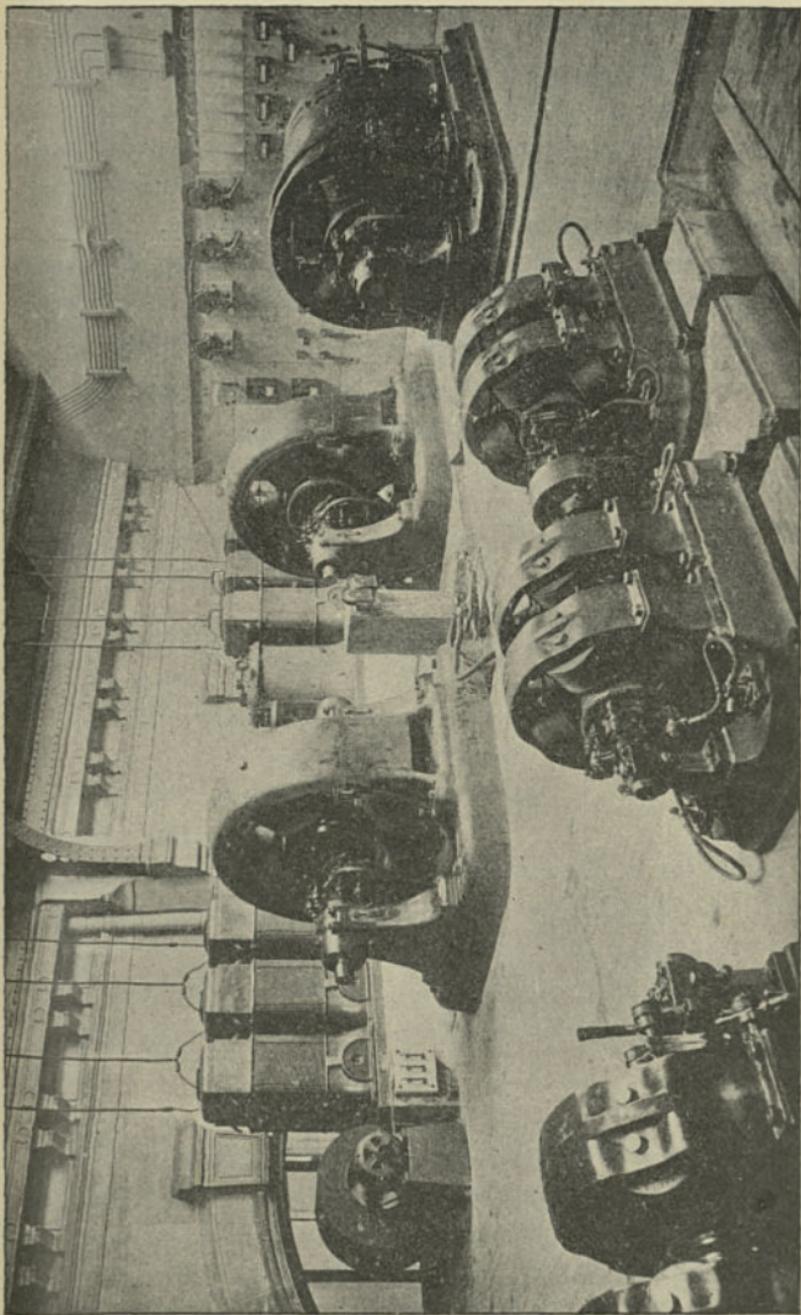


Fig. 18. — Sous-station du chemin de fer d'Orléans (gare d'Orléans-quai d'Orsay, Paris).

4° Un groupe de 4 dynamos ordinaires sert de *transformateur à courant continu* pour passer de la tension de 500 volts à la tension de 125 volts nécessaire pour l'alimentation des lampes à arc et à incandescence de la gare (voir au premier plan de la figure).

On trouvera plus loin dans cet ouvrage, à propos des chemins de fer et tramways électriques d'autres exemples de l'application des transformateurs.

CHAPITRE III

CHOIX DU COURANT SUIVANT LES APPLICATIONS

Les principales applications de l'électricité à l'industrie sont :

- 1° L'éclairage des villes ;
- 2° La transmission de la force à distance et la traction des tramways ou des trains ;
- 3° L'électrochimie.

Nous allons examiner quel doit être le choix du courant à faire pour chacune de ces industries. Le courant continu convient à toutes ces applications mais lorsque la distance devient un peu grande on est souvent obligé d'avoir recours aux courants alternatifs.

Éclairage électrique. — C'est ainsi que l'éclairage d'une petite usine ou d'une petite ville possédant près d'elle sa chute d'eau se fera facilement avec du courant continu. On emploiera au contraire le courant alternatif si la ville ou l'usine sont quelque peu éten-

dues et on n'hésitera pas si la chute d'eau se trouve à plusieurs kilomètres du centre d'utilisation.

Transmission de la force à distance et traction électrique.— Pour la traction des tramways et pour la transmission de la force en général les avis, pour le moment du moins, sont très partagés. Dès le début, alors que les distances à franchir étaient petites, on s'est servi du courant continu qui a donné entière satisfaction, puis lorsque sont apparus les courants triphasés et que les moteurs utilisant ces courants ont été suffisamment perfectionnés, certains les ont appliqués aussitôt; ils ont cependant comme le courant continu leurs avantages et leurs inconvénients.

Le courant continu permet d'obtenir des démarrages énergiques sous de lourdes charges; les courants triphasés ont pour eux leur simplicité de production et la facile construction de leurs moteurs par suite de l'absence de collecteurs à lames comme nous le verrons. Cependant la complication qu'exigent les 3 fils de transmission des courants triphasés notamment pour la traction électrique font souvent préférer le courant continu avec lequel deux fils suffisent que l'on réduit même à un seul en se servant des rails pour le retour du courant.

Comme pour l'éclairage électrique, nous aurons recours aux transmissions d'énergie par courant continu lorsqu'il s'agira de faibles distances, nous prendrons une solution mixte si le réseau devient un peu grand; dans ce cas les courants triphasés, à cause de leur facile transformation, nous serviront à franchir les grands espaces et aux points d'utilisation nous en

ferons du courant continu qui convient mieux à nos tramways ou à nos chemins de fer électriques.

Il y a cependant des exceptions, car il existe des chemins de fer électriques (ligne de la Valteline en Italie, etc.) qui fonctionnent en utilisant directement des courants triphasés. On connaît également des transmissions d'énergie à haute tension par courant continu, la Suisse nous en donne de nombreux exemples pour ne citer que le plus important de St-Maurice, à Lausanne (58 km.) par courant continu à 25 000 volts.

Ces dernières installations paraissent être la spécialité de la Compagnie l'*Industrie électrique* de Genève et c'est grâce à la patience et à la persévérance de son habile ingénieur en chef, M. Thury, que ce système s'est étendu et a conquis sa place tous les jours plus importante.

Électrochimie. — Il reste à dire un mot de l'*électrochimie*, cette science nouvelle, qui rend aujourd'hui de si nombreux services. Il est tout d'abord évident que seul le courant continu pourra être utilisé; en effet, l'électrochimie est fondée sur la propriété du courant de la pile de séparer en leurs éléments les combinaisons chimiques. C'est ainsi qu'en faisant arriver les deux fils d'une pile Leclanché ou d'un accumulateur dans un verre d'eau rendue conductrice par un peu de sel ou quelques gouttes d'acide sulfurique, on voit se dégager des bulles autour des deux fils tenant à ce que l'eau se décompose en ses deux constituants : l'oxygène et l'hydrogène.

On observe que l'oxygène se dégager au fil relié au pôle positif de la pile et l'hydrogène à celui relié

au pôle négatif. Le sens du courant influe, car si nous changeons les attaches de nos fils aux pôles de la pile le dégagement gazeux se produira toujours mais chaque gaz aura changé de fil. Si donc nous employons du courant alternatif nous aurons tantôt un gaz, tantôt l'autre à chaque fil, et en somme nous recueillerons un mélange des deux. Le but de l'électrolyse étant le plus souvent d'obtenir des produits purs on voit que nous sommes conduits à utiliser le courant continu qui nous donnera d'excellentes séparations.

Des usines monstres représentant une puissance de plusieurs milliers de chevaux ont été montées dans les Alpes en vue de fabriquer la soude et le chlore par électrolyse du sel marin ; d'autres servent à extraire l'aluminium de ses minerais : toutes utilisent du courant continu.

A côté de ces vastes usines on en trouve de non moins importantes pour la fabrication d'un produit connu de tous aujourd'hui : le carbure de calcium, qui permet d'obtenir l'acétylène simplement au contact de l'eau. Ces usines emploient des courants alternatifs, voilà semble-t-il une grosse exception à la règle. Cependant si nous suivons de près la fabrication de ce produit, nous verrons que le courant électrique n'agit pas précisément par électrolyse, mais qu'on utilise la chaleur énorme que dégage l'arc électrique jaillissant entre deux charbons non plus pour éclairer, mais pour combiner ensemble la chaux et le charbon et faire du carbure de calcium tout comme l'on fait l'acier ou la fonte dans les usines métallurgiques.

Cet appareil n'est autre que le four électrique qui

a permis à M. Moissan d'obtenir avec les hautes températures ainsi produites (environ 3600°), outre le carbure de calcium, le titane, le molybdène, le diamant et bien d'autres corps dont les minerais étaient réputés comme infusibles.

DEUXIÈME PARTIE

TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE A DISTANCE

CHAPITRE PREMIER

L'ÉCLAIRAGE DES VILLES

Les premiers essais pour l'éclairage électrique des villes sont de date relativement ancienne. Dès qu'apparurent en effet les premières dynamos industrielles de Gramme et surtout dès qu'Edison eut lancé sa lampe à incandescence, chaque ville qui possédait à proximité un moulin ou une chute d'eau songea à l'utiliser pour son éclairage. D'autres installèrent des machines à vapeur ou des moteurs à gaz mais ce ne fut que longtemps après que le signal eût été donné par la province que Paris songea à créer ses premiers réseaux publics d'éclairage.

Le secteur Edison, le premier en date, fut fondé vers 1889; il se bornait pour le début à alimenter quelques lampes à incandescence installées dans les environs du Palais-Royal.

Toutes les installations d'éclairage ou à peu près, faites vers cette époque, étaient à courant continu.

Les courants alternatifs étaient réservés à l'éclairage des phares ou pour alimenter les bougies Jablochhoff aujourd'hui disparues. Les transformateurs existaient cependant, car le premier de ces appareils industriels établi par Gaulard en 1882 fut utilisé à Londres en 1883 pour les installations électriques du Royal Aquarium.

On ne vit pas sans doute les précieux avantages qu'on pouvait en retirer et l'invention resta dans l'oubli ainsi que l'inventeur, comme c'est trop souvent le cas.

Installations à courants alternatifs. — Le transformateur réapparut plus tard sous les noms de grands constructeurs (Zipernowsky, Ferranti, Westinghouse, etc.) qui le lancèrent dans leurs installations et à partir de ce moment il prit son essor à travers l'industrie. Grâce à lui on put employer des tensions élevées de 2000 à 3000 volts ce qui permit d'aller chercher l'énergie électrique bien plus loin que ne le permettait la machine Gramme à courant continu: on installait au point d'arrivée un transformateur qui remplaçait avantageusement la dynamo en fournissant aux lampes le courant à 100 volts qu'elles demandaient. On y trouvait de nombreux avantages, d'abord un faible encombrement par suite de la disparition de la machine à vapeur du centre de la ville, ensuite plus de fumée, plus de bruit autour des maisons habitées.

La machine à vapeur existait toujours, mais comme elle se trouvait reportée à 5 ou 6 kilomètres de là, près d'un chemin de fer ou d'une rivière où le ravitaille-

ment était facile, on put donc produire le courant à bien meilleur compte.

Tel fut le cas du secteur des Champs-Élysées, à Paris. Il s'agissait en l'espèce d'alimenter des lampes disséminées un peu partout dans les nombreux hôtels de ce beau quartier. Il ne fallait pas songer à établir une usine au centre avec ses hautes cheminées déversant dans l'espace une noire fumée; on ne pouvait non plus établir des moteurs à gaz actionnant des machines Gramme ou autres, car le courant continu ainsi produit n'aurait pas eu une tension ou pression suffisante pour éclairer les lampes situées dans un rayon trop éloigné. Il n'y avait qu'un moyen : c'était de mettre l'usine hors de Paris et d'employer du courant alternatif.

C'est ce qui fut fait. L'emplacement fut choisi sur le bord de la Seine, à Levallois-Perret, à huit ou dix kilomètres du centre des Champs-Élysées.

Le charbon est amené à l'usine par bateaux et l'eau nécessaire aux machines à vapeur est puisée dans le fleuve par des pompes ; ces deux conditions, jointes au prix moins élevé des terrains, ont permis d'obtenir l'énergie à bien meilleur marché qu'au centre de Paris.

L'usine renferme plusieurs alternateurs Farcot actionnés par des machines à vapeur d'une puissance de 900 chevaux du même constructeur. Ces alternateurs n'offrent rien de particulier, les inducteurs sont constitués par des électro-aimants disposés sur la jante du volant ce qui lui donne l'aspect d'une roue dentée. Tout autour sur une couronne fixe, sont disposées les bobines induites, isolées avec le plus grand soin, vu la force électromotrice élevée qu'elles pro-

duisent. Le courant est transmis sous la tension de 3200 volts en divers points du quartier des Champs-Élysées. De ces points partent des canalisations qui suivent les rues et avenues et distribuent dans les

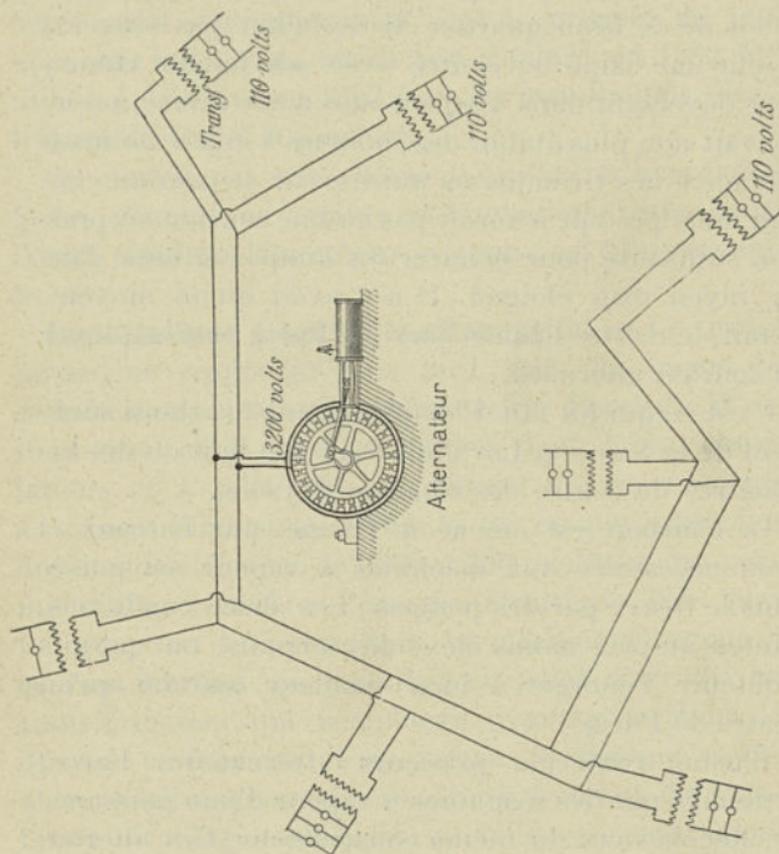


Fig. 19. — Distribution par courants alternatifs.

maisons le courant alternatif à 3200 volts. C'est dans la cave, aussitôt après l'entrée de la canalisation à haute tension, que l'on place les transformateurs dont la puissance est choisie en tenant compte du nombre de lampes que l'immeuble pourra utiliser. L'ap-

pareil est contenu dans une armoire fermée à clef, de façon à empêcher le contact accidentel d'une personne avec les fils à haute tension, contact qui serait mortel. Seuls les câbles communiquant avec l'enroulement à 110 volts du transformateur sortent de l'armoire et vont dans les appartements où ils sont reliés aux lampes à éclairer. Nous donnons ci-dessus le schéma d'un réseau d'éclairage de ce genre.

Emploi du courant continu. — L'éclairage des villes de peu d'étendue peut aussi se faire avec le courant alternatif, mais ici il vaut mieux employer le courant continu qui se prête à plus d'applications et qui donne un meilleur éclairage que le courant alternatif avec les lampes à arc.

Ce courant continu est produit à l'aide d'une ou plusieurs dynamos ; une dynamo si l'usine est petite, plusieurs si l'usine est un peu grande de façon à en avoir de réserve pour les heures et les jours de grand éclairage. Le plus souvent aussi on adjoint à ces machines une batterie d'accumulateurs que l'on charge d'assurer le service aux heures avancées de la nuit ce qui permet d'arrêter les machines. C'est là un avantage sur les réseaux à courant alternatif où les accumulateurs ne sauraient être employés et avec lesquels on est réduit à avoir constamment des machines en mouvement.

Malheureusement avec le courant continu la tension extrême d'utilisation est de 110 à 220 volts ; elle est limitée par les difficultés de fabrication des lampes à incandescence à des tensions supérieures à 220 volts et force a été de s'en tenir là. On est donc conduit à employer de gros câbles pour transmettre une plus

forte intensité et on conçoit facilement que le courant alternatif avec son facile passage d'une haute tension à la tension de 110 volts, devienne plus économique pour peu que le réseau soit étendu, car pour une même puissance il nécessite moins d'ampères et par suite moins de cuivre.

Pour certaines grandes villes, comme Paris par exemple il paraît tout naturel d'employer partout le courant alternatif.

Il n'en est rien cependant car il y a presque autant de lampes alimentées par le courant continu que par le courant alternatif. On peut se demander dans ces conditions comment la difficulté a été résolue.

En premier lieu la compagnie Parisienne d'électricité et d'air comprimé installa une ligne à deux fils à courant continu et à haute tension desservant les quartiers principaux de son secteur. Ces deux fils étaient coupés en certains endroits et en ces points on intercalait une batterie d'accumulateurs de 60 éléments. Dans la journée la batterie se chargeait et le soir elle restituait ce courant à un petit réseau local desservant tous les abonnés du quartier. C'était en somme une petite sous-station munie d'un transformateur, ce transformateur au lieu d'être *instantané* comme avec le courant alternatif était *différé* c'est-à-dire qu'il permettait de disposer de l'énergie longtemps après l'avoir reçue.

La compagnie y trouvait de l'économie puisqu'elle chargeait toutes ces batteries de quartier à la fois en les embrochant dans la ligne à courant continu à haute tension. L'intensité de charge était maintenue constante, à 250 ampères environ et la tension à l'usine variait avec le nombre de batteries en charge

elle était d'autant de fois 150 volts ($60 \times 2,5$) qu'il y avait de batteries ou de quartiers.

Cette installation fonctionna plusieurs années puis elle fut abandonnée à cause de l'entretien trop onéreux des batteries en service, on remplaça dans certains quartiers les batteries par des moteurs à courant continu qui se mirent à tourner sous l'action du courant à haute tension et qui à leur tour, actionnèrent des dynamos fournissant du courant continu à 110 volts au réseau du quartier. Ce furent de véritables transformateurs tournants qui fonctionnent encore dans quelques sous-stations.

Distribution à plusieurs fils. — Mais la solution générale à laquelle se sont ralliés tous les secteurs à courant continu de la plupart de nos grandes villes est la distribution à 3 ou à 5 fils.

Qu'entend-t-on par distribution à 3 ou à 5 fils ?

Considérons une rue très peuplée, l'artère principale d'une grande ville par exemple, supposons qu'elle soit longue et que de nombreux habitants sollicitent de la compagnie d'éclairage électrique des installations dans leur maison.

Cette dernière pourra installer deux canalisations à deux fils, une sous chaque trottoir pour desservir les abonnés situés de chaque côté.

On pourra enfin alimenter de l'usine chaque canalisation par une machine séparée, comme l'indique notre schéma.

Examinons ce qui se passera si nous réunissons à l'usine les pôles $+$ et $-$ voisins des deux machines comme l'indique la ligne pointillée.

Le courant continue à circuler dans les fils sans

56 LES GRANDES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ
 que rien ne soit changé, car nous n'avons fermé en

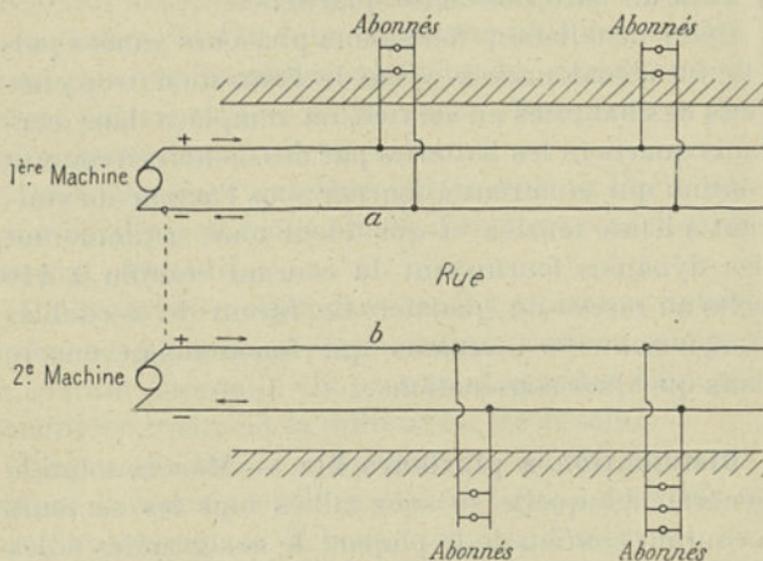


Fig. 20. — Distribution par courant continu.

somme aucun circuit, c'est une simple liaison que nous avons faite.

Un instant de réflexion va nous montrer que cette simple liaison va nous procurer une économie considérable.

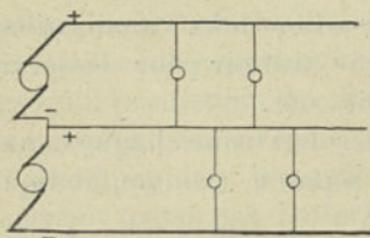


Fig. 21. — Distribution à 3 fils.

En effet, [nous pouvons carrément enlever un des fils *a* ou *b*, celui que nous voudrons à condition de relier au fil restant les abonnés qui étaient sur le fil que nous enlevons] (fig. 21).

Comme le montre le schéma, lorsque tous les abonnés ont leurs lampes allumées, ces deux fils voisins

sont parcourus par des courants de sens inverse, leur réunion ne provoquera rien de grave, car ces courants s'annuleront, s'il y a le même nombre de lampes allumées des deux côtés de la rue; ce fil devient même inutile, car il n'est parcouru par aucun courant. En fait, ce résultat n'est jamais atteint et le fil doit exister; mais il peut être pris d'un diamètre beaucoup plus faible, car il ne sert qu'à ramener à l'usine l'excédent de courant provenant d'un éclairage plus fort d'un côté que de l'autre.

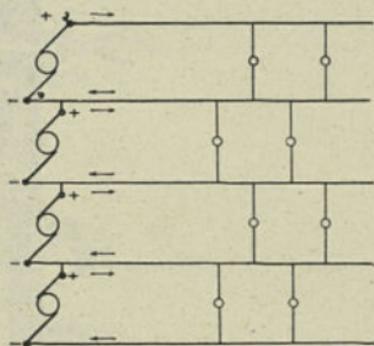


Fig. 22. — Canalisation à 5 fils.

Un tel réseau d'éclairage pourra, comme on le voit, ne comporter que 3 fils au lieu de 4 et de plus le fil central ou *compensateur*, ou *fil neutre* pourra même être choisi plus petit que les autres, de là une économie considérable avec un réseau quelque peu étendu. C'est ce système qui a été adopté en premier lieu sur le secteur Edison à Paris et y fonctionne encore.

Dans les villes de Nancy, Reims, etc., on emploie également des distributions à 3 fils par deux machines dynamo. La figure 23 représente un ensemble de deux machines multipolaires à courant continu actionnées par la même machine à vapeur, alimentant une canalisation de ce genre.

Pour desservir des quartiers très peuplés où la consommation de courant est très grande on peut monter de la même manière 4 machines et on obtient

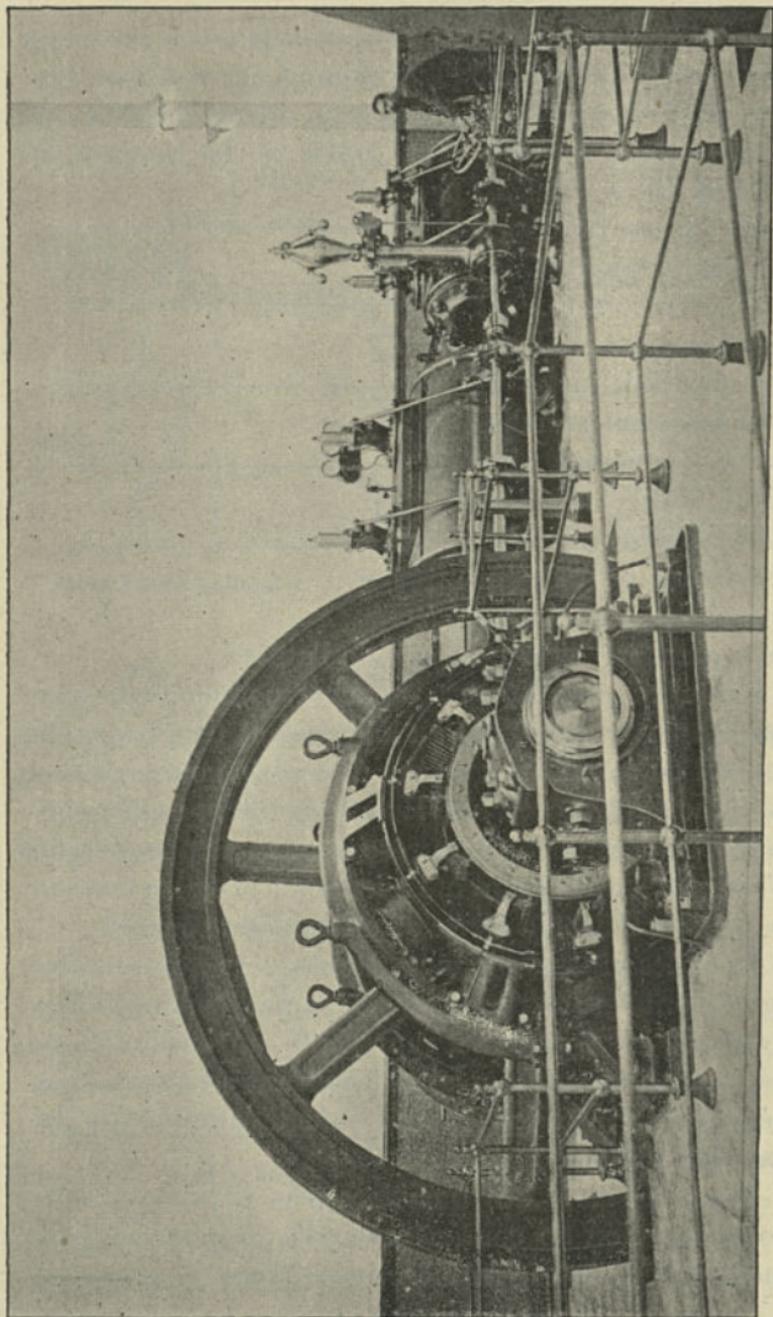


Fig. 23. — Vue d'ensemble de deux dynamos multipolaires à courant continu pour distribution à 3 fils, montées sur l'arbre d'un même moteur à vapeur.

la distribution à 5 fils. Comme l'indique notre schéma, seuls les fils extrêmes seront gros, les autres, n'ayant qu'à supporter la différence de charge des différents circuits pourront être pris beaucoup plus faibles.

CHAPITRE II

TRANSMISSION DE LA FORCE A DISTANCE LES MOTEURS ÉLECTRIQUES

La transmission de la force à distance par l'électricité, qui ne s'est généralisée que depuis ces dernières années, doit son extension aux qualités remarquables du moteur électrique, c'est donc par le moteur électrique que nous en commencerons l'étude.

En 1834, le tsar Nicolas alloua une somme de 60 000 francs au savant russe Jacobi pour l'encourager à poursuivre ses essais sur un moteur électrique de son invention.

Cette machine, très simple, se composait d'électro-aimants, attirant des palettes de fer doux disposées sur le pourtour d'une roue.

Un commutateur entraîné par l'arbre établissait le courant au moment opportun et le rompait lorsque l'effet était produit et que la palette s'éloignait de l'électro-aimant.

La source d'énergie était une pile de 128 éléments Bunsen, dont le courant, assez énergique, faisait tourner rapidement la roue à palettes à la grande admi-

ration des spectateurs. On songea, dès lors, à trouver une application à ce nouveau moteur et on l'installa avec sa batterie de piles sur un bateau. L'embarcation réussit à remonter la Néva, mais à quel prix! — Si l'on songe que les vapeurs acides qui se dégageaient de la pile étaient presque aussi intenses que la fumée du charbon on aura une idée de la grande action chimique dont elle était le siège et, par suite de la dépense qui en résultait.

En somme, les résultats pratiques étaient plutôt médiocres et les savants d'alors déclarèrent le problème aussi insoluble que la quadrature du cercle, il n'y avait, à les entendre, rien à faire de ce côté; on retrouve ces affirmations dans les ouvrages de cette époque.

Heureusement que la machine de Gramme à courant continu, eût vite fait de changer les choses, et le point de départ, on peut le dire, est la mémorable expérience de M. Fontaine à l'exposition de Vienne (voir page X). Depuis cette époque où il fut constaté que la machine dynamo-électrique à courant continu était *réversible*, c'est-à-dire qu'elle se mettait à tourner, si on lui fournissait du courant en rendant de l'énergie mécanique; depuis cette époque, disions-nous, les progrès ont été remarquables; mais avant de les analyser, examinons de près le fonctionnement en réceptrice des dynamos.

Fonctionnement des moteurs électriques à courant continu. — Reprenons la vieille expérience d'Erstedt, il nous faut pour cela, une pile, un fil de cuivre et une aiguille aimantée. L'aiguille aimantée étant librement suspendue, se dirige vers le nord

c'est le principe même de la boussole. Pendant qu'elle est dans cette direction, tendons notre fil de cuivre un peu au-dessus d'elle et dans la même direction,

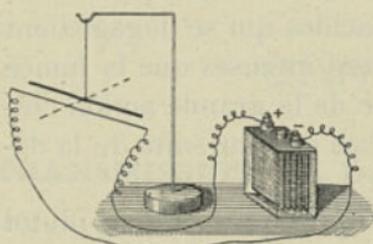


Fig. 24. — Expérience d'Erstedt.

rien d'anormal ne se passe. Relions maintenant les deux extrémités du fil aux deux pôles d'une pile ou d'un accumulateur et nous voyons aussitôt l'aiguille aimantée tourner et se mettre vivement en croix avec le courant.

Cette expérience est devenue classique et se réalise très facilement à l'aide d'une aiguille à tricoter que l'on a aimantée en la frottant avec un de ces petits aimants en fer à cheval que l'on trouve dans tous les bazars. Pour la rendre mobile, l'aiguille est suspendue en son centre par du fil à coudre assez souple et assez long pour que sa torsion n'influe pas, le fil traversé par le courant est placé en dessous (fig. 24).

Une autre expérience qui est peut-être moins classique est la réciproque de celle-ci :

Maintenons l'aiguille aimantée immobile et organisons le circuit électrique pour qu'il soit libre de se mouvoir ; en lançant un courant comme tout à l'heure l'aiguille ne pouvant se mettre en croix ce sera notre circuit qui s'y mettra et cela reviendra au même.

La seule difficulté réside dans le moyen de suspendre le fil et de le rendre mobile tout en le laissant en communication avec la pile. On y arrive assez bien cependant en constituant le circuit par une boucle suspendue par des fils très fins enroulés en

boudin afin de donner plus de souplesse à la suspension et par lesquels on fait arriver le courant (fig. 25).

Si le fil est parallèle à l'aiguille, il suffira de le faire traverser par un courant pour le voir se déplacer aussitôt et se mettre en croix avec l'aiguille.

Supposons maintenant que, tandis que ce fil est dans cette position, c'est-à-dire en croix, nous en dis-

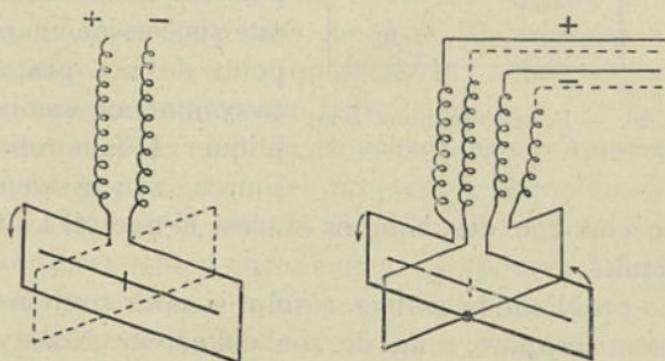


Fig. 25. — Théorie du fonctionnement des moteurs à courant continu.

posions un deuxième, toujours parallèlement à l'aiguille. Supprimons le courant dans le premier et lançons-le dans le nouveau fil, il tournera, à son tour et si on a pris la précaution de le ficeler solidement au premier et en croix avec lui, il l'entraînera dans sa rotation et le ramènera à sa première place.

Il suffira à ce moment de supprimer le courant dans le deuxième fil et de le rétablir dans le premier pour faire tourner encore le système d'un quart de tour et ainsi de suite.

Nous aurons réalisé ainsi un petit moteur électrique bien imparfait il est vrai, qui va tourner par saccades et avec lequel il faudra constamment avec un commu-

tateur approprié, faire passer le courant alternativement dans l'une ou l'autre des deux bobines.

Au lieu de deux bobines, mettons-en trois, quatre

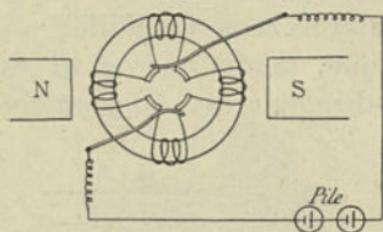


Fig. 26. — Fonctionnement d'un moteur à courant continu.

etc., nous arriverons à avoir moins d'à-coups dans la rotation puisque au lieu de deux chocs par tour nous en aurons une succession mais au point de vue pratique, ça commence à se compliquer. Il faut relier la source successivement

avec chacune des bobines et c'est là que git toute la difficulté.

Le problème se trouve résolu, si nous prenons un anneau Gramme, muni de son collecteur. Nous y retrouvons nos bobines que nous pourrons faire passer successivement devant les pôles de notre aiguille aimantée.

Au lieu d'une aiguille, il vaudra mieux prendre un aimant un peu puissant, ou même au besoin un électro-aimant qui nous donnera des attractions plus énergiques, ce seront les inducteurs de notre moteur.

Grâce au collecteur, les bobines seront mises successivement en communication avec la source au moyen des balais, et enfin un arbre solide monté sur des paliers remplacera notre trop fragile suspension (fig. 26).

Les moteurs électriques à courant continu.

Nous n'aurions rien à dire des moteurs électriques industriels à courant continu puisqu'il suffit de prendre des dynamos génératrices du genre de celles que nous avons vues et de leur fournir du courant, pour en faire des moteurs électriques. Si la construction est identiquement la même, certaines particularités sont cependant à signaler.

Comme pour les dynamos, nous aurons trois espèces de moteurs : les moteurs à enroulement inducteur en *série*, ceux à enroulement en *dérivation* ou *shunt* et ceux à enroulement *compound*. Le même induit, ou anneau Gramme pouvant être placé entre des inducteurs possédant un de ces trois enroulements aura par cela même des propriétés toutes différentes qui seront mises à profit suivant les cas qui se présenteront.

Examinons séparément le rôle et la construction de chacune des parties de notre dynamo fonctionnant en moteur.

1° Induit. — Nous avons vu que l'expérience nous conduisait à prendre un anneau Gramme muni de son collecteur et de le placer dans un champ magnétique. Bien entendu, ce champ n'est pas fourni par une aiguille aimantée très commode pour la démonstration mais trop faible industriellement.

Cet induit, comme nous le disions à propos des dynamos, est aujourd'hui construit de préférence en tambour c'est-à-dire que les fils ne sont plus enroulés

sur un anneau, mais bien sur un cylindre formé de feuilles de tôle douce juxtaposées, ce cylindre est denté, c'est-à-dire pourvu de rainures dans lesquelles on loge l'enroulement (page 18).

Un tel procédé est très avantageux, d'abord il permet de construire aisément de tout petits moteurs ce qui

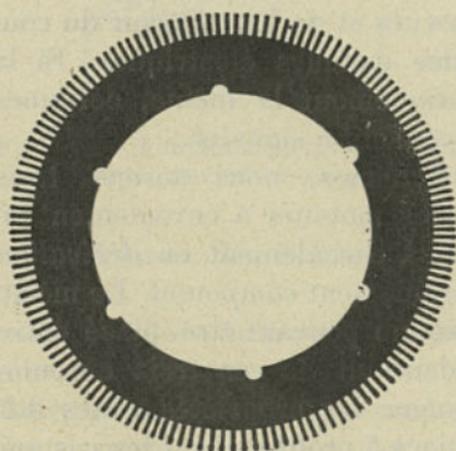


Fig. 27. — Tôle découpée pour induit denté.

serait presque impossible à obtenir avec des anneaux car plus ces derniers sont petits et plus il devient difficile de passer le fil à l'intérieur; ensuite il réalise un montage plus mécanique, il suffit en effet de claver les feuilles de tôle sur l'arbre même de la dyna-

mo ou du moteur, de les serrer avec des boulons pour avoir un ensemble solide que l'on peut mettre aisément sur le tour. Bien entendu les feuilles de tôle (4 à 5 dixièmes de millimètre d'épaisseur) doivent être séparées entre elles par du papier ou une couche de vernis à la gomme laque ceci pour éviter les courants de circulation parasites appelés *courants de Foucault*.

Le cylindre bien tourné sera pourvu de rainures ou en pratique autant qu'il doit y avoir de bobines ou de lames au collecteur. Pour les gros moteurs on emploie des tôles découpées d'avance à l'emporte-pièce avec leurs dentures, il ne reste plus qu'à les

mettre en regard et à égaliser à la lime ou à la fraise les rainures ainsi constituées. Ceci a une grande importance car les bavures ou parties saillantes pourraient couper l'isolant des fils et déterminer des court-circuits ou pertes locales de courant (fig. 27).

Afin de mieux isoler l'enroulement de la masse de fer on dispose dans la rainure une bande souple de toile huilée préparée spécialement dans ce but; ensuite, dans l'auget ainsi ménagé, on enroule le fil de cuivre recouvert de coton comme il est indiqué sur la figure (page 19).

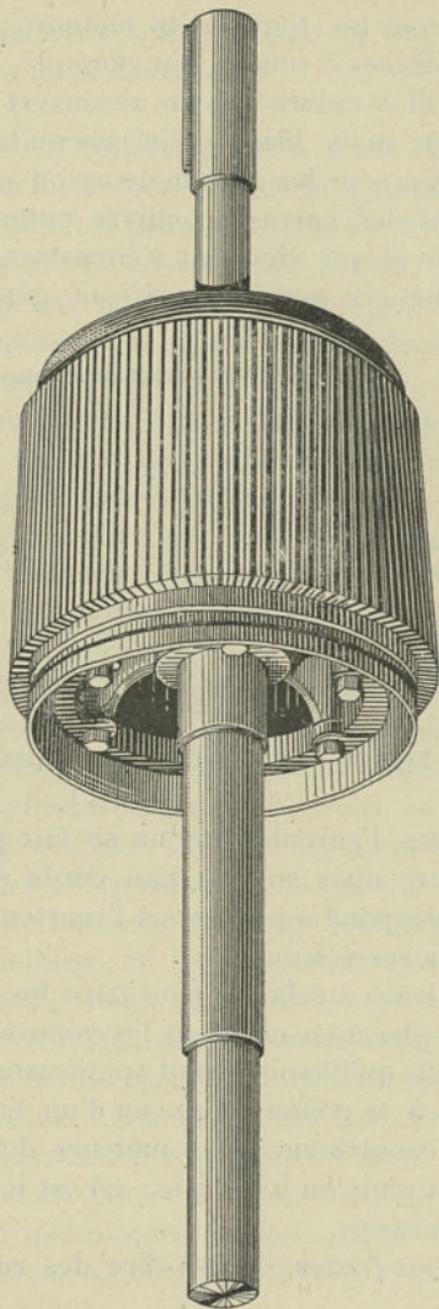


Fig. 28. — Induit denté prêt à recevoir son enroulement.

Pour les tout petits moteurs de ventilateurs, de machines à coudre, par exemple, on préfère employer du fil de cuivre très fin, recouvert de soie, isolant plus cher, mais bien moins encombrant que le coton. Enfin pour les gros moteurs on emploie le plus souvent des barres de cuivre entourées de bandes de toile et qui viennent s'encaster dans les rainures. Pour ces moteurs, qui sont généralement multipo-

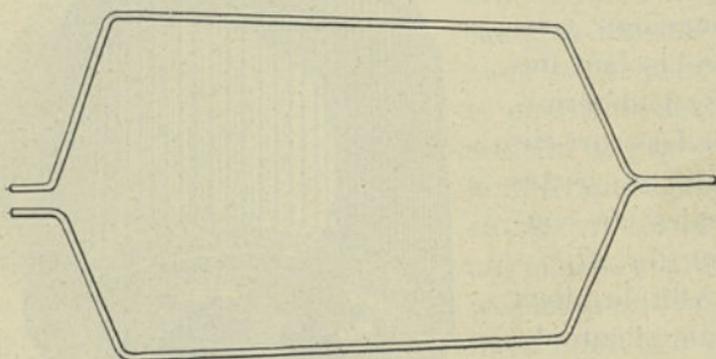


Fig. 29. — Spire préparée d'avance pour induit denté.

lares, l'enroulement ne se fait pas suivant un diamètre mais suivant une corde dont l'arc embrassé correspond à peu près à l'écartement de deux pièces polaires voisines.

Grâce à cela, on peut faire les bobines d'avance et les placer ensuite dans les rainures. Les enroulements quels qu'ils soient sont soigneusement enduits de vernis à la gomme laque ou d'un enduit spécial à base de caoutchouc si les moteurs doivent rester exposés à la pluie ou à la boue ; tel est le cas des moteurs de tramways.

Des *frettes*, c'est-à-dire des rubans d'acier ou de

• fils de laiton maintiennent l'enroulement et s'opposent aux effets de la force centrifuge.

2° Collecteur. — Le collecteur est la pièce vitale du moteur électrique aussi bien que de la dynamo et on peut dire que si ce n'est pas sur lui que s'exercent les attractions et les efforts, c'est tout de même l'âme de la machine. Rappelons qu'il est constitué par une série de lames disposées en cylindre et isolées les unes des autres tout en restant très voisines. Ces lames captent le courant qui arrive par les balais et le distribuent dans l'induit; c'est pour la dynamo ce que le tiroir est à la machine à vapeur.

On les constitue aujourd'hui par des coins en cuivre dur étiré dont l'inclinaison est calculée pour former par la réunion d'un certain nombre de ces lames un cylindre parfait.

Entre chaque lame on introduit une ou plusieurs feuilles de mica de façon à avoir au moins un millimètre d'écartement. Les coins sont maintenus assemblés en forme de cylindre à l'aide d'écrous et de contre-écrous comme le montre la figure 30. A cet effet l'arbre de la dynamo est pourvu d'une portée sur laquelle on vient faire buter le collecteur tout monté qu'une clavette immobilise. Si nous retirons la clavette et le collecteur, il nous suffit de desserrer un contre-écrou et un écrou EE, d'enlever une rondelle de bronze R et une rondelle isolante en ébonite, fibre ou micanite pour avoir les lames ou coins L. Comme on le voit, l'isolant des rondelles II pénètre dans les coins et les maintient en place en même temps qu'il les isole de la masse métallique; on voit également qu'un serrage des écrous a pour effet de faire rentrer

les coins et par conséquent de maintenir les lames solidement serrées.

C'est ce montage qui est aujourd'hui universellement employé.

Nous insisterons sur quelques points particuliers

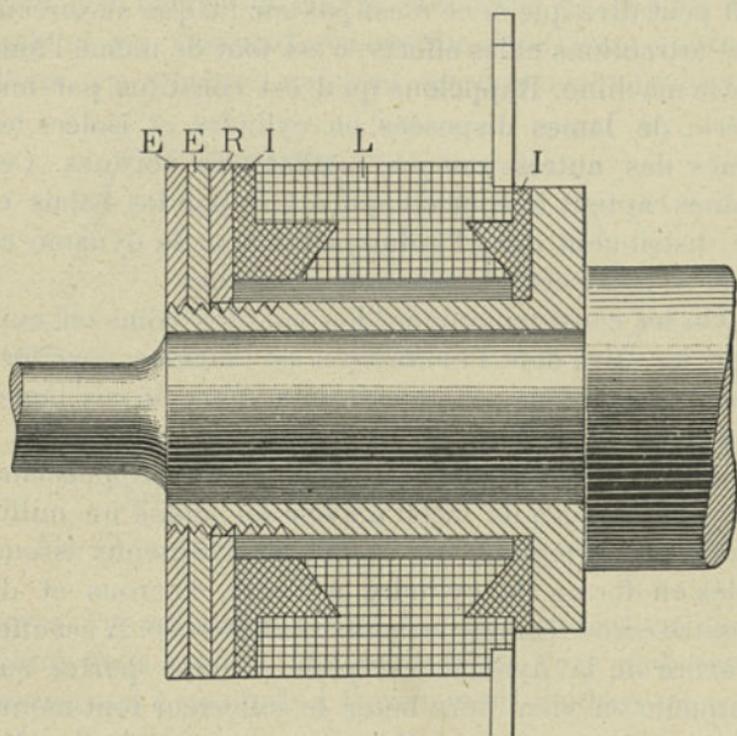


Fig. 30. — Coupe d'un collecteur.

aux moteurs ; en premier lieu, il convient de n'employer avec des balais en charbon que des collecteurs isolés au mica ; on a fait usage autrefois de carton comprimé ou de fibre dont l'emploi est à rejeter, ces matières se carbonisant par les étincelles ; ensuite il faut éviter l'accès de l'huile sur le collecteur, ce qui peut se produire dans les moteurs qui sont en général

bien moins surveillés que les dynamos et plus exposés ; on peut employer dans ce but une rondelle mince que l'on serre entre l'écrou et le contre-écrou et dont le rôle sera de chasser les gouttes d'huile qui pourraient venir du palier en glissant le long de l'arbre ; dès que cette huile arrive sur la rondelle, la force centrifuge l'amène sur les bords d'où elle ne tarde pas à être projetée.

3° **Balais.** — Nous arrivons maintenant à la question bien délicate des balais. Tout d'abord les premières dynamos ont fait usage de balais métalliques constitués par de la toile de cuivre rouge soigneusement pliée ou des lames minces de clinquant ; on les a également appliqués aux moteurs électriques, mais sans succès, car le moteur électrique doit pouvoir tourner aussi bien en avant qu'en arrière, sur les tramways par exemple, et il ne faut plus songer aux balais métalliques, qui ne supportent pas du tout la marche à rebrousse-poil. Le balai en charbon constitué au début par des lames de charbon de cornue se logeant dans les anciens porte-balais, est aujourd'hui utilisé sous forme de pains qu'une pince montée sur charnière et munie de ressorts vient appuyer sur la surface bien lisse du collecteur.

Mais il y a balais et balais.

Toutes les espèces ne conviennent pas ; certains de ces pains s'effritent rapidement, noircissent le collecteur et l'abîment, d'autres glissent sans bruit et peuvent rester des années sur le même collecteur, comme nous en avons vu, sans usure appréciable.

La pratique montre que le balai doit être en charbon très conducteur, bien aggloméré, contenant même

du *graphite*; la présence de ce corps est très avantageuse car c'est une sorte de lubrifiant qui remplace le frottement trop sec des balais en charbon de cornue par un frottement plus gras. C'est avec des balais de ce genre que nous avons pu faire fonctionner pendant plusieurs années des moteurs soumis à de continus à-coups tandis que d'autres semblables munis de mauvais balais exigeaient un fréquent remplacement de ceux-ci et parfois même le repassage du collecteur sur le tour.

Il est nécessaire, en effet, de faire remarquer que le bon fonctionnement des balais en charbon sur un collecteur exige un excellent état de ce dernier. Il faut que le collecteur soit absolument rond; on doit donc avant de mettre les balais en charbon pour la première fois le tourner s'il ne l'a pas été. Cette pièce qui est en cuivre rouge exige qu'on emploie pour exécuter ce genre de travail un outil qui coupe bien, on doit prendre peu de métal à la fois et marcher à grande vitesse, sinon l'outil s'accroche et détériore le collecteur.

Tous ces menus détails, dictés par la pratique, font du moteur électrique, lorsqu'ils sont observés un excellent auxiliaire marchant des années presque sans entretien. Ces considérations ont leur avantage maintenant qu'il est prouvé combien il est plus économique de remplacer les vieilles transmissions dans les ateliers par des moteurs électriques installés sur chaque machine-outil; nous y reviendrons du reste un peu plus loin.

Force contre-électromotrice. — Avant de décrire les divers systèmes de moteurs à courant continu et

afin d'en mieux comprendre les qualités, nous dirons quelques mots de la force contre-électromotrice à laquelle le moteur électrique doit sa souplesse et tous ses avantages.

Considérons un anneau Gramme tournant entre les deux pôles d'un aimant sous l'action du courant qui lui arrive par deux balais et qui sera fourni par une source extérieure, des accumulateurs par exemple.

Cet anneau tourne à une certaine vitesse, 1 000 tours par minute par exemple ; pendant qu'il est ainsi lancé, coupons le courant et relions les deux balais à un voltmètre ou un appareil propre à déceler le courant. Quel ne sera pas notre étonnement de voir l'appareil de mesure dévier et indiquer la présence d'une certaine tension électrique. D'où provient-elle, puisque notre machine n'est plus en communication avec la source ?

Un instant de réflexion va nous montrer qu'il ne saurait en être autrement ; en effet, notre anneau lancé à 1 000 tours par minute continue à tourner par la vitesse acquise ou mieux, ce qui est plus scientifique par sa force vive ou énergie cinétique ; quelle que soit l'origine de son mouvement, il tourne dans un champ magnétique et nous savons que cela suffit pour qu'il développe du courant lorsqu'on réunira ses balais par un conducteur. Donc, que notre anneau Gramme soit actionné mécaniquement ou électriquement, une force électromotrice prend naissance entre ses balais lorsqu'il se déplace dans un champ magnétique.

Cette tension est appelée force contre-électromotrice dans notre cas particulier, parce qu'elle tend à fournir un courant s'opposant au mouvement.

Le fait est facile à vérifier :

Lançons encore notre anneau à grande vitesse, la plus grande possible, par des accumulateurs, une courroie, ou autrement, puis réunissons brusquement les deux balais par un fil métallique; que va-t-il se passer?

Une gerbe d'étincelles sous les balais, un grognement sourd, et le moteur s'arrête... *net* au grand étonnement de ceux que nous aurons conviés à cette expérience.

C'est le freinage électrique; notre moteur lancé à vide aurait mis plusieurs minutes à s'arrêter dans les conditions ordinaires, à condition toutefois qu'il soit bien graissé et que ses balais soient peu serrés. Le fait de réunir les balais en court-circuit (1) équivaut presque à mettre un *bâton dans les roues* et on le comprend facilement. Le moteur fonctionne à ce moment en génératrice, grâce à la force contre-électromotrice qu'il développe et comme on lui fait fournir un courant très intense, en réunissant les balais par un fil conducteur, la puissance ainsi obtenue est empruntée au système même qui s'arrête aussitôt car cette énergie est vite épuisée. De tout ceci il suffira de retenir que tout moteur électrique en mouvement est le siège d'une force contre-électromotrice tendant à produire un courant qui s'oppose au mouvement de la machine.

(1) On appelle *court-circuit* toute communication franche entre les deux pôles d'un générateur électrique.

Différents systèmes d'excitation des moteurs.

I. **Moteur série.** — Le moteur série doit son nom au mode particulier d'enroulement de ses inducteurs qui sont pourvus d'un fil gros et court traversé par le courant total et pour cela relié *en série*, c'est-à-dire à la suite de l'induit.

La figure ci-dessous en est le schéma le plus simple; on reconnaît facilement l'induit figuré par son collecteur sur le-

quel frottent deux balais, les inducteurs sont réduits à leur plus simple expression, un noyau de fer supportant une bobine enroulée de

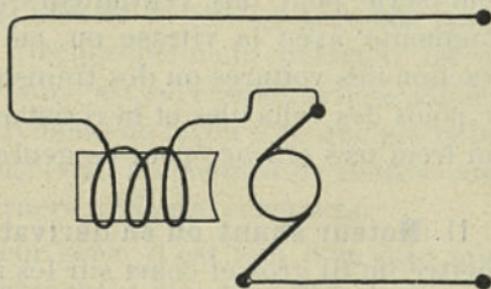


Fig. 31. — Moteur série.

fil gros et court. Ce système, peu employé sur les dynamos génératrices, est au contraire en grande faveur sur les moteurs électriques. La traction électrique en particulier n'utilise guère que des moteurs de ce genre; nous en examinerons donc les avantages et les inconvénients.

Avantages. — Le moteur série est robuste et économique à cause de la solide et facile construction de son enroulement; il se prête aux démarrages car il peut être traversé par un courant très intense et fournir une puissance 3 à 4 fois plus grande que celle

pour laquelle il a été construit, à condition toutefois que ces à-coups soient de courte durée et peu fréquents. Enfin il y a rarement des étincelles au collecteur car la ligne neutre est toujours bien définie.

Inconvénients. — Ce moteur s'emballe lorsqu'on le laisse marcher à vide, cela tient à ce que lorsqu'il tourne vite la force contre-électromotrice tend à devenir très grande ; le courant qui traverse le moteur est diminué et par cela même l'excitation, l'induit n'étant plus retenu par un champ magnétique puissant prend aussitôt des vitesses inquiétantes.

On remédie à cet inconvénient en réservant le moteur série pour des ventilateurs dont la puissance augmente avec la vitesse ou en l'appliquant à la traction des voitures ou des trains car on est sûr que le poids des véhicules et la résistance de l'air seront un frein très efficace pour ce genre de moteur.

II. Moteur shunt ou en dérivation. — Au lieu de mettre un fil gros et court sur les inducteurs, faisons l'inverse, c'est-à-dire enroulons un fil fin et long sensiblement de même poids de cuivre ; ce fil, vu sa finesse ne laissera passer que très peu de courant ; nous relierons ses deux extrémités aux balais du moteur.

Les propriétés du moteur seront de ce fait changées et vont devenir tout autres ; nous examinerons comme pour le moteur série quels sont les avantages et les inconvénients de cette disposition.

Avantages. — Le fil fin recevant directement le courant de la canalisation, puisqu'il lui est relié sans avoir à traverser l'induit, sera parcouru par un courant sensiblement constant ; nous supposons pour cela que l'usine maintient sur le réseau une tension

constante de 110 volts par exemple, comme c'est le cas des installations d'éclairage. Le courant d'excitation étant constant, le champ magnétique qui en résulte le sera aussi; il s'ensuivra que le moteur tournera à *vitesse constante*.

Pourquoi à une vitesse constante ?

Parce que nous savons que si nous faisons tourner ce même moteur shunt à l'aide d'une courroie de façon à en faire une dynamo génératrice et si la vitesse que nous lui donnons est constante il fournira un courant constant dans ses inducteurs qui se traduira par une force électromotrice sensiblement constante comme il est aisé de le vérifier avec une lampe à incandescence. Réciproquement, puisqu'il est démontré qu'une dynamo est réversible, si nous alimentons cette même dynamo de façon à ce que ses inducteurs et l'induit reçoivent un courant de tension constante, l'induit tournera à vitesse constante.

Si dans le moteur série il est loin d'en être ainsi c'est que l'induit absorbant plus ou moins de courant suivant sa charge, les inducteurs subissent les mêmes variations qui se traduisent par une vitesse très irrégulière de la machine.

Nous aurons donc avec le moteur shunt une vitesse toujours la même, qu'il soit en charge ou à vide, car peu importe aux inducteurs le courant qui traverse l'induit; c'est là ce qui caractérise le moteur shunt ou en dérivation.

Inconvénients. — Le moteur shunt est plus cher que le moteur série car le fil fin est plus cher que le gros fil à poids égal, l'enroulement est également plus volumineux et devient difficile à caser dans les

moteurs de traction dont on cherche réduire le plus possible l'encombrement.

L'enroulement à fil fin est de plus assez fragile, surtout avec des moteurs marchant sous une haute tension ; il demande un isolement beaucoup plus soigné.

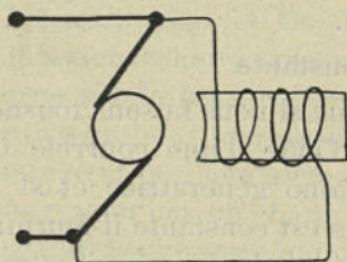


Fig. 32. — Moteur shunt.

Quoiqu'il en soit, chaque système de moteur a son bon et son mauvais côté et on doit les appliquer judicieusement.

Le moteur shunt, à cause de sa vitesse constante, sera excellent pour actionner des machines-outils qui ne doivent ni s'emballer à vide, ni ralentir en charge ; telles sont les machines à fraiser, à percer, à mortaiser, à raboter, les scies à ruban, les tours, etc. etc., nous verrons plus loin comment on peut en modifier la vitesse en vue de l'adapter au travail à effectuer ; mais il faut en général qu'une fois la vitesse réalisée, cette dernière ne varie pas tant que le travail n'est pas terminé.

Moteur compound. — Associons le moteur série et le moteur shunt, nous aurons le moteur *compound*, c'est-à-dire composé qui aura sensiblement les avantages réunis de nos deux systèmes ; le schéma montre bien comment se fait la réunion ; sur les inducteurs nous avons deux bobines, une bobine à gros fil parcourue par le courant total, une bobine à fil fin recevant directement le courant de la canalisation et par conséquent indépendant de celui que peut absorber l'induit.

Ce moteur aura l'avantage de démarrer énergiquement, ses deux enroulements et l'enroulement série en particulier contribuant à faire tourner l'induit ; ensuite sa vitesse sera presque constante, elle aura une tendance à diminuer légèrement avec la charge par suite de la prédominance de l'enroulement à gros fil traversé par un courant plus intense, ce qui peut renforcer l'excitation, mais en pratique ce sera ignifiant.

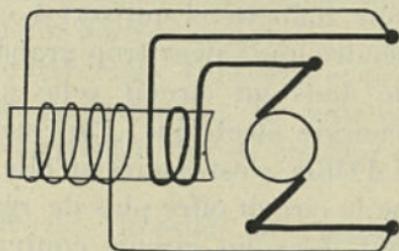


Fig. 33. — Moteur compound.

Le seul inconvénient est la complication et ensuite la difficulté de loger et de protéger l'enroulement à fil fin lorsque l'on utilise des tensions de 4 ou 500 volts et que le moteur est un peu petit.

Appareils de mise en marche et de réglage. — Un moteur électrique à moins qu'il ne soit très petit (moteur de machine à coudre ou de ventilateur) ne peut être mis sans danger directement sur une canalisation d'éclairage par exemple.

Pas plus que pour mettre en marche une machine à vapeur on n'ouvre brutalement la valve donnant accès à la vapeur, pas plus on n'enverra brusquement le courant dans un moteur électrique. On court le risque d'abîmer le moteur d'abord et de provoquer ensuite un à-coup sur la canalisation et les lampes qu'elle alimente par suite de l'afflux subit de courant.

L'appareil que l'on intercale et qui sert à régler

l'admission du courant ainsi que la vitesse du moteur n'est autre qu'un rhéostat. Rappelons qu'un rhéostat consiste en une résistance électrique que l'on peut diminuer ou augmenter progressivement à l'aide d'une manette et qui sert à empêcher le courant de prendre une valeur trop grande. Nous savons en effet que dans un circuit relié à une source constante d'énergie électrique, l'intensité du courant obéit à la loi d'Ohm, c'est-à-dire qu'elle est d'autant plus petite que le circuit offre plus de résistance. Mettre un rhéostat dans un circuit équivaut donc à étrangler la canalisation comme le ferait un robinet sur une conduite d'eau.

Les rhéostats sont formés soit de fils en un métal très résistant, le maillechort par exemple, soit simplement d'un récipient plein d'eau rendue légèrement conductrice par du sel ou du carbonate de soude et dans laquelle on plonge plus ou moins des plaques de fer ou de plomb reliées au circuit dans lequel on veut faire varier la résistance. Dans le premier cas on obtient une variation en intercalant plus ou moins de fil de maillechort dans le circuit, dans le second en enfonçant plus ou moins les lames.

La forme des rhéostats varie à l'infini, on les fait aujourd'hui en matière incombustible car il arrive bien souvent que le courant qui les traverse fait rougir les fils, surtout s'ils sont trop fins. Ces fils enroulés en boudin pour tenir moins de place sont tendus sur des poulies en porcelaine passées dans des boulons, ils communiquent entre eux comme l'indique la figure 34. Un socle en marbre ou un cadre en fonte supporte les boulons ainsi qu'un commutateur formé d'une série de touches ou *plots* sur lesquels vient

frotter une lame que l'on manœuvre par une poignée.

Les plots étant reliés aux différents boudins, on voit que le rôle de la lame sera de se mettre en communication avec tel ou tel boudin qu'on désire et par suite d'en intercaler plus ou moins dans le circuit. Une cage ou un grillage métallique enveloppe l'appareil et protège les boudins des chocs ou du contact des matières combustibles tout en permettant à l'air de circuler et de les refroidir.

Le deuxième système de rhéostat ou rhéostat liquide permet des variations très lentes et même imperceptibles car on peut à l'aide d'une vis par exemple régler l'enfoncement de la partie métallique immergée aussi lentement que l'on veut. Il est très employé et se généraliserait si l'évaporation de l'eau d'une part, son électrolyse et la variation de concentration du sel qui en résulte d'autre part, n'en faisaient un appareil peu comparable à lui-même et inconstant ce qui n'est pas le cas avec un rhéostat métallique.

Changement de marche. — Dans bien des circonstances on peut avoir à inverser la marche d'un moteur, sur un tramway ou une locomotive électrique par exemple on doit pouvoir marcher en avant ou en arrière. La chose est obtenue très facilement car il suffit d'inverser le courant dans l'induit ou l'inducteur. En l'inversant dans l'inducteur on change les pôles des électro-aimants qui de nord deviennent sud et réciproquement, le sens de l'attraction sur l'induit est donc aussi changé.

Nous donnons un schéma du montage d'un moteur, série pouvant fonctionner en avant et en arrière à l'aide d'un inverseur. Il sera très facile de suivre les

communications. Le courant est tout d'abord obligé de traverser le rhéostat de démarrage, que l'on intercale dans le circuit à l'aide de la manette lorsqu'on veut mettre le moteur en marche; il traverse ensuite

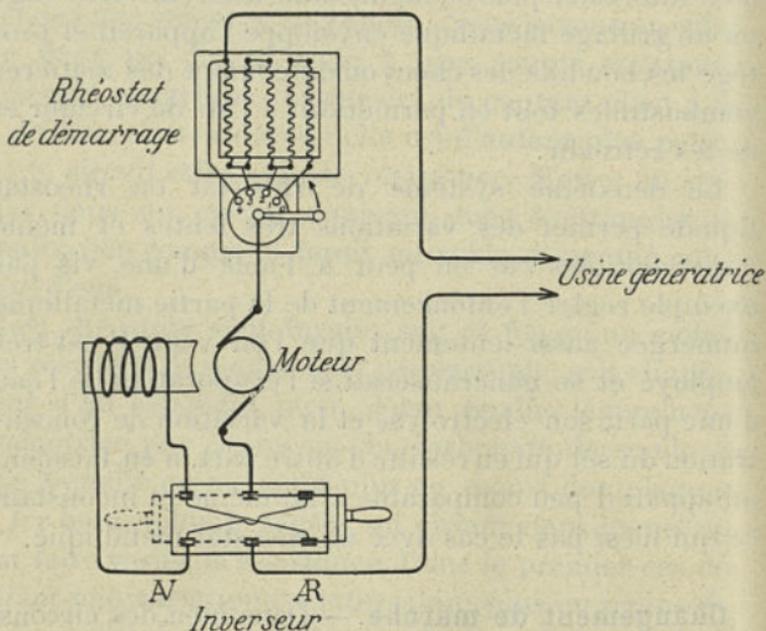


Fig. 34. — Appareils de mise en marche d'un moteur.

l'induit puis se rend à l'inducteur en passant par l'inverseur, suivant que la manette de cet appareil est dans la position *avant* ou *arrière* le courant entre par un des fils ou par l'autre des bobines inductrices, il retourne ensuite à l'usine génératrice. Les manœuvres à faire sont les suivantes.

1° S'assurer que l'inverseur est dans la position de marche que l'on désire, avant ou arrière;

2° Tourner ensuite progressivement et lentement la manette du rhéostat de démarrage de façon à établir

le courant au travers de toute la résistance d'abord, puis au travers d'un moins grand nombre de boudins à mesure que la vitesse du moteur s'accélère jusqu'au moment où la manette étant à fond de course le moteur reçoit directement le courant de la ligne.

Pour arrêter ramener vivement la manette au zéro ou point de départ.

Avec les moteurs shunt et compound, la disposition est absolument analogue, la seule précaution à prendre est de relier l'enroulement à fil fin directement aux fils d'arrivée du courant de façon à laisser le rhéostat de démarrage et l'inverseur, si on en emploie un, intercalés avant l'induit. Cette façon d'opérer permet de démarrer à pleine excitation c'est-à-dire avec le courant normal d'excitation qui ne doit pas être affaibli par un rhéostat, seul l'induit doit être pourvu de cet appareil. Il faut de plus avoir bien soin de ne jamais interrompre le courant d'excitation en marche car la machine peut s'emballer et un accident grave peut en résulter.

Conclusions. — Le moteur électrique à courant continu est arrivé aujourd'hui à un degré suffisant de perfection pour en permettre l'adaptation à la commande de toute sortes de machines. Les constructeurs l'ont rendu robuste en enfermant ses parties délicates dans une cage en fonte et en créant ainsi le moteur type *blindé*. La figure 35 représente un moteur de tramway de ce genre monté sur l'essieu qu'il actionne par engrenages. La carcasse qui supporte les bobines inductrices s'ouvre en deux pièces comme une coquille ce qui permet de visiter l'intérieur. D'autres constructeurs par d'habiles artifices sont arrivés à en faire

varier la vitesse dans de larges limites tout en la maintenant constante quelle que soit la charge et pour chaque cas particulier.

Il y a cependant des limites qui tendent à circonscrire le développement du moteur à courant continu,

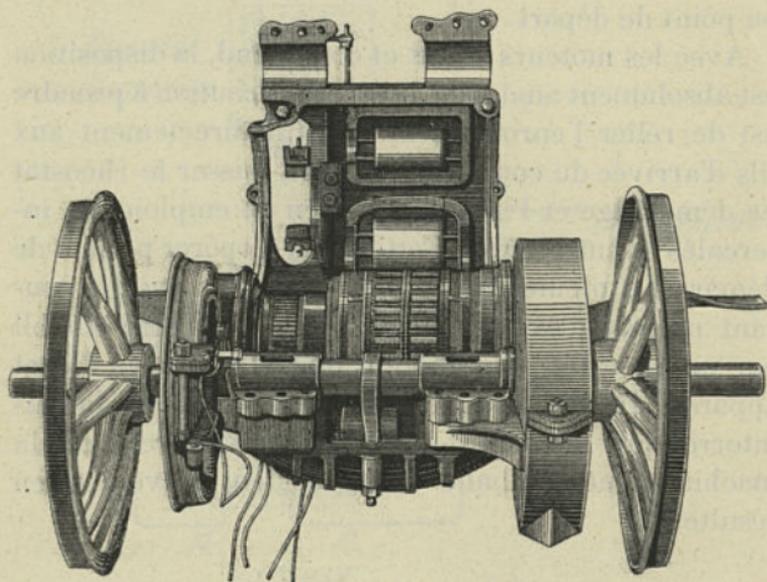


Fig. 35. — Moteur de tramway électrique monté sur l'essieu.

cette limite est donnée par la tension maxima que l'on peut lui appliquer. La plupart des constructeurs n'osent pas dépasser 500 volts, un seul M. Thury arrive à faire depuis plusieurs années des moteurs industriels marchant à 1 000 volts et tout porte à croire qu'il ne s'arrêtera pas là.

La transmission de l'énergie à grande distance exige, nous l'avons vu, pour être économique des tensions de plus en plus élevées. Avec le courant con-

tinu c'est le collecteur qui est un obstacle à l'élévation de cette tension, en effet comme il est constitué par des lames isolées très rapprochées, lorsque la tension qu'on lui applique est trop grande, des étincelles jaillissent d'une lame à l'autre et plus aucun courant ne passe dans les fils, c'est un arc de feu tout autour du collecteur qui sert de chemin au courant. M. Thury qui depuis de longues années s'est attaché à résoudre le problème y est arrivé en réalisant de très hautes tensions par l'emploi de machines qu'il met en série, tout comme des piles. Chaque machine pouvant produire 2 000 volts entre balais sans inconvénient il en accouple jusqu'à 10 en tension suivant les besoins comme c'est le cas d'une de ses dernières installations entre Saint-Maurice (Valais) et Lausanne, (voir page 118) on dispose donc sur la ligne de 20 000 volts et on a l'avantage de n'avoir que deux fils au lieu de trois comme nous le verrons avec les courants triphasés.

Poussant plus loin son audacieuse construction, M. Thury est arrivé à faire fonctionner une machine à courant continu donnant la tension énorme de 23 000 volts entre balais grâce à des dispositifs des plus ingénieux qui évitent la formation d'étincelles entre les lames du collecteur.

Comme on le voit il y a encore de beaux jours pour le courant continu mais jusqu'à présent ces remarquables machines sont la spécialité d'une seule maison de construction et les inconvénients que nous avons signalés joints à des dangers pour le personnel subsistent encore pour la généralité des cas et s'opposent à l'emploi de moteurs à haute tension dans les ateliers.

Nous donnons en terminant ce chapitre une vue d'un moteur Thury à haute tension muni d'un régulateur automatique de vitesse du même constructeur.

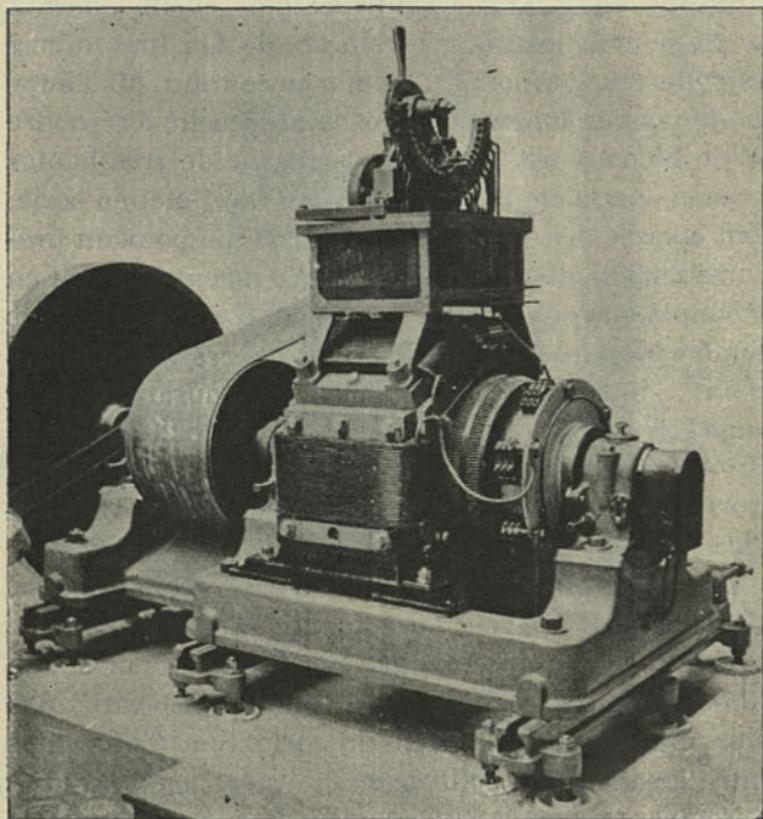


Fig. 36. — Moteur électrique Thury à courant continu et à haute tension.

Comme on le voit ce moteur est soigneusement isolé du sol par des isolateurs en porcelaine scellés dans la maçonnerie. L'enroulement des inducteurs est à gros fil car ainsi que nous l'avons dit un enroulement à fil

fin pour 1 000 volts coûterait trop cher et serait trop fragile et trop encombrant.

Le moteur série a malheureusement une allure des plus variables et il serait détestable pour actionner un atelier si M. Thury ne l'avait pourvu d'un régulateur automatique lequel se compose d'un régulateur à force centrifuge de Watt dont les boules s'écartant plus ou moins suivant l'allure, agissent sur un rhéostat par une série de tringles et de levier. Le rhéostat fait varier le courant qui passe dans l'enroulement à gros fil des inducteurs en en dérivant plus ou moins, il en résulte que le champ magnétique varie, on s'arrange de façon à ce que le champ augmente quand la vitesse augmente et inversement. Un grand nombre de moteurs de ce genre fonctionnent depuis des années en Suisse et en Italie.

Les moteurs électriques à courants alternatifs.

1° **Moteurs triphasés.** — Reportons-nous aux machines à courants triphasés, nous savons que l'on peut obtenir ces courants par un dispositif du genre de la figure 6 et qu'il suffit en somme de faire tourner un aimant devant 3 bobines disposées à l'intérieur d'un cercle et à égale distance entre elles, c'est-à-dire aux trois sommets d'un triangle équilatéral.

Le courant qui prendra naissance dans chacune de ces bobines sera alternatif mais comme l'aimant passe successivement devant chacune d'elles, ces courants ne changeront pas de sens au même instant ils seront

décalés entre eux d'un tiers de tour comme le sont les bobines elles-mêmes c'est-à-dire de 120° . Ce sont ces courants auxquels on a donné le nom de *courants triphasés*.

Recevons ces courants dans une carcasse en fer doux analogue, pourvue de trois bobines et plaçons au centre une boussole ou une petite aiguille aimantée mobile sur un pivot, nous verrons aussitôt l'aiguille, si elle est suffisamment légère, prendre un mouvement de rotation lorsque nous mettrons la génératrice en marche, chose curieuse l'aiguille suit exactement l'allure de la génératrice, elle va vite si l'aimant tourne vite ou inversement. La cause est facile à deviner, chaque bobine de notre récepteur est tour à tour le siège d'un courant, l'aiguille aimantée suivra donc le mouvement et sautera d'un pôle vers l'autre à mesure que les courants se succéderont dans les bobines. Ce récepteur qui suit fidèlement la marche du générateur est dit *synchrone*, on a appelé ainsi une catégorie de moteurs à courants alternatifs qui ne sont en somme que la reproduction en grand de cette expérience.

Mais il y a mieux encore : on trouve en effet dans l'histoire de l'électricité qu'Arago avait constaté qu'un disque de cuivre tournant au-dessus d'une aiguille aimantée entraîne celle-ci dans sa rotation. Réciproquement, si nous faisons tourner un barreau aimanté au-dessus d'un disque de cuivre très mobile, nous l'entraînerons dans notre mouvement.

Si on avait affaire à des palettes de fer doux, on comprendrait tout de suite qu'il en soit ainsi, mais du cuivre, ce métal si peu magnétique !

En réalité, voici ce qui se passe : dans le disque de cuivre, métal très conducteur, des courants induits

prennent naissance et comme ils tendent à s'opposer au déplacement, c'est leur habitude (voir page 3), ne pouvant empêcher l'aimant de tourner, les courants entraîneront le disque de façon à l'amener à une vitesse presque égale à celle de l'aimant; la différence de vitesse entre les deux objets en mouvement devient alors très petite et la loi est satisfaite, puisque le déplacement de l'un par rapport à l'autre est très petit ou nul.

Au lieu d'un barreau aimanté que nous faisons tourner nous pouvons offrir mieux que cela à notre disque de cuivre; nous allons prendre les trois bobines de tout à l'heure, disposées dans une couronne en fer et devant lesquelles nous faisons tourner notre aiguille aimantée; il est évident que le passage du courant, successivement dans chacune des trois bobines, produit un effet identique à celui que l'on obtiendrait en faisant apparaître des aimants au centre de chacune d'elles successivement en faisant le tour.

Réaliser cette disposition, de quelque manière que ce soit, c'est obtenir ce qu'on appelle un *champ magnétique tournant*. Plaçons au centre notre disque de cuivre, il s'empressera de tourner. Voilà certainement un moteur électrique simple et de bon goût, c'est du reste ce qui a fait le succès des courants triphasés.

Comme ces courants sont alternatifs ils se transforment facilement de haute en basse tension à l'aide d'appareils très simples et ne nécessitant aucune surveillance; comme de plus leur utilisation devient idéale, pour actionner des machines-outils, grâce à ce genre de moteurs qui ne comporte ni enroulement en mouvement, ni collecteur délicat, ni balais, on conçoit

qu'ils aient un légitime succès pour la transmission de la force à distance.

Détails de construction. — Les moteurs triphasés, tels qu'on les emploie dans l'industrie, se composent tous d'une carcasse ronde en fonte portant à l'intérieur l'enroulement destiné à recevoir les courants triphasés. Au lieu des trois pôles saillants de notre

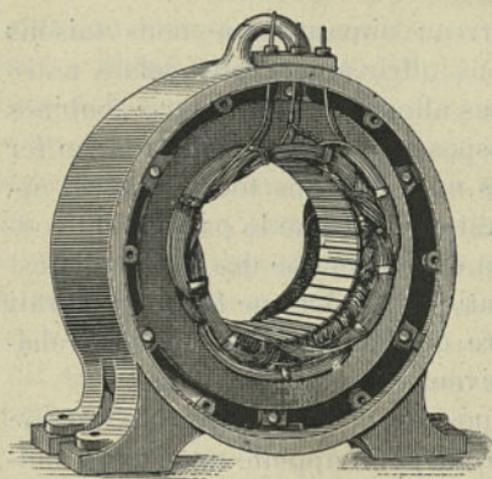


Fig. 37. — Moteur triphasé démonté partie fixe (*stator*).

figure théorique on pratique, dans un anneau formé de feuilles de tôle douce isolées les unes des autres, une série de dents formant autant d'encoches dans lesquelles on loge les bobines. Afin de rendre le champ tournant plus uniforme ces bobines sont nombreuses, mais on

en trouve toujours un multiple de trois. On distingue nettement les trois circuits et les bobines qu'ils forment sont enchevêtrées afin de mieux utiliser la place, mais si l'on prend une encoche comme point de départ, on rencontre successivement dans les encoches suivantes des fils appartenant successivement à chacun des trois circuits; la chose se répète tout autour de l'anneau.

Cette partie fixe est appelée *stator*.

La partie tournante ou *rotor* pourrait à la rigueur se composer d'un cylindre de cuivre rouge monté sur un axe. Pour avoir un meilleur rendement on préfère la constituer par des rondelles de fer doux isolées entre elles et fortement serrées, absolument comme pour un induit de dynamo à courant continu. Le

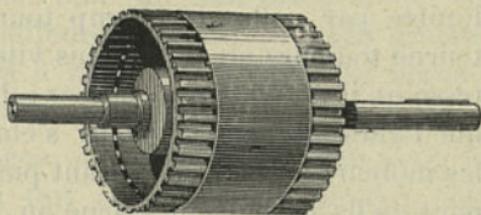


Fig. 38. — Cage d'écureuil (*rotor*).

rôle de ce noyau en fer est de mieux concentrer le champ tournant dans la partie active du moteur. Les tôles sont percées de trous très près de leur surface et on loge à l'intérieur des barres de cuivre rouge. Ces barres sont reliées entre elles à chacune de leurs extrémités par un cercle également en cuivre rouge.

Cette sorte d'enroulement, appelé à cause de sa forme *cage d'écureuil*, remplace le dis-

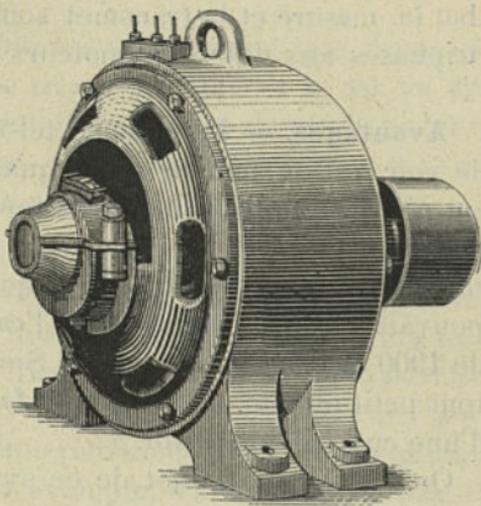


Fig. 39. — Vue d'ensemble d'un moteur triphasé.

que de cuivre de notre expérience précédente; des courants induits prennent naissance dans cette cage

et ce sont eux qui entraînent le rotor et le font... courir après le champ qui fuit toujours devant lui.

Ces moteurs ne s'emballent pas comme on pourrait le croire à première vue, car leur vitesse est toujours limitée par celle du champ tournant; le rotor qui tourne toujours un peu moins vite aura donc une vitesse qu'il ne pourra dépasser; il faudrait pour cela que l'alternateur générateur s'emballât et alors tous les moteurs en feraient autant puisque le champ tournant qu'ils produisent tourne au moyen des courants triphasés que leur envoie l'alternateur.

M. Maurice Leblanc, un savant français, bien connu pour ses travaux dans le courant alternatif, a donné le nom pittoresque de *chef d'orchestre* à l'alternateur d'une installation de ce genre; c'est lui en effet qui bat la mesure et la transmet sous forme de courants triphasés aux différents moteurs de l'installation.

Avantages. — Le moteur, tel que nous venons de le voir, est un moteur remarquable; jusqu'à présent on n'en connaît pas de plus simple: la partie mobile se borne à un cylindre tournant entre deux paliers, un point c'est tout. C'est ce qui a fait dire qu'on pouvait le faire tourner dans l'eau, et à l'Exposition de 1900 on pouvait voir chez Siemens et Halske un tout petit moteur de ce genre fonctionnant au fond d'une cuve pleine d'eau.

Qu'il y a loin en effet de ce système à celui d'une machine à vapeur ou à pétrole: point de bielles, point de soupapes, point de piston, pas de point mort, le mouvement circulaire est obtenu directement par des leviers invisibles que représente le champ tournant. Point de collecteur non plus, point de balais, le

moteur ne pouvant produire d'étincelles sera excellent pour les mines où le grisou abonde.

Dans les ateliers, il ne nécessite aucune surveillance, on peut l'abandonner dans un coin inaccessible, sur une charpente ou ailleurs, il suffit qu'il soit graissé, et avec des paliers à bagues l'entretien se borne à mettre un peu d'huile tous les mois.

Tous ces avantages ont valu au nouveau venu un vrai succès qui a fait la grande vogue des courants triphasés. Le démarrage de ces appareils, si leur puissance ne dépasse pas 1 ou 2 kilowatts, s'effectue très simplement en abaissant un commutateur tripolaire qui réunit les trois enroulements du stator aux trois fils de ligne, pas de rhéostat, rien ; c'est on ne peut plus simple.

Toutes ces considérations montrent que l'appareil doit être d'un prix très abordable et il est de fait qu'une semblable installation, avec de petits moteurs surtout, est souvent préférable et meilleur marché qu'avec des moteurs à courant continu.

Inconvénients. — Il faut bien le dire, ce système comme tous a des inconvénients : d'abord on a trois fils à installer au lieu de deux, ensuite pour des raisons qu'il serait trop long d'analyser ici, pour transmettre une même puissance avec une même tension de 110 volts par exemple, il faut employer plus de cuivre dans les canalisations, car avec les courants alternatifs la puissance réelle est toujours légèrement inférieure au produit de l'intensité par la différence de potentiel ; il faudra donc des courants plus intenses, autrement dit un peu plus d'ampères sous la même

tension efficace pour avoir la même puissance qu'avec le courant continu.

Ensuite, avec les gros moteurs on ne peut plus employer la cage d'écureuil ordinaire, elle fonctionnerait bien en marche, mais le moteur démarrerait mal; on est alors obligé d'installer sur le rotor un enroulement dans le genre de celui du stator, de le relier à trois bagues placées sur l'arbre et sur lesquelles viennent frotter trois balais conduisant les courants à un rhéostat de démarrage spécial. Comme on le voit, cela perd de son charme, ensuite le démarrage sous charge ne se fait pas aussi facilement qu'avec un bon moteur série à courant continu.

Pour des conditions de bon rendement on doit réduire au strict minimum, l'*entrefer*, ou jeu entre le stator et le rotor; cet entrefer ayant une importance bien plus grande avec les moteurs à champ tournant qu'avec les moteurs à courant continu, il en résulte des difficultés de construction qui sont souvent une gêne, car l'introduction d'un corps étranger ou la simple usure des coussinets peut provoquer l'arrêt momentané du moteur.

Enfin la vitesse, qui est limitée par le champ tournant invariable, est souvent un obstacle à l'emploi de ce moteur; dans certaines applications on est arrivé cependant à tourner élégamment la difficulté en employant, comme l'a fait M. Boucherot, deux champs tournants produits par des courants triphasés différents, mais l'usage ne s'en est pas généralisé.

Conclusions. — Les moteurs triphasés ont leur place toute trouvée pour l'utilisation dans les ateliers de l'énergie transmise à distance; l'emploi de petits

moteurs est en cela très avantageux. Pour la traction, quelques tentatives ont été faites ; on cite plusieurs lignes de tramways électriques et un chemin de fer, celui de la Valteline en Italie. Si on continue à employer le courant continu dans la plupart des applications de ce genre et à transformer même en courant de cette nature les courants triphasés que transmet souvent de très loin une usine génératrice, c'est que le courant continu paraît plus souple et aussi parce qu'il permet d'employer des batteries d'accumulateurs formant volant ou tampon qui évitent souvent l'achat d'une ou plusieurs machines génératrices supplémentaires.

2° Moteurs à courant alternatif simple. — Nous ne parlerons de ces moteurs que pour mémoire, car jusqu'à présent les spécimens que l'on rencontre sont notablement inférieurs comme qualités aux moteurs triphasés et aux moteurs à courant continu.

Prenons un moteur triphasé, relions deux de ses bornes, n'importe lesquelles, à une canalisation à courant alternatif simple et lançons-le comme une toupie à l'aide d'une ficelle, il va continuer à tourner sous l'action de ce courant alternatif. Le malheur est que le moindre effort résistant un peu anormal arrête la cage d'écureuil qu'il faut lancer encore. Comme on le voit, ce n'est guère pratique, avec d'autant plus de raison que si le moteur s'arrête ainsi accidentellement et si on ne le remet pas en route aussitôt, les courants induits dans le rotor échauffent et peuvent même fondre les barreaux de la cage d'écureuil.

Le procédé de démarrage plutôt barbare a été remplacé par un système plus élégant qui consiste à

entraîner le rotor par un champ tournant artificiel créé au moyen du courant alternatif lui-même. Pour cela on relie comme nous l'avons indiqué un enroulement du stator à la canalisation à courant alternatif, un autre enroulement de ce même stator est relié aussi au courant alternatif mais à travers une bobine, un gros électro-aimant par exemple. Cela suffit pour déterminer un champ tournant un peu grossier il est vrai, mais capable de lancer le rotor à vide; quand ce dernier a atteint sa vitesse on interrompt le courant auxiliaire passant par le deuxième enroulement et l'électro-aimant.

Mais ce n'est pas la vraie voie et le moteur reste aussi peu pratique qu'avant, car il n'a aucune élasticité.

Tout récemment, M. Latour a eu l'idée de prendre un moteur série à courant continu et de lui appliquer le courant alternatif; la machine comporte, outre les deux balais classiques, deux autres balais sur une ligne perpendiculaire aux premiers et que l'on relie entre eux par un câble de résistance nulle. Ce moteur a paru donner d'excellents résultats, il ne lui reste plus qu'à recevoir la sanction de la pratique; en tous cas, un brillant avenir lui est ouvert avec la traction électrique des trains en perspective sur les grandes lignes de chemins de fer.

CHAPITRE III

LES CANALISATIONS POUR LA TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE A DISTANCE

La transmission de l'énergie électrique aux grandes distances que nous avons indiquées, c'est-à-dire dans des rayons de 100 à 200 kilomètres, ne se fait pas sans de grandes difficultés à cause des hautes tensions qu'on est obligé d'employer.

S'il est relativement facile de canaliser des courants à 110 volts dans les maisons pour notre usage particulier, il est autrement difficile d'abandonner, en pleine campagne, aux intempéries des saisons, des fils ou câbles fonctionnant sous de hautes tensions. Les court-circuits deviennent plus faciles à produire et par conséquent plus fréquents; ils sont d'autant plus gênants qu'ils paralysent souvent un réseau entier et que rien ne peut en indiquer la position exacte. Ces court-circuits ont diverses causes : tantôt ce sont des vents violents qui renversent les poteaux, tantôt des branches d'arbre et quelquefois la malveillance. Des

oiseaux de proie, en particulier, ont arrêté plusieurs fois le fonctionnement de certaines usines installées en pays de montagne, les aigles notamment dont l'envergure dépasse couramment un mètre ont rencontré, en volant, les fils et ont provoqué un court-circuit tout en payant de leur vie le contact avec des câbles à haut potentiel.

A côté des court-circuits, il est d'autres perturbations qui gênent le fonctionnement des usines électriques dont le réseau est quelque peu étendu, elles sont dues à l'électricité atmosphérique autrement dit à la foudre.

Il n'y a pas seulement que les orages qui apportent les troubles sur les réseaux de distribution d'énergie électrique; par des temps très clairs on a vu fonctionner les parafoudres d'un grand nombre d'installations, nous citerons comme exemple le cas du réseau de Grenade en Espagne dont les parafoudres fonctionnent tous les soirs au coucher du soleil.

Enfin il n'est pas jusqu'à la neige en hiver qui n'occasionne des dégâts ou même le givre en s'amoncelant sur les fils et en occasionnent leur rupture.

Les électriciens ont tenu ferme; ils ont combattu pied à pied tous ces ennemis redoutables et, grâce à l'expérience acquise, ils ont pu installer aujourd'hui de grands réseaux où le fonctionnement reste régulier. Nous examinerons successivement les lignes et les isolateurs; ces derniers surtout sont devenus l'âme des transmissions à haute tension.

Lignes de transmission. — On les fait généralement en cuivre rouge, métal le plus conducteur après l'argent. En Amérique, on commence à employer

l'aluminium qui baisse de prix tous les jours; il est, peut-être, un peu plus résistant, mais en somme, léger. Ce métal, cependant, n'est pas à conseiller au bord de la mer car il s'altère assez rapidement dans l'eau salée.

Les fils sont le plus souvent aériens; ils sont alors supportés par des isolateurs spéciaux fixés à de robustes poteaux. Aujourd'hui, on tend de plus en plus à employer des poutrelles d'acier qui durent plus longtemps et sont plus solides que les poteaux en bois. Les fils, dont on règle la tension comme en télégraphie en utilisant un peson, doivent être solidement ligaturés sur leurs isolateurs afin d'éviter les accidents qui pourraient résulter de leur chute. Ces fils sont relativement gros et lourds; de plus, la haute tension à laquelle ils sont le plus souvent portés en rend le contact mortel; aussi, pour en prévenir la chute, les poteaux portent, autour des isolateurs, des cadres métalliques destinés à retenir le câble au cas où il tomberait de l'isolateur (fig. 48). Les épissures ou jonctions de deux câbles ou fils entre eux doivent être particulièrement soignées en vue de ne pas créer de résistance sur le passage du courant; dans ce but elles sont toutes soudées. Des règlements spéciaux sont en vigueur dans chaque pays pour l'établissement des lignes de transmission d'énergie électrique sur la voie publique. En France, notamment, on prévoit des filets protecteurs au passage au-dessus des voies fréquentées et en particulier aux croisements avec les lignes télégraphiques ou téléphoniques.

Dans la traversée des villes ou des fortes agglomérations le câble souterrain s'impose; on emploie alors des câbles armés isolés simplement au papier sec;

l'expérience a montré que, dans ces conditions, il suffisait de faire passer pendant plusieurs heures de l'air chaud et sec autour du papier pour avoir des isolements remarquables. Bien entendu il ne faut pas que l'humidité puisse pénétrer ensuite à l'intérieur.

Isolateurs. — Les premiers isolateurs employés ont été ceux des télégraphes c'est-à-dire en porcelaine avec double cloche intérieure. Cette double cloche a pour rôle d'augmenter le chemin de fuite du courant entre le fil qui repose sur la tête de l'isolateur et le support de ce dernier; ou conçoit facilement que plus ce chemin sera long et moins on aura de pertes. Ces isolateurs, qui sont suffisants pour la télégraphie et la téléphonie, ne peuvent plus être employés sitôt que l'on arrive à des tensions de 1 000 volts. Les fabricants d'isolateurs ont étudié diverses formes et, en somme, après avoir essayé des isolateurs à huile (c'est-à-dire en porcelaine formant récipient intérieur d'huile pour éviter l'action de l'humidité) on est revenu aux isolateurs à plusieurs cloches ou à *parapluie* comme on les désigne le plus souvent. Ces isolateurs ne peuvent mieux être assimilés qu'à une série de parapluies superposés : on en compte 3 ou 4; ils diminuent beaucoup la perte de courant qui tend à se produire par les temps humides lorsque de la buée se dépose sur la porcelaine car on arrive à maintenir de bons isolements même avec des tensions élevées de 20 à 25 000 volts. Il faut cependant faire un choix et tous les isolateurs d'une même fabrication ne conviennent pas, certains se laissent percer par le courant, d'autres éclatent. Cela tient le plus souvent à des fissures qui

se remplissent d'eau et que le courant choisit pour s'échapper; en circulant dans cette couche liquide il l'échauffe, la vaporise et c'est la vapeur qui fait éclater l'isolateur. Comme les chaudières à vapeur, on essaye l'isolateur à une tension deux fois supérieure à la tension qu'il doit supporter, c'est ainsi qu'un isolateur de 20 000 volts est essayé à 40 000, s'ils sont de qualité douteuse on s'en aperçoit vite car ils sont lumineux la nuit.

Les Américains ont employé le verre notamment pour des lignes industrielles fonctionnant aux tensions de 40 à 50 000 volts considérées jusqu'à présent comme les plus élevées.

Ces isolateurs demandent à être faits avec beaucoup de soin; ils ne doivent présenter ni craquelures, ni fêlures; enfin, au bord de la mer, ils n'ont pas paru donner d'excellents résultats.

Ils ont cependant leurs avantages notamment celui de ne pas attirer l'attention. Il est assez bizarre que l'on ait à prendre de pareilles choses en considération à l'époque actuelle mais ce n'est malheureusement que trop vrai. Dans certaines régions, peu civilisées sans doute, nous nous abstiendrons de les citer, la malveillance cause, chaque jour, des arrêts dus au bris des isolateurs en porcelaine par les coups de pierre. Ces actes de vandalisme, qui sont une honte à l'heure actuelle, ont été combattus de diverses manières et nous connaissons plusieurs directeurs d'usines qui ont pu voir diminuer ces accidents simplement en peignant en noir les isolateurs en porcelaine ou mieux en les remplaçant par des isolateurs en verre qui se détachent moins bien sur le fond des arbres et par

suite servent moins de cible à une jeunesse un peu trop arriérée.

L'ébonite a été employée mais les isolateurs ainsi obtenus sont trop chers et pour des isolement moyens, de lignes de tramways à 500 volts par exemple, l'ambroïne, substance formée d'isolants agglomérés, a paru donner d'assez bons résultats.

CHAPITRE IV

LES APPAREILS DE PROTECTION DES LIGNES DE DISTRIBUTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Au premier rang des appareils de protection, dont doit être munie toute ligne bien installée, il convient de citer les coupe-circuits. Ces appareils sont destinés à rompre automatiquement le courant lorsque ce dernier atteint une intensité trop élevée ; ils sont de deux sortes, suivant le principe sur lequel ils sont basés : les uns utilisent la fusion d'un fil de plomb ou autre métal ou alliage plus fusible que le cuivre, ce sont les plus simples ; d'autres emploient l'attraction d'une palette de fer doux, par un électro-aimant, pour faire déclencher un interrupteur qui supprime le courant lorsque son intensité devient dangereuse. Ces derniers appareils, beaucoup plus coûteux, sont cependant beaucoup plus sûrs.

Fils fusibles. — On reproche au coupe-circuit à plombs fusibles de fondre trop souvent par suite du mauvais contact du plomb sous les vis qui le serrent, ce mauvais contact résulte d'une oxydation du plomb, il s'accroît avec le temps. De même, le peu de pres-

sion qui s'exerce à la longue en cet endroit, parce que le plomb étant un métal mou ne reste pas serré, est encore une cause de fusion intempestive. Il y a aussi l'aplatissement du fil sous la vis de serrage qui, bien souvent, occasionne la fusion à une intensité plus faible que celle prévue.

Quoiqu'il en soit, le coupe-circuit à fil fusible est encore très répandu et peut donner de bons résultats à condition d'être convenablement employé. Il est préférable, pour avoir un fonctionnement régulier, de souder chacune des extrémités du fil ou de la lame fusible à une plaque en laiton bien nettoyée que l'on serrera sous les vis du coupe-circuit, on n'a pas à craindre le cisaillement du fil ni l'aplatissement du métal et on peut serrer énergiquement.

Pour les lignes à haute tension, les coupe-circuits doivent avoir de longs fils fusibles sans cela une étincelle ou un arc persisterait entre les deux pièces en regard après la fusion du fil; dans ce but on recommande, même pour les tensions élevées, d'introduire le fil fusible dans un tube en poterie isolante présentant des cloisons à l'intérieur, de cette façon l'arc se rompt et s'éteint dans ces chambres et aucun danger n'est à craindre. D'autres constructeurs enferment le fil fusible dans un tube plein d'huile, l'arc est ainsi complètement étouffé et s'éteint instantanément.

Disjoncteurs automatiques. — Les disjoncteurs automatiques sont, ainsi que nous le disions plus haut, des coupe-circuits agissant sous l'action d'un électro-aimant. On en a construit de toutes sortes, mais ils sont en somme presque toujours formés d'un

électro-aimant dont la palette de fer doux, maintenue par un ressort que l'on tend plus ou moins, provoque un déclenchement quand l'appareil est parcouru par un courant assez intense. Ce déclenchement produit la chute violente d'un contrepois qui entraîne l'ouverture d'un interrupteur, et le résultat cherché est atteint ; ou bien, et c'est le cas de la figure

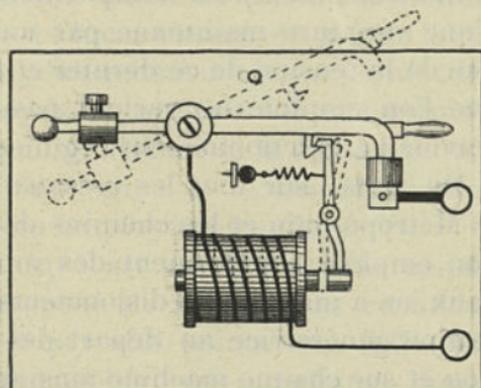


Fig. 40. — Disjoncteur automatique.

40, l'attraction de la palette dégage la manette d'un commutateur qui se soulève sous l'action d'un contrepois et coupe le circuit.

Ces appareils sont, aujourd'hui, de toute nécessité sur les circuits alimentant des moteurs électriques, ils sont bien plus sûrs qu'un plomb fusible qui ne fond pas lorsque l'afflux de courant ne dure qu'un instant, et surtout pour des intensités de 100 ampères et au delà.

Pour ces intensités, le plomb fusible n'offre qu'une demi-sécurité, il faut, en effet, un temps qui n'est pas négligeable pour fondre de tels plombs, et, pendant ce temps, le réseau subit un à-coup fort préjudiciable pour ses machines ou les lampes qu'il alimente. Avec les disjoncteurs automatiques rien de pareil : le déclenchement se produit presque immédiatement dès que le courant atteint l'intensité limite prévue, et, de

plus, ces appareils fonctionnent avec une régularité presque mathématique. Tandis que le point de fusion des fils fusibles dépend de la proportion des métaux qui entrent dans leur composition, le déclenchement d'une armature maintenue par un ressort ne dépend que de la tension de ce dernier et comme les ressorts que l'on emploie ne varient pas, on peut être sûr d'avoir un fonctionnement régulier.

Du reste, sur tous les réseaux de tramways, sur le Métropolitain et les chemins de fer électriques, où l'on emploie couramment des moteurs de 100 chevaux, on a installé des disjoncteurs automatiques à la station génératrice au départ des câbles d'alimentation et sur chaque machine ainsi que sur chaque voiture automotrice. La régularité de fonctionnement de ces appareils et surtout leur remise en place rapide les a fait préférer partout aux plombs fusibles. Donc, en résumé, rappelons-nous que le plomb fusible est excellent pour la lampe à incandescence, vu son bon marché et sa finesse, mais il n'est pas à recommander pour protéger les moteurs électriques un peu puissants.

Parafoudres. — Tandis que les coupe-circuits protègent les lignes ou les machines contre un accroissement accidentel de courant, pouvant faire chauffer les fils des appareils d'utilisation et les brûler, les parafoudres, vraies soupapes de sûreté, évitent une surélévation de tension capable de compromettre les isolants. Beaucoup de ces appareils sont en service et bien peu sont d'une efficacité absolue. Un parafoudre idéal devrait soutirer constamment les charges électriques trop fortes ; malheureusement la plupart

agissent par intermittence lorsque la charge est assez élevée pour les faire agir; à ce moment ils s'amorcent brusquement et mettent la ligne à la terre, de sorte que le courant des machines suit un instant ce chemin. Ce système a l'inconvénient de priver le réseau de lumière jusqu'au moment où, le parafoudre ayant fonctionné, le réseau a repris son état normal.

On a remarqué que les dégâts de la foudre étaient d'autant plus nombreux que : 1° le réseau est plus étendu et 2° la tension employée plus élevée.

La première remarque est assez naturelle, car un immense réseau composé de nombreuses ramifications est en contact par des points très différents avec les couches atmosphériques; certaines lignes d'un même réseau passent sur les montagnes, d'autres suivent les vallées, cela suffit pour avoir, à certaines heures de la journée, des charges électriques très importantes, dont la vraie cause est encore peu connue.

La deuxième remarque tient à ce que, pour employer des tensions très élevées, il faut d'excellents isolements; il en résulte que les charges électriques qui s'écoulent vers le sol, avec les réseaux à basse tension moins bien isolés, s'accumulent au contraire sur les lignes à haute tension jusqu'au moment où elles s'offrent une issue par un point faible, par le bâti d'une machine par exemple, l'isolant est percé et la machine doit être bobinée et isolée à nouveau. Comme on le voit ce n'est pas tout à fait drôle.

Jusqu'ici nous n'avons pas parlé des orages mais simplement des charges électriques que l'on observe fréquemment par des temps relativement beaux, il est évident qu'en temps d'orage c'est bien pire et, en

général, chaque éclair fait fonctionner les parafoudres sur un réseau bien isolé et un peu étendu.

Examinons de près un de ces appareils. Le plus simple, et celui qui fonctionne le plus régulièrement, est le parafoudre à cornes de Siemens. Comme son nom l'indique, cet appareil est composé de cornes formées de fils ou tiges métalliques montées sur des isolateurs. La partie centrale est reliée au sol par un fil aussi *droit* que possible, sans coude ni spirale par conséquent; les deux autres cornes communiquent chacune avec un des deux fils de la ligne à protéger. A la base, les cornes se touchent presque, leur intervalle est de 7, 8 à 10 millimètres de façon à ce que la pluie ruisselant le long des tiges ne puisse mettre en contact les parties en regard. En cas de charge soudaine du réseau, par suite d'un coup de foudre, par exemple, ou de tout autre phénomène, la tension s'élève entre les cornes comme sur toute la ligne, une étincelle part entre les cornes isolées et celles reliées à la terre et la décharge atmosphérique s'écoule vers le sol, avec elle aussi le courant des machines qui profite de l'occasion. Mais il a compté sans son hôte. En franchissant l'espace, le courant s'élance sous forme d'une flamme ou d'un arc que le courant d'air chaud, ou d'autres phénomènes chassent vers le haut des cornes; il arrive un moment où, l'écartement devenant de plus en plus grand, il se rompt et les choses redeviennent normales, c'est-à-dire que l'appareil est prêt à fonctionner si un nouveau coup de foudre éclate.

C'est simple et automatique, comme on voit; de nombreux spécimens de cet appareil ont été installés sur les réseaux aériens de distribution d'énergie élec-

trique; on les dispose un peu partout, et le plus souvent sur les poteaux, où leur fonctionnement est assez satisfaisant.

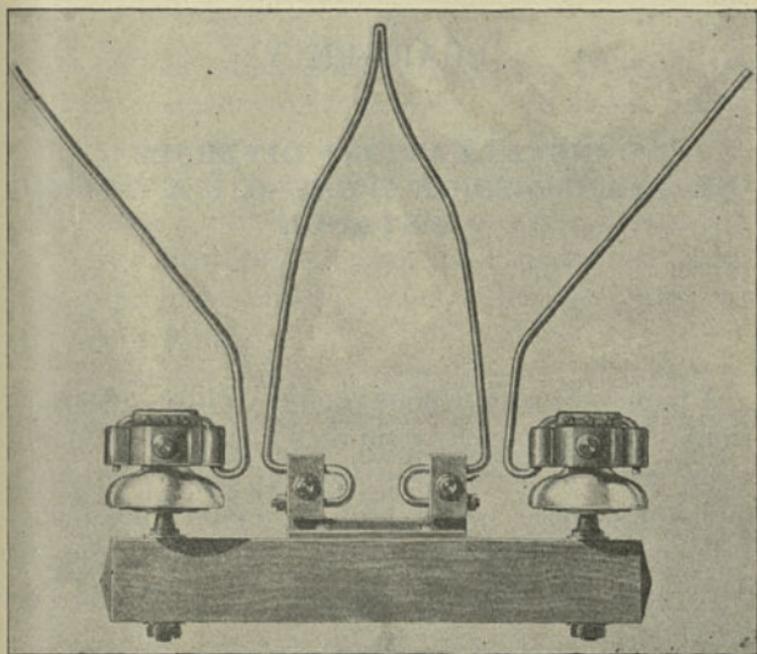


Fig. 41. — Parafoudre de Siemens.

Nous verrons un peu plus loin, à propos des exemples d'installations à haute tension, l'application de nouveaux parafoudres de M. Thury qui fonctionnent d'une façon continue.

CHAPITRE V

INSTALLATIONS DIVERSES DE TRANSMISSION D'ÉNERGIE A GRANDE DISTANCE

A l'appui de ce que nous venons de dire, nous pourrions citer un grand nombre d'installations électriques, mais ce serait trop long et peut-être un peu monotone, aussi parmi tant d'exemples d'usines de transmission d'énergie, nous n'en retiendrons que deux très différents l'un de l'autre mais très intéressants.

Il s'agit toujours d'utiliser de puissantes chutes d'eau; mais, tandis que dans une des usines on emploie des courants triphasés à haute tension, dans l'autre on emploie du courant continu également à haute tension. Ces deux exemples pourront servir de types et c'est en somme à l'un des deux que l'on pourra presque toujours rattacher les installations actuelles.

La première usine que nous décrirons est celle qui transmet par courants triphasés, à Milan, l'énergie empruntée à un affluent du Pô.

Les installations électriques de la ville de Milan.

La ville de Milan possédait, depuis 1883, une des plus anciennes usines électriques du monde entier, munie des premières machines Edison, des merveilles pour l'époque, devenues des curiosités aujourd'hui. Cette usine ne tarda pas à devenir totalement insuffisante et, dès 1890, on songea à l'augmenter en mettant à profit les chutes situées à Paderno, à 33 kilomètres de Milan.

Les projets furent établis en vue d'utiliser une puissance de 17 500 chevaux, — respectable comme on le voit. A cet effet, un barrage fut élevé sur un affluent du Pô, l'Adda, qui prend sa source dans le lac de Côme. Ce lac lui assure un débit très constant en même temps qu'il fournit une eau admirablement claire, comme celle du Rhône à la sortie du lac de Genève. Un peu avant de se jeter dans le Pô, l'Adda présente plusieurs rapides sur lesquels fut construit le barrage.

Le canal qui fait suite au barrage permet d'amener 45 mètres cubes d'eau par seconde et la hauteur de chute atteint 29 mètres environ. Le canal a une longueur totale de près de 2 200 mètres, il est suivi de conduites en acier qui amènent l'eau aux turbines (fig. 42).

Turbines. — Elles sont au nombre de six, de 2 160 chevaux chacune, avec une septième formant réserve. Ces sept groupes sont absolument identiques.

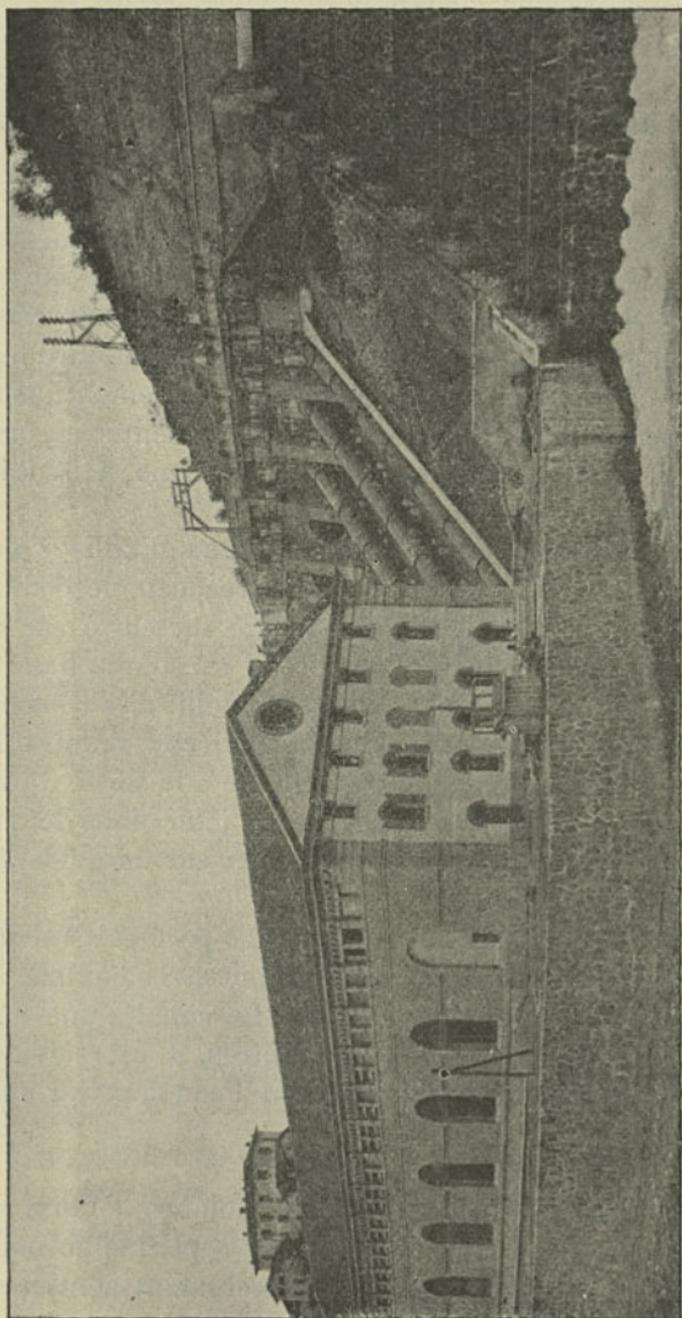


Fig. 42. — Vue d'ensemble extérieure de l'usine de Paderno.

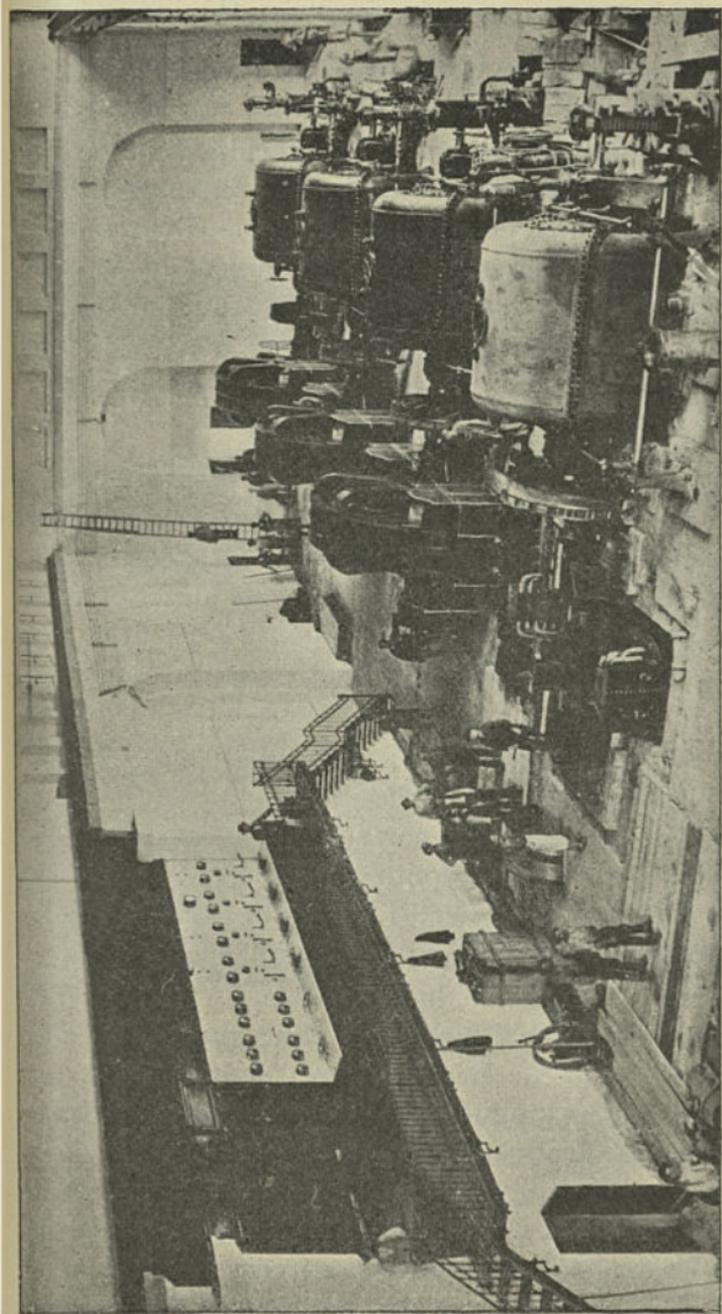


Fig. 43. — Vue intérieure de l'usine de Paderno. — Alternateurs et turbines en montage.

La turbine est à axe horizontal; sa vitesse est réglée par un obturateur, commandé par un régulateur.

A 180 tours par minute, chaque turbine peut débiter jusqu'à 8 700 litres par seconde, son rendement total a été trouvé de 78 pour 100. La turbine commande la dynamo, dont l'axe est dans le prolongement de celui de la turbine, par un joint élastique constitué par des bandes de cuir reliant des goujons fixés sur deux plateaux calés sur chacun des deux arbres.

Alternateurs. — Les dynamos à courants alternatifs triphasés construites par la maison Brown Boveri et C^{ie} de Baden sont à induit fixe et à inducteur mobile comme les machines que nous avons décrites page 11. A première vue, elles présentent l'aspect de deux volants tournant l'un dans l'autre. Elles indiquent une certaine hardiesse, car elles ont détenu le record de la plus grande différence de potentiel obtenue directement, soit 13 500 volts entre deux fils.

La couronne fixe supportant l'induit est soutenue à l'aide de six bras en fonte (fig. 44) qui permettent de la retirer et de la faire tourner afin de visiter les bobines si un accident se produit.

L'obtention d'une si haute tension de 13.500 volts ne se fait pas sans difficulté; il faut que de grandes précautions soient prises pour l'isolement. A cet effet les bobines induites sont passées dans des tubes de micanite disposés eux-mêmes dans des trous ménagés sur l'induit. Les tubes isolants dépassent de 10 centimètres de chaque côté afin d'éviter les étincelles et les décharges entre la carcasse métallique et les fils, et les faces latérales intérieures des bobines

sont au moins à 15 centimètres de distance de cette carcasse.

Ces précautions ont donné à la machine une largeur peut-être un peu grande, mais elles ont augmenté la sécurité.

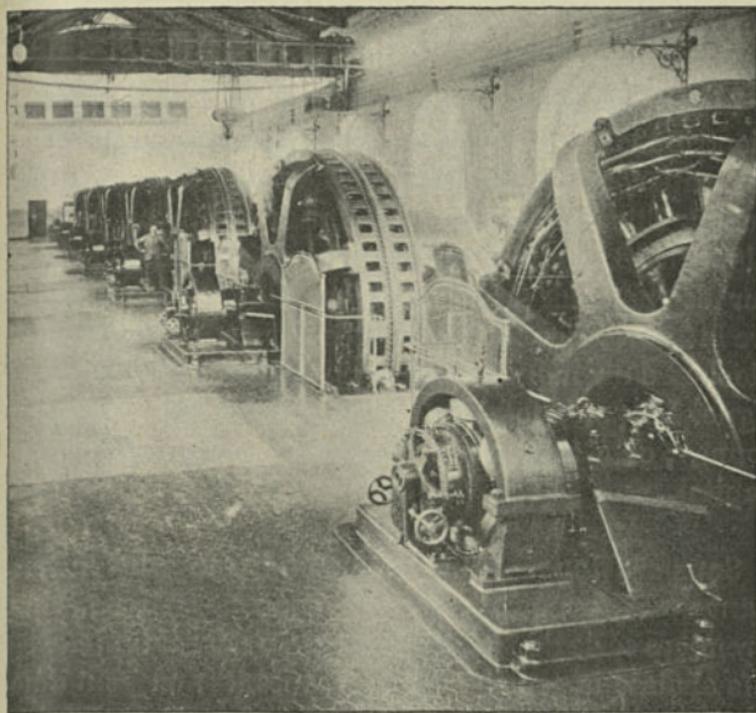


Fig. 44. — Alternateurs à courants triphasés de l'usine de Paderno.

L'inducteur est constitué par une couronne en fonte sur laquelle sont montés 28 pôles en acier doux coulé maintenus à l'aide de boulons. L'enroulement de ces pôles inducteurs est constitué par une lame de cuivre de 4 millimètres d'épaisseur et 50 millimètres de largeur roulée en hélice dans le sens de sa largeur. Le

tout est comprimé à la presse hydraulique en interposant du carton entre les spires plates successives. On obtient ainsi un enroulement très solide résistant bien aux effets de la force centrifuge.

Les dynamos excitatrices à courant continu sont placées en avant des alternateurs comme on le voit sur la figure.

Ligne aérienne. — La ligne reliant l'usine hydro-électrique de Porto-d'Adda à la Porte Volta à Milan est entièrement aérienne sur 33 kilomètres de longueur. Elle se compose de 6 lignes distinctes à trois fils, soit 18 fils de 9 millimètres de diamètre montés sur des poteaux métalliques jumelés comme le montre la figure. Les fils sont posés sur des isolateurs à 4 cloches d'un modèle spécialement étudié pour cette ligne. Le poids total de cuivre des 18 fils est de 335 tonnes; cela représente comme on le voit un certain capital.

Sous-stations. — Le courant à haute tension venant de Paderno est reçu dans des sous-stations. Une première série de transformateurs à courants alternatifs abaisse la tension de ces courants: on peut déjà utiliser ces courants pour l'éclairage, mais pour les tramways électriques qui demandent du courant continu à 500 volts, il faut leur faire subir une nouvelle transformation. Au lieu d'employer des commutatrices on a préféré utiliser des groupes convertisseurs ornés d'un moteur à courants triphasés sur l'arbre duquel est couplé une dynamo à courant continu (fig. 16).

L'avantage que l'on y trouve est d'éviter une pre-

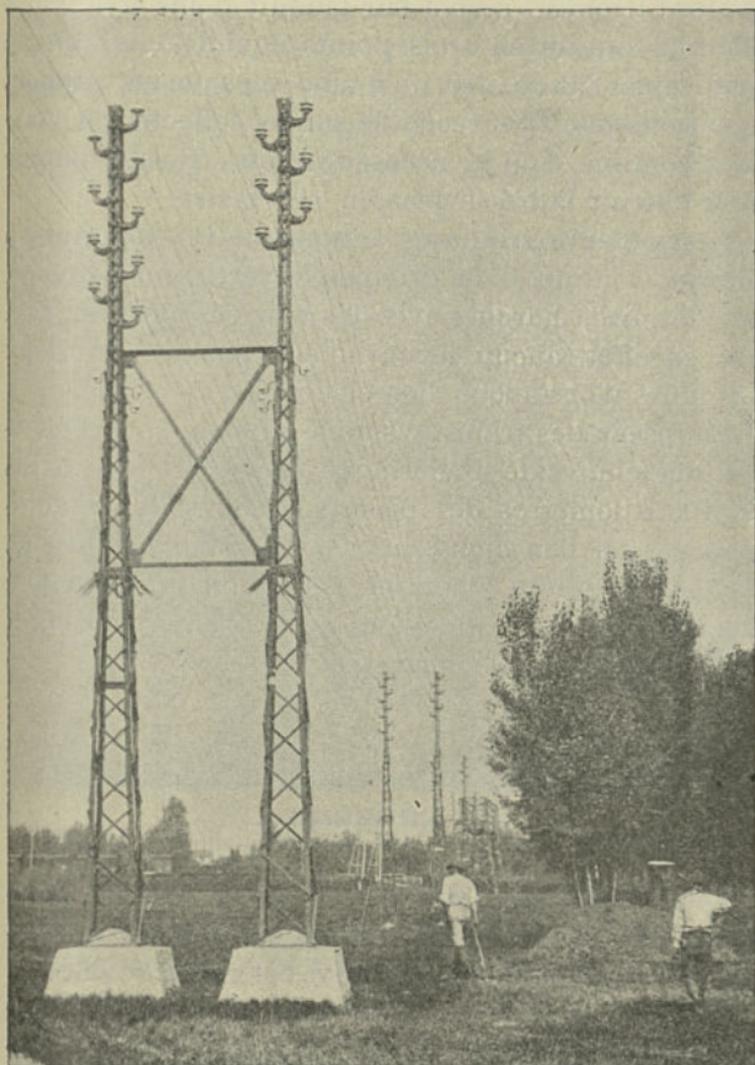


Fig. 45. — Vue de la canalisation aérienne entre Paderno et Milan (courants triphasés).

mière transformation du courant alternatif nécessaire pour la commutatrice. Avec ces machines, en effet, le

7.

courant triphasé arrive sur l'induit d'une dynamo à courant continu en trois points équidistants ; on ne peut donc l'alimenter qu'à une tension en rapport avec celle que l'on recueille sur le collecteur à courant continu, d'où la nécessité d'un transformateur pour obtenir la basse tension nécessaire.

Les moteurs triphasés actionnant les dynamos à courant continu d'un groupe convertisseur peuvent, au contraire, marcher avec des tensions élevées ; cela n'a, en effet, aucun inconvénient puisque les deux machines n'ont aucun lien électrique.

Le réseau des tramways ainsi alimenté par l'énergie des chutes de Paderno ne comprend pas moins de 100 kilomètres de voies avec 200 voitures automotrices ; si l'on ajoute à cela le grand nombre de lampes installées chez les habitants on aura une idée des bienfaits que l'on peut retirer de chutes restées si longtemps inactives.

Les installations électriques de la ville de Lausanne.

Toute autre est l'installation de la ville de Lausanne, car elle utilise le courant continu à haute tension dont la simplicité d'emploi est remarquable.

En 1898 la ville de Lausanne avait acquis une force motrice hydraulique de 14 000 chevaux sur le Rhône à Saint-Maurice, point distant de 56 kilomètre du centre d'utilisation. Les projets de transmission furent soumis à une commission de cinq ingénieurs des plus distingués ; ces experts s'arrêtèrent à la solution qui consistait à employer du courant

continu à haute tension d'après les procédés de M. Thury, mis en œuvre par la compagnie de l'*Industrie électrique* de Genève. Le choix leur fut dicté avant tout par la sécurité de l'exploitation et par l'économie de construction. Il résulte, en effet, des



Fig. 46. — Vue extérieure de l'usine de Saint-Maurice.

études présentées, que le système par courants triphasés aurait représenté une augmentation de coût d'installation, toutes choses égales d'ailleurs, de 740.000 francs — (coût total de la solution triphasée, 8.105.000 francs, — de la solution par courant continu 7.365.000 francs.)

Les travaux ont consisté :

1° Dans l'établissement d'un barrage sur le Rhône

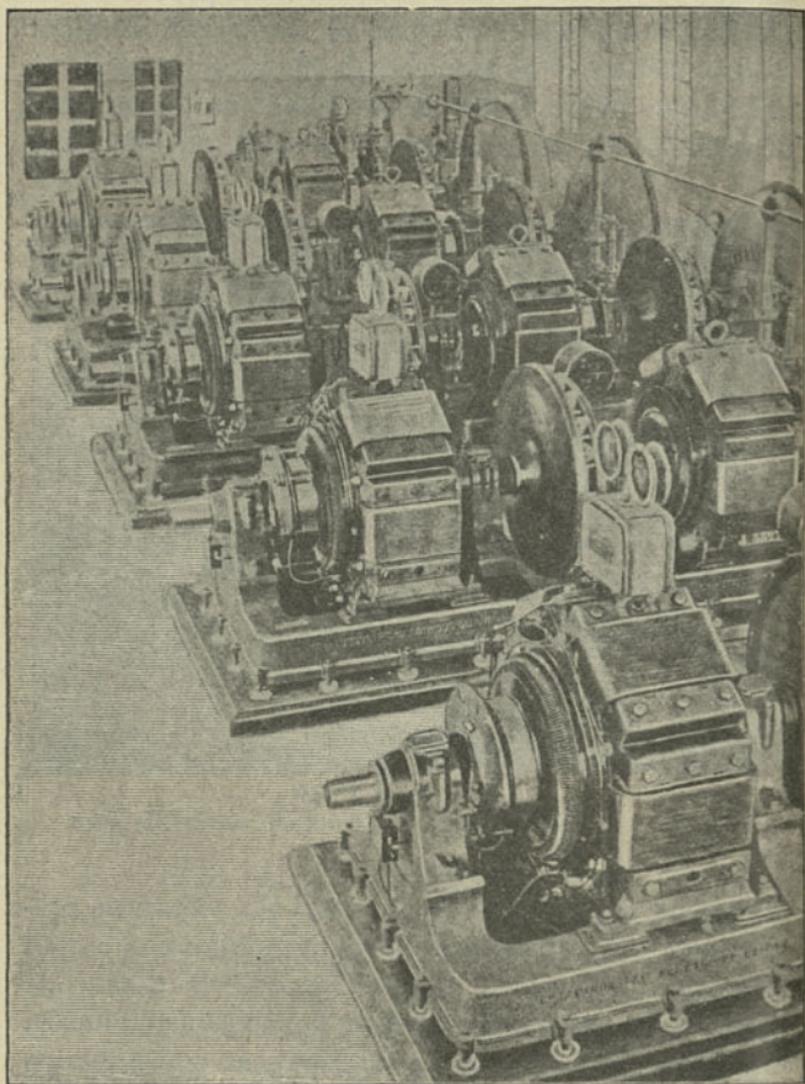


Fig. 47. — Vue intérieure de la salle des machines de l'usine de Saint-Maurice. — Dynamos à courant continu à haute tension.

2° Dans la création d'une chute permettant de produire une puissance de 14 000 chevaux ;

3° Dans la production de l'énergie électrique et, enfin, dans le transport de Saint-Maurice à Lausanne de cette même énergie.

Barrage. — Le barrage d'une longueur totale de 91 mètres est soutenu par des piles en maçonnerie solidement assises sur les rochers dans le lit du Rhône. La fermeture s'obtient au moyen de vannes glissant dans des cadres qu'une commande mécanique permet de manœuvrer de la rive.

Un canal de 3,3 kilomètres de long amène l'eau dans un vaste bassin où elle se décante, c'est-à-dire où les sables et graviers tombent au fond et ne peuvent dès lors entraver le fonctionnement des turbines. De ce bassin part une conduite en tôle d'acier de 2,7 mètres de diamètre amenant l'eau à l'usine.

Turbines. — L'installation actuelle comprend cinq turbines de 1 000 chevaux, mais le canal et l'usine sont prévus pour un total de 10 turbines semblables ; elles tournent à 300 tours par minute environ ; un régulateur électrique commande le vannage suivant les besoins, de sorte que l'on n'a pas à se préoccuper de la vitesse.

Dynamos. — Les dynamos sont au nombre de 10 à courant continu, par groupe de deux sur l'arbre de la même turbine. Chacune de ces machines peut produire un courant constant de 156 ampères avec une tension variable suivant le nombre de moteurs en marche à l'usine réceptrice ; en tout cas chaque ma-

chine peut produire couramment 2 200 volts. Ces machines sont couplées en série, c'est-à-dire embrochées à la suite les unes des autres ; on intercale d'autant plus de machines que la puissance à fournir est plus considérable, mais le courant reste toujours constant et égal à 156 ampères, la tension seule varie de 4 400 volts avec un seul groupe à 22 000 quand tous les groupes sont en tension.

Ligne aérienne de transport. — La ligne est formée simplement par deux fils montés sur des poteaux analogues à ceux de la figure. La comparaison entre les deux lignes, celle de Paderno à 18 fils, d'une part, et celle de Lausanne à deux fils seulement se passe de commentaires. Ces deux réseaux utilisent presque la même puissance, mais on reconnaît facilement la solution la plus élégante et la plus simple.

Usine réceptrice. — A l'usine réceptrice de Pierre de Plan, à Lausanne, se trouvent actuellement cinq moteurs à courant continu analogues aux génératrices ; la place a été prévue pour cinq autres. Chacun de ces moteurs peut fournir 400 chevaux, il absorbe 156 ampères avec 2 150 volts à pleine charge. Leur vitesse est maintenue constante à l'aide d'un régulateur remarquable qui est la création de M. Thury et que l'on voit au-dessus de la dynamo. Ce régulateur agit sur l'excitation et sur le calage des balais.

Chaque dynamo à courant continu actionne un alternateur qui fournit l'énergie nécessaire à l'éclairage de la ville.

D'autres réceptrices font tourner des dynamos à courant continu à la tension de 500 volts, qui servent

à actionner les tramways de la ville de Lausanne.
La ligne de transmission et les dynamos des deux



Fig. 48. — Vue d'une canalisation aérienne à courant continu et à haute tension.

usines génératrices et réceptrices sont protégées par des parafoudres système Thury. Depuis peu de temps on en a installé de nouveaux qui jouissent de la propriété de décharger constamment la ligne sans amor-

cer d'étincelle donnant passage au courant des dynamos ; ils opposent en effet une résistance infranchissable au courant continu des machines et laissent passer au contraire très facilement les courants dus aux charges atmosphériques.

Retour par la terre. — Malgré la grande simplicité de l'installation qui n'emploie que deux fils de ligne, M. Thury a voulu faire mieux encore : il a supprimé un des fils et l'a remplacé par la terre. Pour cela, le pôle négatif du réseau a été relié aux conduites d'eau et de gaz de Lausanne, tandis qu'à l'usine génératrice, à Saint-Maurice, on reliait le pôle positif à des amas de ferraille enfouis avec du coke dans un terrain avoisinant le lit du Rhône (1).

La marche en série des machines qui a pu se produire sans difficultés a montré que, le cas échéant, en cas de rupture à l'un des fils de ligne, par exemple, on pouvait toujours assurer le fonctionnement avec l'autre fil et la terre comme conducteur de retour.

Ces mémorables expériences auxquelles nous avons assisté ont eu leur retentissement dans le monde électrique ; elles ont montré que le courant continu n'avait pas dit son dernier mot, et que, en tout cas, c'était la solution la plus simple des transmissions d'énergie à grande distance.

(1) Grâce au choix du pôle négatif on n'a aucune attaque des conduites à craindre, il n'en serait pas de même si on les eût reliées au pôle positif.

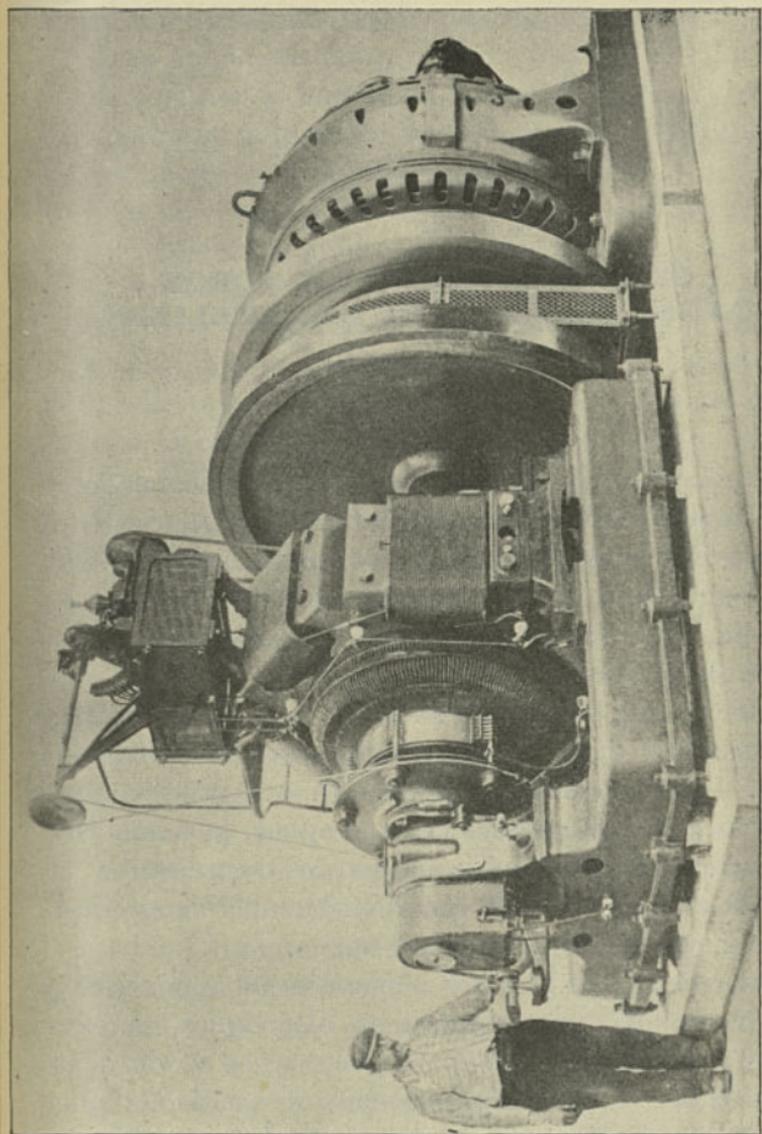


Fig. 49. — Groupe convertisseur de l'usine réceptrice de Lausanne. — A gauche, moteur électrique à haute tension à courant continu; à droite, dynamo à basse tension.

CHAPITRE VI

TRANSMISSION DE LA FORCE DANS LES USINES ET LES ATELIERS

Ce chapitre, que nous dédions plus spécialement aux industriels soucieux de réaliser de sérieuses économies sur leurs frais généraux, montrera comment on peut réduire de près de 50 pour 100 la dépense de charbon dans les usines grâce à l'emploi de transmissions électriques.

Qui d'entre nous n'a pas visité une de ces usines d'autrefois? — et il y en a encore beaucoup comme cela. — Qu'avons-nous remarqué? — Au milieu, un moteur à gaz ou une machine à vapeur, peu importe, de tous côtés de lourds arbres de transmission et une forêt de courroies qui distribuent l'énergie motrice à chacune des machines-outils.

Supposons que l'on ait remanié cette même usine en la dotant de transmissions électriques, retournons-y, nous ne la reconnaitrons plus, on y voit bien plus clair; telle est la première impression: plus d'arbres qui grincent et vibrent au plafond, plus de courroies, on se sent plus à l'aise; cependant tout marche comme auparavant: les ouvriers sont à leurs

machines et c'est à se demander quelle fée préside ainsi à cette transformation, — est-il besoin de le dire ? c'est la fée électricité.

Si l'atelier y gagne en propreté et en bien-être, l'intelligent industriel, auteur de cette initiative, y trouve aussi son avantage, car la même machine à vapeur devient capable d'actionner deux fois plus de machines-outils. Cela est si vrai que dans bien des cas, devant une augmentation de commandes ou une extension de l'usine, on a pu éviter l'achat d'une machine à vapeur supplémentaire rien qu'en jetant à bas toutes les transmissions. C'est qu'on ne se rend généralement pas compte de la puissance qu'elles absorbent.

Nous citerons deux exemples personnels que nous connaissons et dont nous pouvons répondre :

Dans une grande manufacture admirablement outillée, pourvue d'une équipe procédant à l'entretien des machines et des transmissions, placée par conséquent dans d'excellentes conditions, on a fait des mesures très précises du travail absorbé. On a trouvé que sur 100 kilogrammes de charbon brûlé, 37 kilogrammes étaient dépensés dans les transmissions d'un atelier et 34 kilogrammes dans les transmissions d'un deuxième. En somme, 71 kilogrammes sur 100 servaient uniquement à faire tourner des arbres et à user des courroies ; le reste, soit 29 kilogrammes étaient consacrés au travail utile des machines-outils !

Ainsi donc, 71 pour 100 de l'énergie sont absorbés par les frottements, la résistance de l'air, etc., et 29 pour 100 sont utilisés ; c'est plutôt maigre, comme on le voit.

Un autre exemple que nous connaissons bien nous est fourni par un petit atelier de mécanique qui était primitivement actionné par une machine à vapeur de 20 chevaux, installée dans l'atelier lui-même. Des mesures très exactes montrèrent qu'une puissance de 5 chevaux suffisait pour les groupes de machines-outils qui fonctionnaient le plus fréquemment, mais venait-on à mettre en marche une scie à ruban, la puissance absorbée s'élevait à 13 chevaux et même plus, car cette scie pouvait à certains moments caler à elle seule le moteur à vapeur.

Il est facile de voir que la machine à vapeur devait travailler dans de très mauvaises conditions de rendement, tantôt et le plus souvent au quart de la puissance pour laquelle elle avait été prévue, exceptionnellement à pleine charge lorsque par suite d'une coïncidence, plusieurs groupes de machines-outils parmi les plus importantes fonctionnaient simultanément.

Depuis plusieurs années la machine à vapeur a été supprimée et avec elle les transmissions mécaniques par arbres et courroies ; chaque machine-outil porte elle-même son moteur électrique qu'un commutateur placé à proximité de l'ouvrier permet de mettre en marche ou d'arrêter à volonté. Le courant est fourni par une usine centrale placée hors de l'atelier et à une certaine distance, en un endroit plus commode pour la manutention du charbon et de l'eau. Il en est résulté une grande économie puisque cet atelier n'absorbe plus sur la machine à vapeur centrale qu'une puissance de 3 chevaux en moyenne ; en tous cas, la consommation est exactement proportionnelle au travail demandé, car lorsqu'une machine-outil est inoc-

cupée on arrête son moteur et elle cesse par cela même de consommer. C'est beaucoup plus logique et on n'a pas l'ennui des courroies qui cassent ou qu'il faut retendre.

Le seul inconvénient que l'on puisse reprocher à une pareille transformation est son prix d'achat élevé, mais l'amortissement de ce matériel est vite réalisé par les économies qu'il procure; aussi tous les jours enregistre-t-on de nouvelles applications de ce système.

Avantages des transmissions électriques. — Les avantages des transmissions électriques sont nombreux et ce que nous avons pu dire n'en a été qu'un léger aperçu; pour en donner une énumération complète il faudrait passer en revue toutes les installations possibles et montrer dans chaque cas les résultats obtenus; nous nous contenterons de mettre en évidence les avantages généraux :

I. Avantages d'installation. — 1° *Facilité d'établissement.* — Avec les transmissions électriques il n'y a plus à se préoccuper des dispositions spéciales à donner aux bâtiments; des poutres, consoles à établir pour les arbres de transmission, etc. On peut compter sur 50 kg seulement par kilowatt avec les transmissions électriques.

2° *Meilleures dispositions.* — Les machines-outils et les outils eux-mêmes peuvent être disposés de la façon la plus avantageuse, du côté du jour pour la facilité du travail; enfin on a plus de place pour la manutention.

3° *Éclairage meilleur.* — La disparition de toutes les poulies, courroies et accessoires divers procurera

un bien meilleur éclairage; de sorte que l'ouvrier travaillera dans de bien meilleures conditions au point de vue de sa propre sécurité aussi bien que de son travail qu'il distinguera plus nettement.

4° *Encombrement évité.* — Les transmissions électriques font disparaître tout encombrement, la disparition des arbres et des courroies de transmission permet d'établir facilement des grues ou des ponts roulants dans toute la longueur de l'atelier.

5° *Déplacement facile des machines.* — La transmission électrique n'oblige pas à conserver à chaque machine-outil une place bien déterminée. Si un travail considérable se présente, on resserre les machines et on en met d'autres à côté, il suffit d'allonger les fils et c'est l'affaire de quelques heures.

II. Avantages d'exploitation. — Tous ces avantages ne sont relatifs qu'à l'installation, mais ceux que l'on trouve dans l'exploitation ne sont pas moindres; ce sont :

1° *Commodité d'emploi.* — La manœuvre se borne à tourner un commutateur, ce qui rend la machine aussi commode et aussi élégante qu'une lampe électrique.

2° *Facilité de réglage.* — On peut aujourd'hui à l'aide de moteurs convenablement étudiés obtenir par la manœuvre d'un simple rhéostat toutes les vitesses que l'on désire. Avec les courroies on doit recourir à des cônes étagés qui ne permettent pas de nombreuses variations.

3° *Renversement facile du sens de marche.* — Ainsi que nous l'avons vu au chapitre des moteurs électriques, un simple commutateur inverseur permet d'ob-

tenir la marche en avant ou en arrière; avec les transmissions par courroies, il faut employer des courroies croisées ou des trains d'engrenages compliqués, comme cela se pratique sur les automobiles.

4° *Surveillance supprimée.* — La surveillance des transmissions (arbres, poulies, courroies), soit pour le fonctionnement, soit pour le graissage, est complètement supprimée. La canalisation électrique bien installée et solidement établie n'a presque pas besoin de surveillance, des disjoncteurs ou coupe-circuits judicieusement répartis assurent toute sécurité.

5° *Division de la puissance.* — Les transmissions électriques permettent de diviser beaucoup la puissance et de la disséminer sur une grande surface, tandis qu'avec les transmissions par courroie on cherche à réunir aussi près les unes des autres qu'on le peut les machines-outils en vue d'éviter les courroies trop longues ou les arbres trop nombreux.

6° *Élasticité.* — Le moteur électrique, surtout celui à courant continu, peut arriver à fournir une puissance près de deux fois supérieure à celle pour laquelle il a été construit, à condition toutefois que l'effort qu'on lui demande soit de courte durée. Il n'en est pas de même avec les transmissions par courroie, qui glissent ou se cassent et peuvent amener des accidents.

7° *Bruit.* — Enfin, le bruit continu, les chocs et les grincements de courroies disparaissent en grande partie. Il reste, il est vrai, un ronflement dû au moteur électrique, mais il n'existe guère que sur les petits moteurs à allure rapide; sur les autres on n'entend plus que le travail de l'outil et le passage des agrafes de la courroie sur les poulies, s'il y en a.

III. Avantages économiques. — Au point de vue purement économique les avantages sont encore nombreux ; comme on le voit, l'énumération est longue, mais instructive.

1° *Consommation proportionnée au travail.* — Un moteur électrique consomme à vide très peu d'énergie, il n'absorbe réellement de l'énergie que lorsqu'on lui fait fournir du travail ; il y a presque proportionnalité. Avec les poulies et courroies la consommation est toujours élevée.

2° *Meilleure utilisation.* — La plupart des machines-outils dans les ateliers ne marchent pas continuellement toutes à la fois, il y a toujours de longues périodes d'arrêt ; tel est le cas des machines à fraiser, à mortaiser, etc., pour lesquelles le montage de la pièce à travailler sur la machine est plus long que le travail lui-même. Les transmissions par courroie doivent tourner pendant ce temps pour transmettre l'énergie aux machines voisines ; il en résulte une mauvaise utilisation.

Les moteurs électriques que l'on arrête et que l'on met en marche si facilement ne consommeront que lorsque ce sera nécessaire ; la dépense de combustible s'en ressent à la fin de la journée et la puissance disponible devient plus grande par ce fait seul que rarement, pour ne pas dire jamais, toutes les machines ne marchent à la fois.

Enfin, la centralisation d'une machine à vapeur en un endroit unique offre bien des avantages à tous les points de vue.

Exemples d'installation. — Un volume ne suffirait pas pour enregistrer les différentes installations où

les moteurs électriques ont reçu des applications ; presque toutes les industries l'emploient : la filature, le tissage, les sucreries, les ateliers de mécanique, les

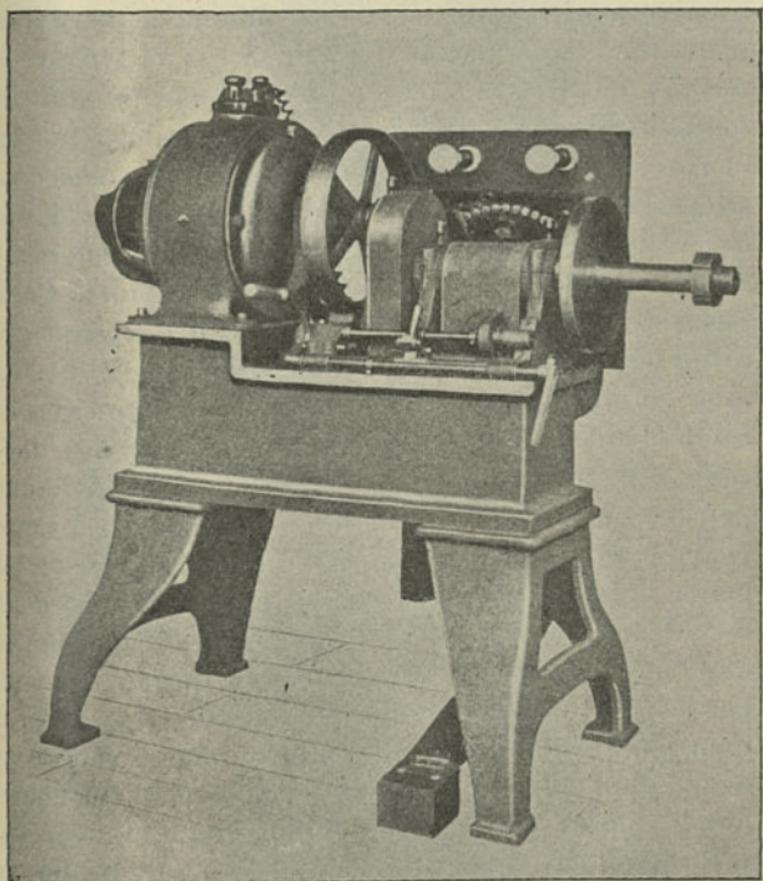


Fig. 50. — Tour commandé électriquement.

imprimeries, les menuiseries, etc., etc., pour n'en citer que les principales ; aussi de toutes ces applications nous n'en décrirons que trois à titre d'exemple :

La première est prise chez les Américains, les rois

de la machine-outil moderne, qui nous livrent aujourd'hui de toutes pièces la machine-outil, un tour dans le cas qui nous occupe, et le moteur qui l'accompagne. Comme on le voit sur la figure 50, le bâti du tour est préparé pour recevoir sur la gauche un moteur électrique à courant continu. Ce moteur est du type « fermé » ou « cuirassé », il est enveloppé de fonte de toutes parts et le collecteur seul est accessible à la gauche de la figure. Les inducteurs comportent quatre pôles, de façon à obtenir une vitesse plus faible que celle que l'on obtiendrait avec un moteur bipolaire ; elle est de 700 à 800 tours par minute. Cette vitesse est encore réduite par un train d'engrenages avant d'arriver à l'arbre du tour proprement dit. La mise en marche et l'arrêt s'obtiennent par un rhéostat de démarrage dont on distingue les touches derrière la poupée du tour ; ce rhéostat est commandé par une pédale placée sous le pied de l'ouvrier. Cette façon de procéder est très pratique, car elle laisse les mains libres pour le travail, ce qui peut avoir dans bien des cas de précieux avantages. Les deux lampes que l'on voit sont des lampes témoin qui préviennent par leur extinction lorsque le courant vient à manquer par suite de l'arrêt de la génératrice ou de la fusion d'un coupe-circuit. On doit à ce moment ramener le rhéostat vers l'arrêt, car lorsque le courant serait rétabli sur la canalisation, il pourrait brûler le moteur qui est arrêté et qui n'est pas protégé par son rhéostat.

Un deuxième exemple très général aussi, est pris dans l'imprimerie. Aujourd'hui, en effet, on rencontre dans presque toutes les grandes imprimeries des trans-

missions électriques. C'est que là, mieux que partout ailleurs, s'est fait sentir le besoin de disposer de plu-

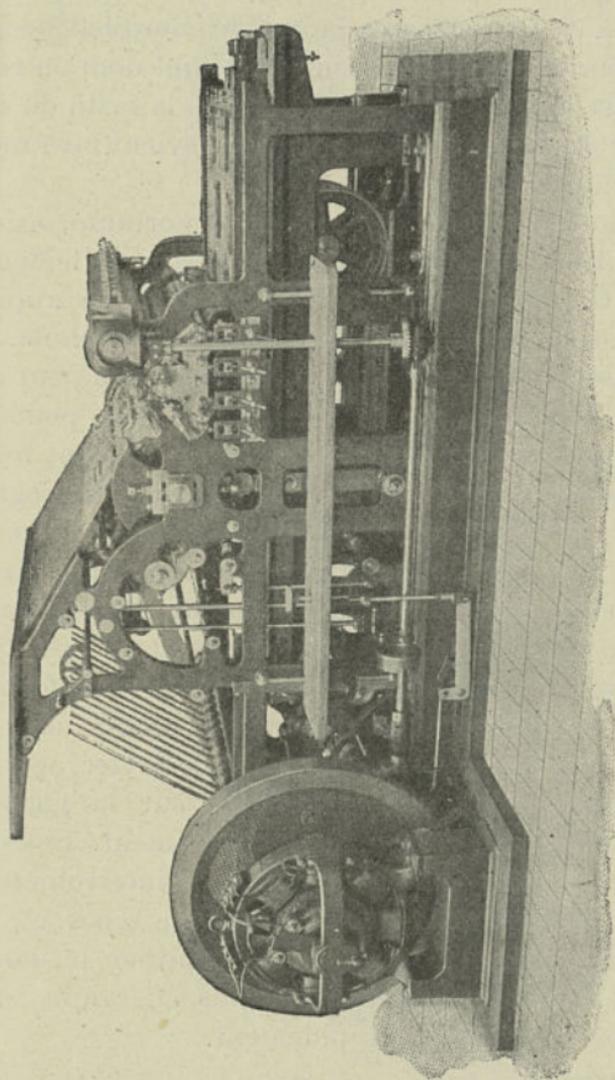


Fig. 51. — Presse typographique commandée électriquement.

sieurs vitesses suivant le travail à effectuer; en lithographie, surtout pour l'impression en couleurs, on

doit avoir des allures très différentes. On y arrivait autrefois avec des cônes étagés et des courroies, mais il fallait trop de poulies et malgré cela on n'avait pas un choix de vitesse assez grand. Aujourd'hui on emploie couramment un moteur électrique dont on règle la vitesse à l'aide d'un rhéostat sous la main du conducteur de la machine. Le travail devient bien meilleur et bien plus commode.

La figure représente une presse importante, organisée par les ateliers *Siemens-Schuckert*, en Allemagne, et qui est commandée par un moteur électrique à 8 pôles, calé directement sur l'axe de la machine. Sur des presses plus petites on se contente d'un petit moteur à deux ou à quatre pôles muni d'une poulie en cuir et qui attaque par friction le volant dont toutes ces machines sont munies. La pression se règle à l'aide de vis qui permettent de faire avancer ou de reculer le moteur, et cette transmission sans courroie ni engrenages fonctionne parfaitement; elle est simple, peu encombrante et ne fait aucun bruit.

La mise en marche s'obtient de la plate-forme à l'aide d'un levier qui commande le rhéostat de mise en marche. Le plus souvent ce même levier actionne un frein à sabot venant appuyer sur la jante du volant quand on veut arrêter rapidement. Son rôle est donc, dans ce cas d'abord, d'interrompre le courant en ramenant le rhéostat au repos et, ensuite, de venir faire frein si on continue le mouvement. Ce freinage est d'autant plus énergique qu'on opère plus fort et plus rapidement.

Un troisième et dernier exemple montrera encore ce qu'on peut obtenir des transmissions électriques

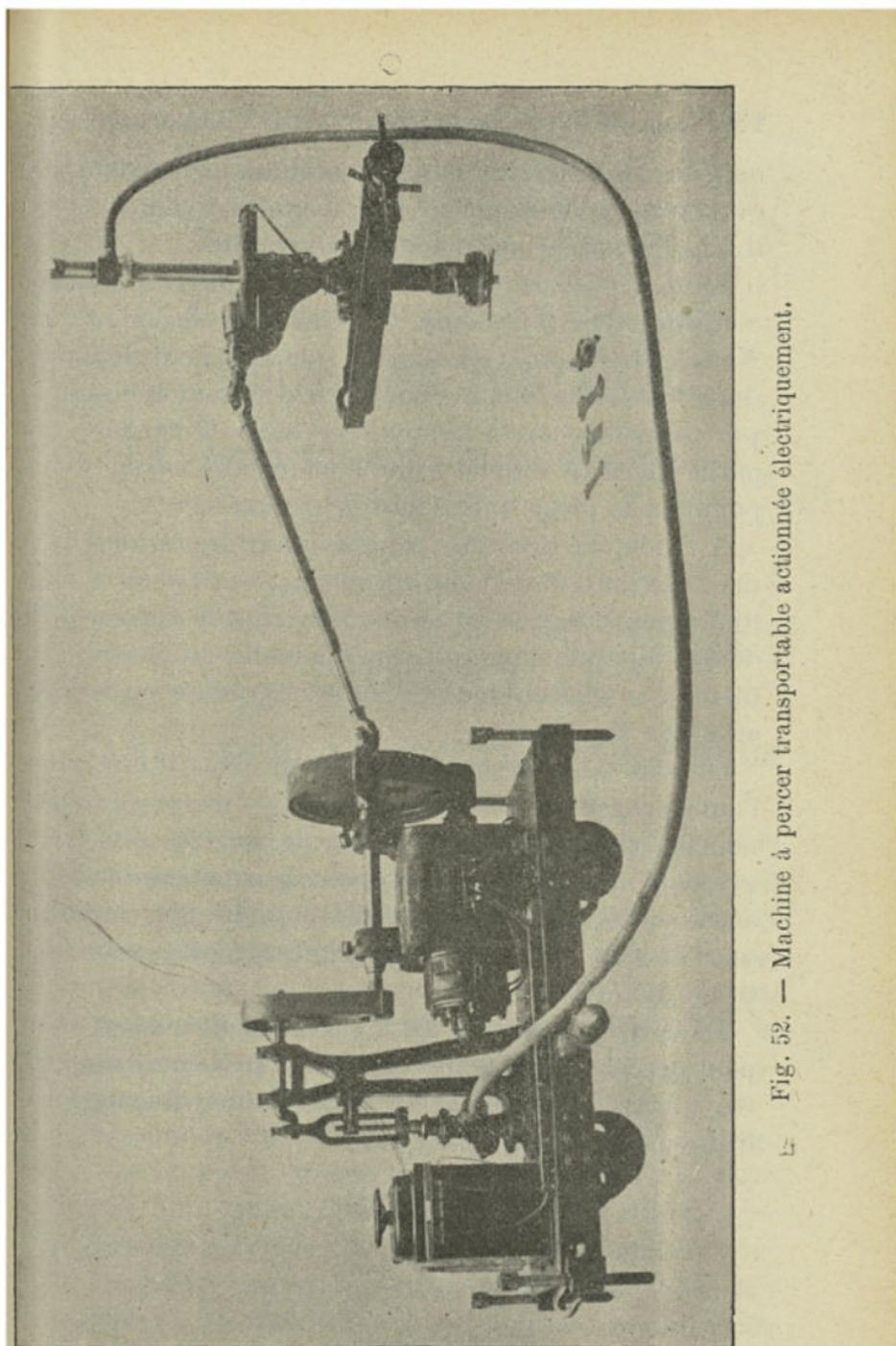


Fig. 52. — Machine à percer transportable actionnée électriquement.

dans les chantiers ou dans les ateliers de construction où l'on ne peut déplacer les pièces à travailler et où il faut les percer sur place par exemple.

La figure 52 représente un petit moteur à courant continu, type blindé de *C^{ie} Générale électrique de Nancy*, monté sur un chariot que l'on peut déplacer dans l'atelier ou sur le chantier. Ce moteur commande par transmission à genouillère ou à *la cardan* une petite machine à percer que l'on installe sur la charpente ou la pièce qu'il s'agit de traverser.

A l'aide de deux fils volants on relie le moteur à une distribution de courant voisine, — il y en a partout aujourd'hui, — et en manœuvrant le rhéostat de démarrage que l'on voit sur la gauche du chariot, le moteur se met en marche et la charpente en fer est attaquée par l'outil.

On sait que lorsqu'on perce un trou il faut que l'outil progresse dans la cavité, sinon l'usure du métal ne se produit pas. Dans le but de rendre cette progression automatique une petite pompe commandée aussi par le moteur refoule un liquide dans le tube que l'on voit traîner à terre et chasse peu à peu l'outil en avant.

De cette manière on n'a à s'occuper de rien et l'on peut percer ainsi des pièces même très importantes. On construit sur le même principe des machines à fraiser, à mortaiser, etc., etc.

TROISIÈME PARTIE

LA TRACTION ÉLECTRIQUE

CHAPITRE I

AVANTAGES DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE

La traction électrique qui est un cas particulier de la transmission de l'énergie à distance, rentrerait dans la précédente partie, mais étant donnée son importance, nous n'avons pas hésité à lui consacrer une place spéciale pour l'examiner sous toutes ses formes.

Que ce soit sur rails ou sur une route ordinaire la propulsion des véhicules au moyen de l'énergie électrique présente de sérieux avantages.

Examinons d'abord ceux dont bénéficie le voyageur; il n'y a plus cette fumée noire si désagréable ni cette vapeur imprégnée d'une mauvaise odeur d'huile que projettent encore la plupart de nos locomotives, plus de bruit de ferraille; et, enfin, dans les véhicules automoteurs tels que tramways et voitures automobiles plus de ces trépidations ou de ces mouvements de

va-et-vient qu'imprime à la voiture le déplacement alternatif et saccadé des pistons.

Avec la traction électrique la suppression du bruit et de la fumée n'est pas le moindre des avantages ; le mouvement des moteurs étant circulaire, on ne ressent aucune secousse ; bien mieux, on ne sent pas la voiture rouler, au dire de beaucoup de personnes. On peut, dès lors, aborder sans crainte sur rail des vitesses élevées, car les mouvements de lacet n'existant plus la marche devient beaucoup plus stable.

Au point de vue des compagnies exploitantes l'emploi de la traction électrique procure encore de sérieuses économies, attendu que, sur un réseau à trafic intensif comme aux environs des grandes villes, par exemple, il y a avantage à brûler le charbon dans une usine unique produisant du courant et le distribuant par conducteurs aériens aux différents trains éparpillés sur la ligne, plutôt que d'alimenter en combustible une foule de petits foyers isolés, tantôt au repos, tantôt en marche, comme c'est le cas des locomotives à vapeur actuelles. On y gagne en économie de combustible d'abord et économie de personnel ensuite. Si, de plus, on peut disposer, d'une chute d'eau comme on en trouve dans tous les pays de montagne, l'économie est plus grande encore.

Enfin, est-il besoin d'insister pour démontrer les avantages de propreté et d'économie que présente la traction électrique sur... « la plus noble conquête de l'homme », nous avons nommé le cheval ?

Prenons le cas d'une compagnie de tramways, par exemple ; au lieu d'entretenir dans ses écuries une formidable cavalerie en vue de faire face aux exigences du public les jours de grand trafic, il lui suffira d'avoir

une machine à vapeur de réserve ou même une batterie d'accumulateurs que l'on chargera de donner le coup de collier nécessaire. Ces réserves ne dépenseront rien tant qu'on ne s'en servira pas, alors que le cheval ne s'accommoderait pas du tout de pareil régime.

Nous examinerons successivement les trois cas suivants où la traction électrique peut être utilisée :

- 1° Tramways électriques ;
- 2° Chemins de fer électriques ;
- 3° Automobiles électriques.

CHAPITRE II

TRAMWAYS ÉLECTRIQUES

La traction électrique des tramways peut s'effectuer au moyen de quatre systèmes principaux :

- 1° Le trolley aérien ;
- 2° Le caniveau souterrain ou trolley souterrain ;
- 3° Les contacts superficiels ;
- 4° Les accumulateurs.

Les 3 premiers systèmes reposent sur un même principe :

En un point quelconque du parcours, au centre du réseau s'il s'agit d'une ville, se trouve une usine génératrice avec des dynamos actionnées par des machines à vapeur ou à gaz, ou même des turbines si on se trouve en pays de montagne. Le courant produit par les dynamos est transmis aux voitures par un fil qui peut être aérien ou souterrain, il revient ensuite à l'usine par les rails de roulement.

Des moteurs électriques (page 84) montés sur les essieux de chaque voiture reçoivent le courant et mettent la voiture en mouvement. Sur les plates-formes se trouvent des interrupteurs et autres appareils de

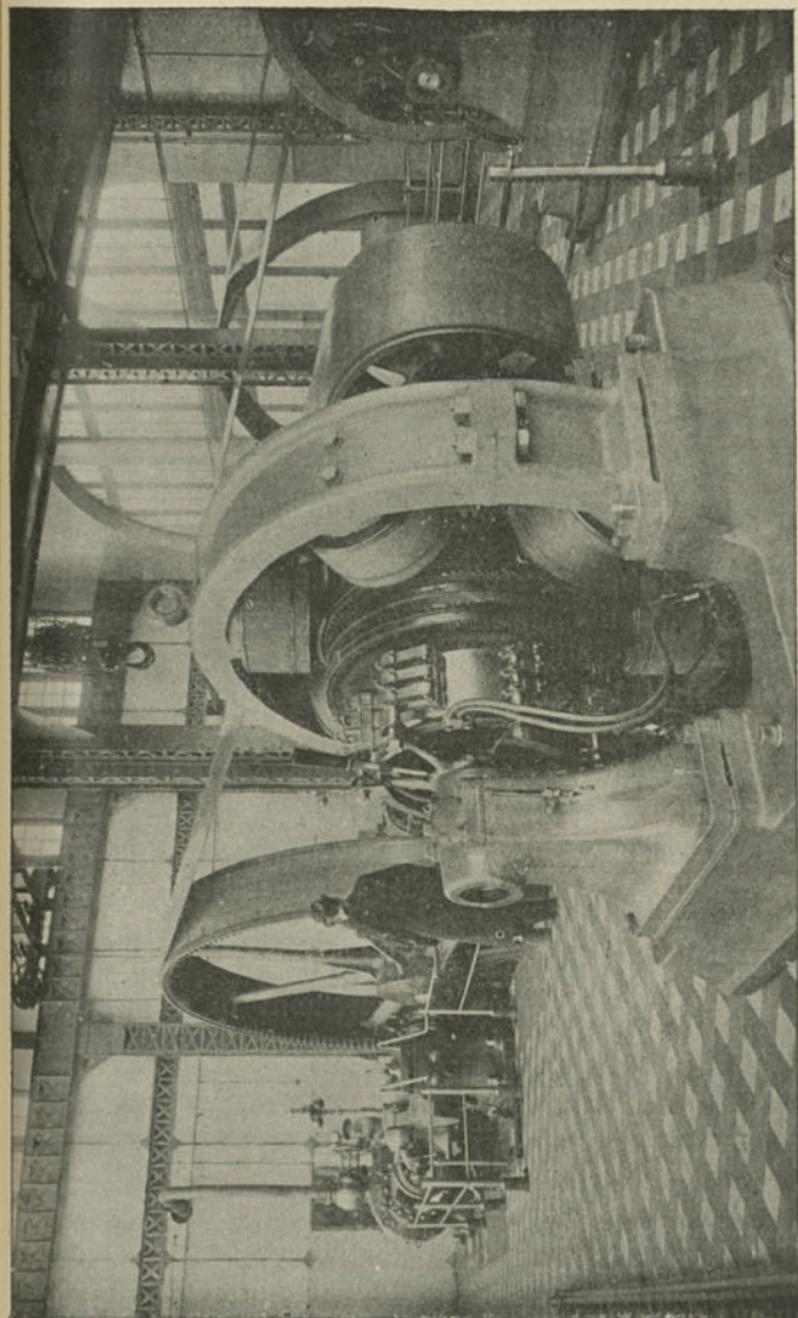


Fig. 53. — Vue intérieurs d'une usine génératrice pour tramways électriques.

manœuvre (voir page 81) qui permettent de commander la marche de la voiture et d'en régler la vitesse.

Les tramways à accumulateurs sont à l'inverse des premiers complètement indépendants de l'usine génératrice; ils emportent avec eux une provision d'énergie électrique calculée pour suffire amplement au parcours. On charge les accumulateurs à la station de départ à l'aide de deux câbles reliés à une usine électrique voisine.

Le principe exposé, nous examinerons en détail de traction chacun de ces systèmes avec les critiques auxquelles ils pourront donner lieu.

1° Traction par trolley aérien.— C'est en 1881 que l'on vit fonctionner en France le premier tramway électrique à trolley à l'exposition d'électricité, où il transportait les nombreux visiteurs de la place de la Concorde au palais de l'Industrie.

De longues années se sont écoulées depuis et il fallut que l'audacieuse Amérique nous montrât l'exemple en transformant ses réseaux entiers de tramways avant que l'on put se décider à introduire la traction électrique sur notre sol si fertile en découvertes, mais si difficile et si lent aux applications.

Tel qu'il fonctionne actuellement le système à trolley consiste à capter le courant sur des fils aériens à l'aide d'une perche ou trolley que des ressorts maintiennent en contact avec la ligne aérienne. Afin de diminuer l'usure due au frottement et aussi pour faciliter le glissement on dispose une petite roulette à l'extrémité qui prend contact avec la ligne. Enfin, pour aider les passages en courbe, la perche pivote autour de son point d'attache sur la voiture, ce qui

lui permet de suivre toutes les sinuosités de la ligne (fig. 54).

D'autres systèmes, également à fil aérien emploient l'archet, lequel, comme son nom l'indique, est formé par une tige courbée en arc de cercle et qui vient s'appuyer contre la ligne à l'aide de ressorts à la façon du trolley. Ce système supprime les déraillements de la roulette car la ligne touche toujours en un point de l'archet soit au milieu soit à une de ses extrémités (fig. 55).

La ligne est formée généralement d'un fil de cuivre dur de 8,8m/m de diamètre solidement supporté par des poteaux ou des fils transversaux par l'intermédiaire d'isolateurs, on la relie à un des pôles d'une dynamo génératrice tandis que l'autre pôle est relié aux rails.

L'éclissage, tel qu'on le fait sur les chemins de fer,

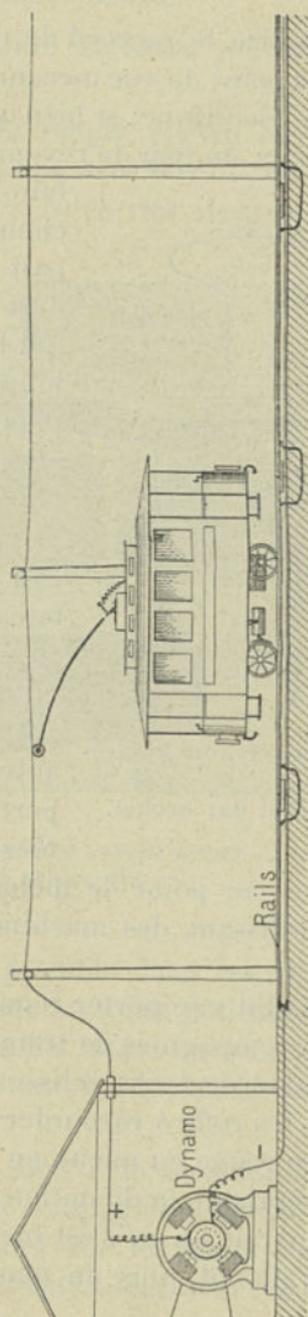


Fig. 54. — Schéma d'une installation de tramways électriques par fil aérien et trolley.

c'est-à-dire le raccord de deux rails consécutifs, très bon au point de vue mécanique est déplorable au point de vue électrique; si bien que, dans les premières installations, au lieu de revenir à l'usine par la voie qu'on

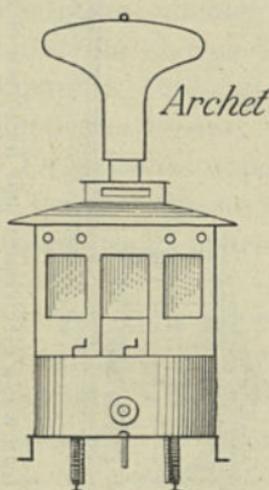


Fig. 55.—Tramway électrique avec prise de courant par archet.

lui offrait, le courant prenait le chemin des écoliers, s'échappait des rails et gagnait les conduites d'eau ou de gaz voisines qui lui offraient un chemin plus long mais meilleur, c'est-à-dire plus conducteur. Tout aurait été pour le mieux dans le meilleur des mondes si le courant n'avait occasionné certains dégâts dont les moindres consistaient à percer les conduites au grand désespoir des compagnies exploitantes.

D'autres inconvénients d'un autre ordre résidaient dans les perturbations énormes apportées aux circuits téléphoniques voisins au point de mêler dans ces circuits le bruit assourdissant des machines à la transmission de la voix.

Il fallut vite porter remède sous peine... d'amende et les compagnies de tramways durent procéder à la réfection de leurs éclisses en réunissant électriquement les rails à raccorder au moyen d'une bande de cuivre rouge ou mieux en soudant les rails entre eux au mépris de la dilatation classique.

Il paraît qu'on s'est bien trouvé de ce moyen car on n'entend plus de plaintes de ce côté, les seules

critiques vont à la canalisation aérienne qui manque d'esthétique.

Il convient cependant de réagir contre ce parti pris ; une ligne à trolley établie avec des fils en accotement, c'est-à-dire sur les côtés des chaussées de



Fig. 56. — Tramway à traction mixte par fil aérien et trolley et par caniveau souterrain.

façon à être dissimulée si possible dans les arbres, peut, si elle a été bien montée avec des poteaux d'un style élégant et léger et sans fils transversaux, triompher de toutes les critiques, par les bienfaits qu'elle procure.

C'est d'abord, de tous les modes de locomotion, le plus économique ; si donc la compagnie y trouve son profit, le voyageur y gagnera car les tarifs seront abaissés, ensuite les chances d'accident sont rares et

le système est si simple que la moindre interruption est vite trouvée et vite réparée.

Dans quelques villes comme Paris, Lyon, Nice, etc., on n'a pas pu se résoudre dans la traversée de certaines rues ou boulevards à l'adoption du trolley aérien, il a fallu l'installer en souterrain comme nous allons le voir.

2° **Traction par trolley souterrain.** — Ce procédé était tout indiqué : on creuse un caniveau entre les

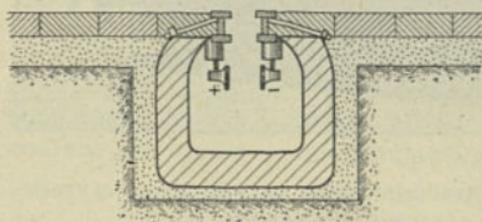


Fig. 58. — Coupe du frotteur et du caniveau souterrain.

deux rails au fond duquel on place le fil aérien soigneusement tendu et supporté par de bons isolateurs. Un frotteur, passant par une fente étroite pratiquée dans l'axe de la chaussée, vient capter le courant en frottant sur le fil et l'amène à la voiture.

Tel est le principe ; mais, en pratique, des difficultés nombreuses surgissent ; d'abord, ce caniveau est le rendez-vous des eaux et immondices et tout cela n'est pas fait pour améliorer l'isolement du fil, loin de là. Ensuite, sous la poussée des terres ou des pavés de bois, la fente tend à se resserrer et ne laisse plus le jeu nécessaire à la circulation du frotteur.

Après de longues et nombreuses recherches on a été conduit à creuser un caniveau assez grand pour qu'un homme courbé puisse y circuler et le nettoyer, ensuite on a constitué ce caniveau par de fortes ossatures métalliques en forme d'U qui s'opposent au rapproche-

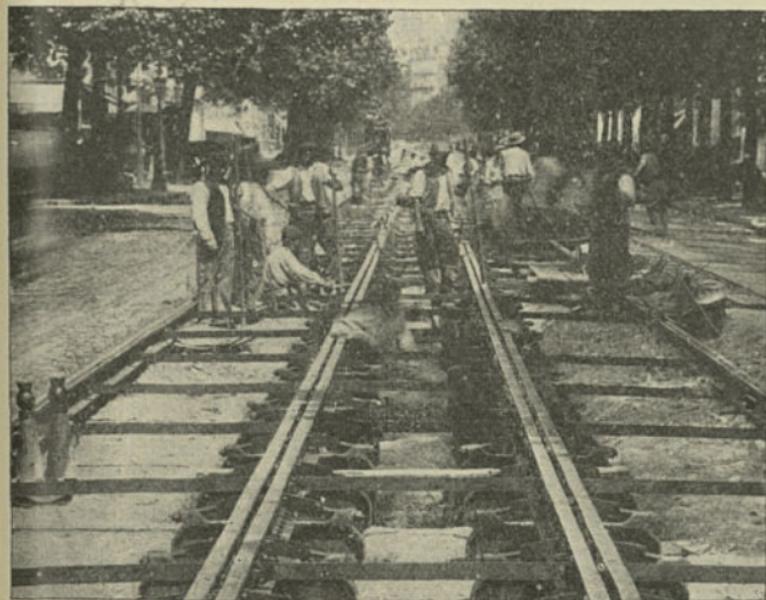


Fig. 58. — Construction d'une ligne de tramways électriques à caniveau souterrain.

ment des deux bords de la fente. Le conducteur isolé a été suspendu à la hauteur la plus grande possible au-dessus du fond du caniveau de façon à rester éloigné des eaux qui envahissent le souterrain par les fortes pluies. Ce conducteur a été doublé, on en place généralement deux à côté l'un de l'autre (fig. 58), afin de supprimer le retour du courant par les rails si funeste aux canalisations d'eau ou de gaz. Il a fallu

combiner, dès lors, un double frotteur (figuré hors du caniveau) appuyant à la fois sur les deux conducteurs, c'est ce qui a été réalisé pratiquement par la compagnie Thomson-Houston au prix de patientes études, mais qui ont été, il faut le dire, couronnées de succès. Les aiguillages sont un peu plus compliqués qu'avec le trolley ; on a dû, en effet, établir dans le caniveau un aiguillage pour le frotteur analogue à celui des rails ; la difficulté a été cependant très bien résolue ; on exige seulement un léger ralentissement des conducteurs de tramways au moment où la voiture aborde un changement de voie et cela se conçoit.

Ce système serait évidemment le système idéal pour toutes nos grandes villes s'il ne coûtait horriblement cher comme frais d'installation. Il faut, en effet, ouvrir et creuser la chaussée sur toute la longueur de la voie et y ensevelir une masse énorme de charpentes en fonte destinées à contenir les terres et leur poussée comme on le voit sur la figure 58. Des écoulements à l'égout doivent aussi être ménagés de distance en distance et on conçoit que ce ne soit pas une petite affaire.

3° Traction par contacts superficiels. — Tandis que les lignes à trolley reviennent environ à 20 000 francs le kilomètre, le caniveau souterrain est beaucoup plus cher ; on cite le chiffre de 300 000 francs le kilomètre et il n'a rien d'exagéré. Devant ce prix élevé, plusieurs compagnies, désireuses d'obtenir des concessions, ont ramené le contact au niveau du sol et on a eu les lignes à contact superficiel dont le système Diatto a été un des types les plus répandus.

Établir des prises de courant au ras du sol n'est

pas une chose exempte de danger pour chevaux et piétons aussi a-t-il fallu prévoir des mécanismes ingénieux pour ne laisser échapper ce courant qu'au moment du passage du tramway. Plusieurs systèmes ont été proposés mais aucun n'a paru satisfaire pleinement aux conditions exigées, de sorte que c'est toujours le trolley aérien ou souterrain qui détient le record du bon fonctionnement en matière de tramways électriques.

Nous décrirons un seul de ces systèmes, le Diatto, qui a fonctionné un peu partout et que l'on connaît plus ou moins de nom.

En principe les systèmes à contact superficiel consistent à disposer, tous les 2 ou 3 mètres et dans l'axe de la voie, des pavés métalliques isolés du sol avoisinant par une coulée d'asphalte et que l'on relie à la dynamo de l'usine génératrice par l'intermédiaire d'un câble et d'un interrupteur. La voiture, en passant au-dessus de chaque pavé métallique ou *plot*, manœuvre cet interrupteur de façon à établir le contact entre l'usine et le plot puis, dès qu'elle est passée, ce contact se rompt automatiquement et ainsi de suite.

Si donc on dispose un frotteur sous la voiture, on pourra recueillir le courant et le transmettre au moteur. Mais comment va-t-on pouvoir manœuvrer si intelligemment et si rapidement ces multiples interrupteurs ?

Là-dessus les inventeurs se sont donné libre carrière et ont fourni des systèmes, plus ou moins ingénieux.

Le pavé métallique ou *plot* du système Diatto est creux, il contient une cuvette pleine de mercure, ce

métal liquide si cher aux physiciens, et dans ce mercure flotte un clou en fer.

Le mercure est en communication avec la dynamo de l'usine génératrice par un câble souterrain isolé. Au-dessus de la cuvette se trouve la partie métallique du plot mais sans contact aucun avec elle. Le courant est donc interrompu en ce point et le plot n'est pas électrisé, c'est la position normale.

Un tramway vient-il à passer au-dessus du plot, grâce à de puissants aimants situés au-dessous du plancher de la voiture trainants presque sur le sol, le clou se soulève, il vient toucher la partie métallique isolée et la met en communication avec l'usine électrique, la frotteur dont est muni la voiture recevra du courant. Sitôt le tramway passé le clou retombe n'étant plus maintenu soulevé par l'aimant et le plot cesse d'être électrisé.

La figure 59 montre la coupe intérieure d'un plot,

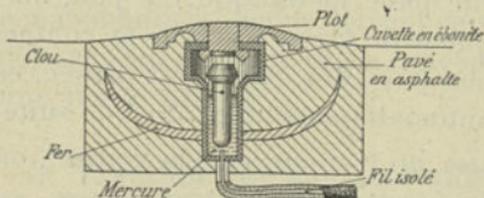


Fig. 59. — Coupe d'un plot système Diatto.

on distingue nettement le bossage métallique qui émerge du sol et sur lequel le frotteur de la voiture vient prendre contact.

Au-dessous se trouve la cuvette pleine de mercure et le clou en fer qui flotte dans ce liquide. Cette cuvette est en ébonite ou autre matière isolante, un fil placé dans le bas relie le mercure à la dynamo de l'usine génératrice.

La tête du clou au lieu d'être métallique est garnie de charbon de cornue, et ceci pour deux raisons : en

premier lieu le contact entre le clou et le plot doit être parfait et par conséquent inoxydable, seul le platine ou mieux le charbon d'un prix bien moins élevé pouvait remplir ce but, en second lieu le clou doit retomber sitôt que l'aimant qui le maintient soulevé cesse d'agir, il fallait à tout prix éviter les effets du magnétisme rémanent qui aurait pu laisser le clou collé au plot ne fût-ce que quelques instants, l'interposition de la tête en charbon évite cet inconvénient.

Enfin, on remarquera deux nervures en forme de croissant qui partent de la cuvette, ce sont des ferures qui n'ont d'autre but que de concentrer vers la cuvette les lignes de force émanant de l'aimant que porte le tramway et de faciliter par cela même l'attraction du clou.

Voilà un système vraiment simple et qui laisse loin derrière lui d'autres appareils à distributeurs, d'apparence bien moins robuste. Malheureusement, le système Diatto s'est signalé, peu après son apparition, par de nombreux accidents: souvent les plots restaient électrisés sans cause apparente, et malheur à celui qui posait le pied sur un de ces pavés métalliques, tantôt ce furent des piétons, tantôt des chevaux qui reçurent de désagréables commotions.

Cela a suffi à condamner un système qui peut-être aurait donné d'excellents résultats s'il avait été mieux construit.

Trop souvent, en effet, l'eau dont on arrose avec tant de profusion les chaussées s'est introduite dans la cuvette et en a détruit l'isolement en venant établir une communication entre le mercure et le plot. D'autres fois, c'est une étincelle qui se produit au moment où le clou retombe qui, en réduisant le char-

bon en fumée, compromet également l'isolement. Quoi qu'il en soit, la plupart des lignes ont dû être remaniées et les plots réparés.

D'autres systèmes analogues ont fonctionné à Paris tels sont le Claret et Vuilleumier à distributeurs, le Dolter, le Vedovelli, etc., nous ne les citons que pour mémoire ; d'autres ont donné certains résultats à l'étranger tels que le Westinghouse et le Lorain, mais en général les administrations paraissent peu disposées en faveur des contacts superficiels.

4° Traction par accumulateurs. — Découverts par Planté, il y a près d'un demi-siècle, les accumulateurs électriques n'ont malheureusement guère fait de progrès depuis cette époque. Dans notre « *Traité pratique d'Électricité* » nous avons décrit plusieurs de ces appareils, nous n'y reviendrons pas, nous bornant à en rappeler le principe :

Si on relie les deux pôles d'une pile ou d'une machine à courant continu donnant plus de 2 volts à deux lames de plomb plongeant dans l'eau acidulée sulfurique on constate que l'une des lames, celle qui est reliée au pôle positif prend une couleur marron foncé tandis que l'autre tend à devenir blanc grisâtre.

On constate de plus que cet ensemble est ensuite capable de restituer une partie de l'énergie qu'il a reçue, d'où le nom d'*accumulateur*.

Si, par exemple, on charge un élément de ce genre avec une machine magnéto que l'on tourne à la main, on observe qu'en abandonnant la manivelle, la machine s'arrête et repart aussitôt en sens inverse. Elle tourne ainsi en moteur tant que l'accumulateur lui fournit de l'énergie.

De là à la traction électrique il n'y a qu'un pas.

Sur un tramway électrique, nous plaçons des accumulateurs sous les banquettes des voyageurs, par exemple ; ces accumulateurs sont chargés à la tête de ligne en les reliant par un fil volant à une usine électrique du voisinage, ils emmagasinent de l'énergie, puis quand ils sont suffisamment chargés, nous enlevons la liaison avec l'usine électrique et nous envoyons le courant de la batterie dans les moteurs de notre tramway électrique.

La voiture se mettra en mouvement absolument comme si le courant provenait du trolley, mais avec cette différence qu'elle pourra rouler sur n'importe qu'elle voie existante sans souci pour l'arrivée ou le retour du courant. C'est le système idéal par excellence, supprimant les inconvénients du fil aérien, du caniveau, du contact superficiel, absolument autonome et sans danger aucun.

Mais alors pourquoi ce système n'a-t-il pas eu raison de tous les autres ?

La raison est facile à deviner, les accumulateurs actuels sont trop lourds, on les fait en plomb !

Ensuite ils ne sont pas parfaits et ils ne restituent qu'une partie de l'énergie qu'ils ont reçue. Mais tout cela ne serait rien puisque dans les systèmes à caniveau, à trolley, etc., on a aussi des pertes dans les canalisations, un des plus grands inconvénients est leur entretien onéreux résultant de ce qu'ils s'accommodent mal des trépidations que le tramway ne leur épargne guère.

Pour que l'accumulateur ait quelque chance de réussir dans cette voie il faudrait se débarrasser du plomb en trouvant une combinaison remplissant le

même but avec un poids mort bien moindre, ensuite il faudrait arrêter la désagrégation des plaques en empêchant, si possible, la matière qui les recouvre de tomber sous l'action des chocs. Mais ce n'est pas une petite affaire et en tout cas les chercheurs ont de la besogne.

Il faut pour le moment nous contenter de ce que nous avons et malgré le peu de légèreté des batteries plusieurs lignes de tramways utilisent des accumulateurs. Quelques progrès ont été faits cependant, il faut bien le dire au point de vue de la recharge.

Les constructeurs d'accumulateurs, grâce à une fabrication spéciale de leurs batteries de tramways ont pu en assurer la recharge en une dizaine de minutes seulement. Il fallait auparavant plusieurs heures, de sorte que si on ne voulait pas immobiliser la voiture on était conduit à changer la batterie ce qui était d'une manipulation plutôt pénible. Avec le nouveau système, la recharge se fait pendant les stationnements inévitables aux têtes de ligne, tel est le cas des tramways du Louvre au Cours de Vincennes à Paris, ainsi que ceux de la Madeleine à Levallois et à Courbevoie. Dans d'autres systèmes, la voiture, munie d'un trolley, se sert du fil aérien hors des villes à la fois pour sa propulsion et pour la recharge de sa batterie; les accumulateurs seuls assurent ensuite la traversée de la ville ce qui supprime les fils aériens dans les rues et les critiques dont ils sont l'objet.

CHAPITRE III

LES CHEMINS DE FER ÉLECTRIQUES

La traction électrique des trains sur les grandes voies ferrées n'a pas encore été réalisée sur une grande échelle et nombreuses sont et seront encore les locomotives à vapeur. Cependant les progrès incessants de la science électrique nous permettent de dire que la transformation se fera un jour. Déjà, plusieurs tronçons de ligne utilisent des locomotives électriques, ce sont, d'une part, les lignes très fréquentées desservant les abords des grandes villes ou les villes elles-mêmes comme le chemin de fer électrique de Paris à Versailles, la ligne d'Orléans entre Paris et Juvisy et enfin le chemin de fer métropolitain. D'autre part, dans les Alpes et les Pyrénées on s'est enfin adressé aux torrents impétueux qui descendent des glaciers pour leur demander l'énergie nécessaire à la propulsion des trains sur de nombreuses lignes voisines, toutes à profil des plus accidentés.

Nous citerons le chemin de fer électrique du Fayet à Chamonix construit dans la Savoie par la C^{ie} P.-L.-M., et le chemin de fer de Pierrefitte à Cauterets, dans

les Pyrénées; enfin n'oublions pas qu'il existe dans la Suisse un grand nombre de petites lignes à crémaillère grim pant au flanc des montagnes et destinées à hisser les touristes sur les cimes les plus escarpées, témoin le chemin de fer électrique de la Jung-Frau qui amène les voyageurs au sommet même des glaciers.

Il est évident que l'élan est donné et tôt ou tard nous aurons à enregistrer de nouvelles conquêtes de l'électricité dans cette voie. Dans l'état actuel de la science on ne peut guère compter distribuer économiquement l'énergie électrique à des trains échelonnés le long d'une ligne de 400 à 500 kilomètres de longueur comme de Paris à Lyon par exemple, mieux vaut encore transporter du charbon dans le tender des locomotives à vapeur actuelles, il n'y a pas d'illusion à se faire à ce sujet.

Cependant, nous croyons savoir que la question est à l'étude dans tous les pays et peut-être qu'un jour, lorsque les moteurs à courant alternatif seront en mesure de rivaliser avec le courant continu le problème pourra être repris.

Le courant alternatif, nous l'avons vu, jouit de la merveilleuse qualité de n'exiger pour son passage de haute tension en basse tension qu'un transformateur inerte que l'on loge où l'on veut et qui ne nécessite aucune surveillance. On pourra donc, lorsqu'on disposera de bons moteurs à courant alternatif, produire du courant alternatif à la plus haute tension possible, 50 000 volts par exemple, le lancer dans le fil aérien d'une ligne à trolley suivant la voie ferrée et de laquelle, tout comme les tramways électriques actuels, le train pourra recevoir le courant nécessaire à sa pro-

pulsion: Ce courant sera transformé dans le train même; pour éviter les dangers, les transformateurs seront rendus inaccessibles; ils pourront être mis pour cela dans un compartiment spécial et au sortir de ces appareils, à une basse tension cette fois, le courant se rendra aux moteurs absolument comme s'il provenait d'une ligne aérienne ordinaire à courant continu.

Mais nous n'en sommes pas là et il faut bien se contenter de ce que nous avons; nous allons donc indiquer la solution générale actuelle du problème en prenant le chemin de fer Métropolitain de Paris comme exemple.

Chemin de fer Métropolitain. — Le charbon qui fournit l'énergie à ce réseau si actif est brûlé dans une usine de dimensions respectables située sur le bord de la Seine, à Bercy, où le ravitaillement se fait facilement.

Une batterie de trente chaudières utilise ce charbon et la vapeur obtenue est envoyée à plusieurs machines à vapeur de 3 000 chevaux, par conséquent très puissantes et à bon rendement.

Les machines à vapeur entraînent des alternateurs triphasés (voir page 14) fournissant entre leurs trois fils des courants à la tension de 5 000 volts. Ces courants triphasés sont transmis par trois câbles soigneusement isolés, non pas au chemin de fer lui-même, mais à une série de sous-stations réparties un peu partout dans Paris.

Dans ces sous-stations on trouve d'abord des transformateurs à courant alternatif qui transforment les courants à 5 000 volts en courants à 430 volts. Ce sont ces courants à 430 volts que l'on fait aboutir aux trois

bagues de la commutatrice décrite page 38 et qui sert à transformer les courants triphasés en courant continu. Sur le collecteur à lames de la commutatrice on recueille du courant continu à 600 volts que l'on envoie celui-là aux voitures du chemin de fer métropolitain; nous verrons plus loin comment.

Ainsi qu'on s'en rend compte, c'est plutôt compliqué et on comprend facilement qu'il se perde pas mal d'énergie dans toutes ces transformations. Malgré cela, ce système de traction est plus économique que la vapeur sur un réseau à trafic intense; c'est même pourquoi à Londres on a transformé l'ancien Métropolitain à vapeur qui avait plus d'un demi-siècle d'existence et qu'on l'a doté de la traction électrique. Si les compagnies y ont gagné, les voyageurs, en tous cas, n'y ont pas perdu par suite de l'absence totale de fumée et de l'augmentation de vitesse commerciale qui en ont été les conséquences.

D'autres lignes appartenant aux compagnies de chemin de fer et desservant les banlieues ont été depuis peu pourvues de la traction électrique; nous en citerons deux : la ligne des Invalides à Versailles, appartenant à la C^{ie} de l'Ouest, et la ligne du quai d'Orsay à Juvisy, appartenant à la C^{ie} d'Orléans. Ces deux lignes utilisent l'énergie électrique sur un système absolument analogue à celui du Métropolitain. Une grande usine centrale, établie comme toujours sur les bords de la Seine où elle peut s'approvisionner facilement en eau et en charbon, produit des courants alternatifs triphasés à la tension de 5 000 volts entre fils et envoie ces courants dans des sous-stations convenablement réparties le long de la ligne; le chemin de fer de Paris à Versailles en compte trois; ces sous-

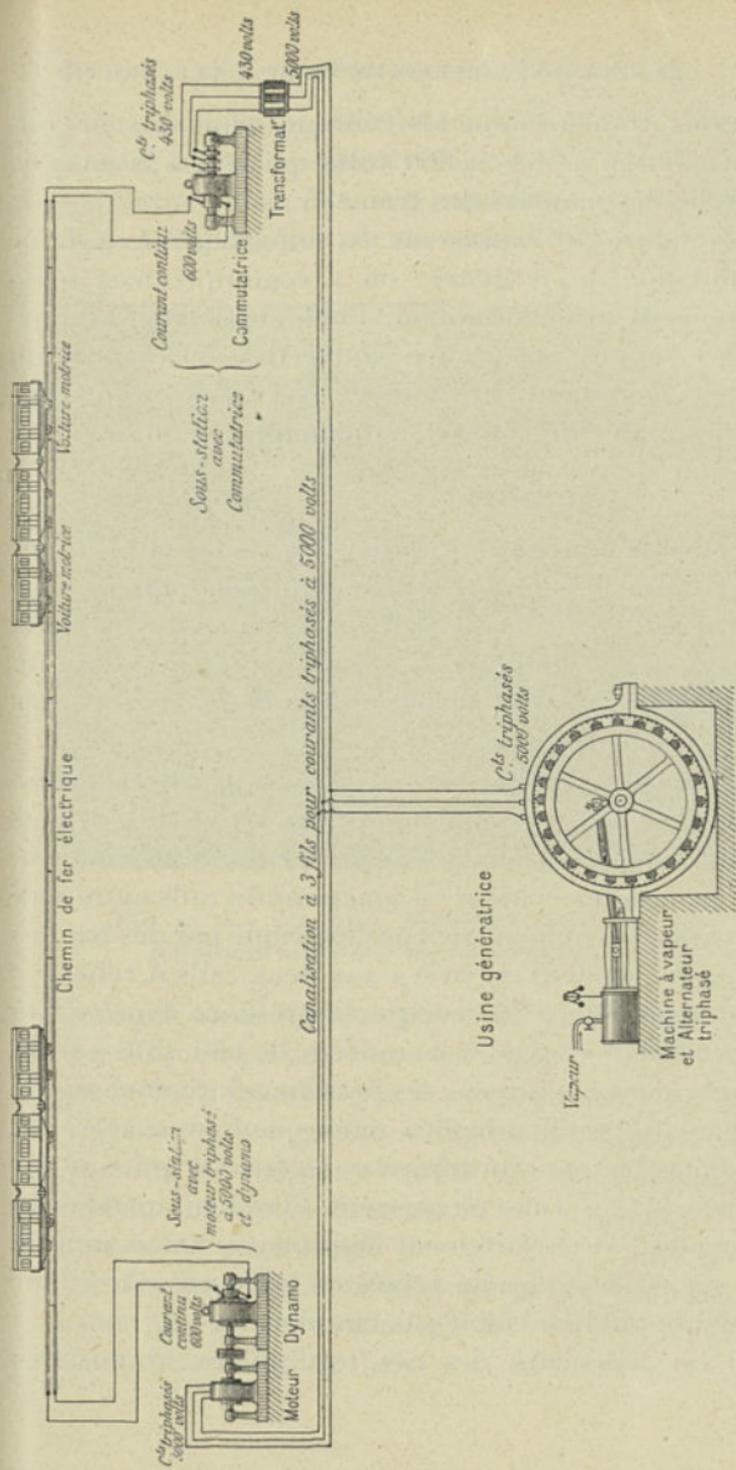


Fig. 60. — Schéma général de l'installation du chemin de fer Métropolitain de Paris.

stations transforment les courants triphasés en courant continu à 500 ou 600 volts qui sert à la mise en marche des moteurs des trains.

La figure 60 représente le schéma général d'une installation de ce genre, on y remarque deux sous-stations de transformation, l'une utilise une commutatrice l'autre un groupe convertisseur formé d'un moteur marchant directement avec les courants triphasés à 5 000 volts et actionnant une dynamo à courant continu.

Prise de courant. — Dans tous ces chemins de fer électriques le courant est recueilli, non plus par un trolley frottant contre un fil suspendu au-dessus de la voie, mais par un sabot ou patin s'appuyant contre un troisième rail situé à 30 ou 40 centimètres du sol, près de la voie de roulement.

Cet troisième rail est isolé par des supports spéciaux, il est quelquefois simplement vissé sur un bloc de bois paraffiné, comme sur le chemin de fer de Chamonix; en tous cas, les éclisses ou jonctions de rails entre eux sont assurées au point de vue électrique par des bandes de cuivre soudées ou rivées aux deux rails à relier.

On peut objecter à ceci que la présence d'un rail au ras du sol maintenu à la tension de 600 volts est un danger permanent pour les personnes circulant sur la voie, mais il est bon de faire remarquer que ce procédé, inadmissible pour un tramway électrique qui suit des routes ou des rues où passent librement piétons et véhicules, est parfaitement légitime sur un chemin de fer qui est la propriété privée de la Compagnie et sur lequel le public ne doit pas circuler.

Il est cependant des cas, tels qu'aux abords des

gares, dans les gares elles-mêmes ou aux passages à niveau, où l'on est bien obligé de laisser la voie à la circulation, mais dans ces conditions ou bien on remplace le rail latéral par une prise de courant aérienne

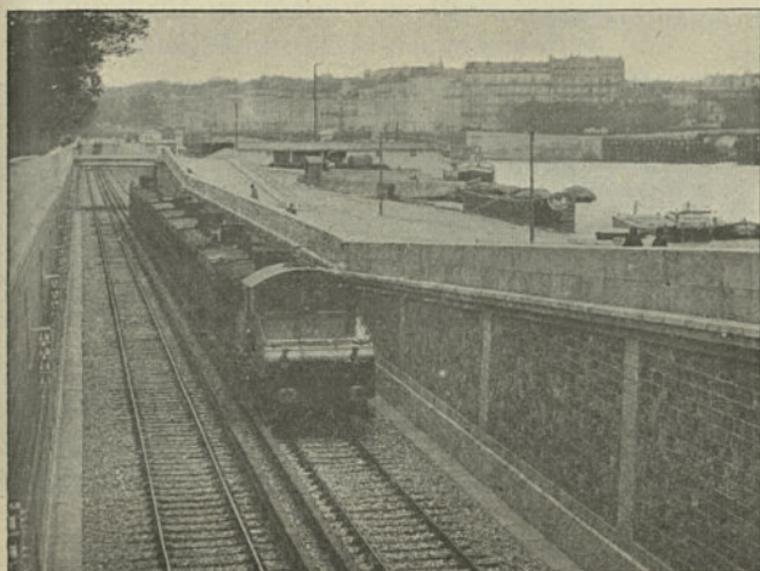


Fig. 61. — La ligne électrique du chemin de fer d'Orléans (quai d'Orsay) au Pont d'Austerlitz.

analogue au fil aérien et au trolley, ou bien on ne met rien du tout, comme dans certains passages à niveau que le train franchit par la vitesse acquise.

Systèmes de traction. — La traction des trains sur les voies ferrées peut se faire de deux façons : 1° en utilisant le matériel existant et en employant des *locomotives électriques* ;

2° En transformant tout ou partie des voitures à remorquer en les rendant motrices : c'est la traction par *unités multiples*.

Locomotives électriques. — La traction par locomotives électriques est celle qui a été employée tout d'abord; elle permet, sans dépense autre que celle de l'achat d'une locomotive, de traîner un matériel quelconque; c'est ce qu'a fait la C^{ie} d'Orléans sur sa ligne du quai d'Orsay.

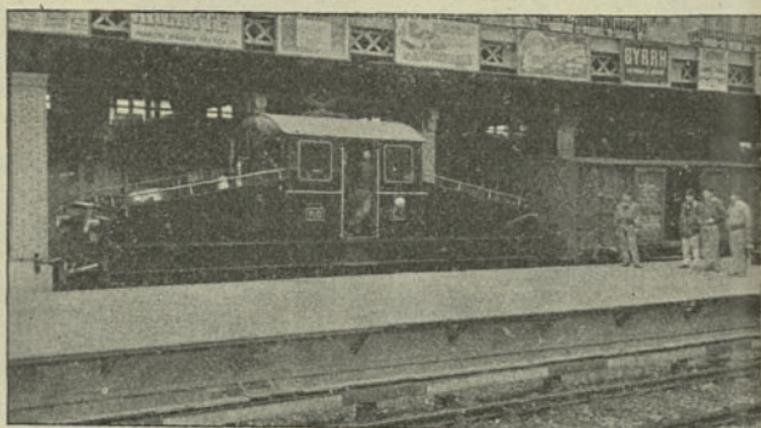


Fig. 62. — Locomotive électrique de la C^{ie} d'Orléans.

Les locomotives du système Thomson-Houston fig. 62 ont une puissance normale de 700 chevaux, elles peuvent remorquer un train de 250 tonnes à la vitesse de 50 kilomètres à l'heure et exceptionnellement un train de 300 tonnes; elles doivent, avec cette charge, pouvoir démarrer sur une rampe de 11 millimètres par mètre.

Le courant leur est fourni par des frotteurs au nombre de six, trois de chaque côté; en réalité il n'y en a jamais que trois en fonction puisque le rail isolé n'est que d'un seul côté, presque toujours dans l'espace qui sépare les doubles voies, mais ce système permet à la locomotive d'emprunter soit les voies montantes,

soit les voies descendantes sans inconvénient. En plus de ces frotteurs, les locomotives sont munies d'archets pour recueillir le courant sur une ligne aérienne, aux croisements de voie par exemple. Enfin on place généralement un moteur de 100 à 200 chevaux sur chaque essieu, soit quatre par locomotive.

Traction par unités multiples. — Le système de traction par locomotives électriques a été calqué sur l'ancien système à vapeur, mais, grâce aux avantages que nous offre l'électricité, il en est un autre bien plus séduisant et bien plus avantageux ; seulement il nécessite la transformation de tout ou partie du matériel existant. Supposons que, au lieu de mettre les moteurs sur les essieux de la locomotive, nous les installions sur un des essieux de chaque wagon ; au moyen de fils courant tout le long du train, nous grouperons entre eux ces divers moteurs d'une seule cabine de commande située à une extrémité et analogue à une plate-forme de tramway. Les appareils de manœuvre seront analogues à ceux décrits page 81.

Que va-t-il en résulter ?

D'abord, on le devine, suppression de la locomotive et du poids mort qu'elle représente, 40 à 45 tonnes au bas mot ; ensuite la vitesse normale du train est atteinte beaucoup plus rapidement puisque tous les essieux étant moteurs se mettent en marche à la fois et concourent à entraîner la voiture sur laquelle ils sont montés.

Enfin, plus de patinage, même dans les rampes ; en d'autres termes, l'adhérence est bien plus grande.

Les locomotives sont lourdes, parce qu'il faut qu'elles puissent prendre appui sur le rail pour re-

morquer le train et cela d'autant plus que le train est plus chargé. Avec les locomotives à vapeur cet inconvénient est un mal nécessaire puisque ces engins sont lourds par construction, à cause de leur mécanisme, de la chaudière, etc. Mais les locomotives électriques qui pourraient ne peser que quelques tonnes doivent être lestées avec des amas de plomb pour arriver à posséder un poids adhérent suffisamment élevé; cette solution est donc mauvaise et peu en rapport avec les exigences actuelles.

Si elle a été employée, c'est plutôt par raison d'économie et pour utiliser un matériel existant, comme c'est le cas des anciennes compagnies de chemin de fer.

Pour des lignes nouvelles où le matériel est à créer, le Métropolitain par exemple, on a tout intérêt à rendre chaque wagon moteur (1); cette façon de procéder permet de proportionner instantanément la puissance de chaque train au nombre de voitures de ce train, il diminue ensuite les chances d'arrêt par suite d'une avarie à un moteur, mais, et c'est là le plus gros avantage, il permet au train entier de prendre très rapidement sa vitesse de régime et de franchir ainsi plus

(1) A un certain moment une série d'accidents ont pu faire croire que les chemins de fer électriques et le métropolitain en particulier pouvaient donner lieu à des commencements d'incendie. C'est exact avec un matériel défectueux, mais avec une installation bien comprise, bien étudiée, avec des fils bien isolés et prévus largement pour l'intensité du courant qui doit les traverser, ces accidents ne sont pas à craindre. Il en est de même pour l'éclairage électrique et les installations faites avec soin et bien surveillées, nous ne craignons pas de le répéter, ne donnent lieu à aucun accident; nous en avons eu la preuve dans nos installations aussi bien d'éclairage que de moteurs électriques qui fonctionnent régulièrement depuis plusieurs années.

vite l'espace qui sépare deux stations. En un mot, l'accélération y est plus élevée, ceci à cause de la grande adhérence et de l'instantanéité de la commande qui permet par la manœuvre d'une seule manivelle de mettre tous les véhicules en marche à la fois au lieu d'avoir un temps perdu important dans la tension des chaînes, comme avec les trains ordinaires.

Avant de quitter les chemins de fer électriques nous donnerons la description de deux d'entre eux bien connus des touristes, celui de Cauterets et celui de Chamonix.

Chemin de fer électrique de Cauterets. — La jolie ville de Cauterets, située à l'extrémité de l'une des gorges les plus pittoresques des Pyrénées centrales, recevait, il y a quelques années, environ 1 200 baigneurs et 5 000 touristes ou voyageurs de passage. Ce mouvement tendait à s'accroître tous les ans, malgré les défectueux ou coûteux moyens de transport. La célèbre station thermale n'était, en effet, reliée à la tête de ligne des chemins de fer du Midi que par un embranchement de route nationale, qu'il fallait gravir en diligence d'une lenteur exagérée.

Cette diligence, très incommode, mettait deux heures, à la montée, pour effectuer un trajet de 10 kilomètres. On trouvait bien à la gare de Pierrefitte-Nestalas un certain nombre de voitures plus confortables, mais à des prix inabordables pour les petites bourses.

Il était donc nécessaire d'installer un nouveau mode de transport plus en harmonie avec les besoins de la société moderne et des foules qui se pressent de plus

en plus nombreuses vers cette partie des Pyrénées.

L'administration des Ponts et Chaussées avait fait étudier en 1878 un chemin de fer à voie normale, mais, en raison de son coût élevé, on fut obligé d'y renoncer.

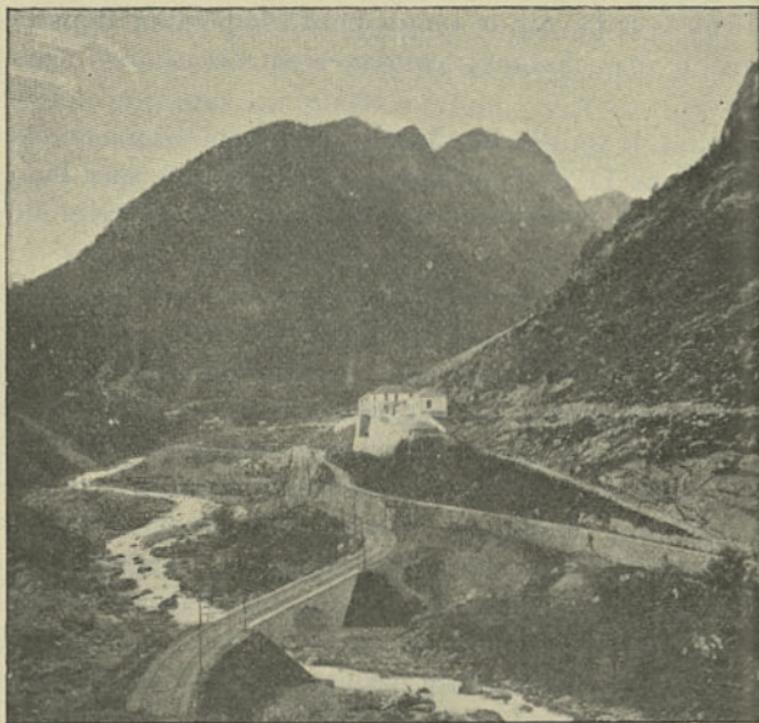


Fig. 63. — Chemin de fer électrique de Cauterets.

La solution économique était évidemment réservée à la voie étroite et à la traction électrique qui possède à un haut degré la souplesse nécessaire pour un chemin de fer de montagne à trafic essentiellement variable. La ligne de Pierrefitte à Cauterets que nous allons décrire brièvement fait partie d'un réseau qui, comprend également la ligne de Cauterets à la Raillère

exploitée depuis 1897, et la ligne de Pierrefitte à Luz-St-Sauveur.

Ce réseau a donné des preuves de son bon fonctionnement et présente un intérêt tout spécial comme étant en France un des premiers chemins de fer élec-



Fig. 64. — Chemin de fer électrique de Cauterets.
Gare terminus.

triques de montagne servant au transport des voyageurs et des marchandises d'après un horaire régulier et en correspondance avec les trains d'une grande ligne.

Le tronçon de Cauterets à la Raillère est le plus court des trois car son développement ne dépasse pas 2 kilomètres, mais c'est celui qui, sous plus d'un rapport, présentait le plus de difficultés de construction

provenant de la nature du pays, ravagé par de fréquentes avalanches, et des difficultés de communication avec les réseaux de chemins de fer, etc.

Une autre difficulté provenait de ce que sur ce tronçon le mouvement des voyageurs est des plus capricieux, car tandis qu'à certaines heures de la journée

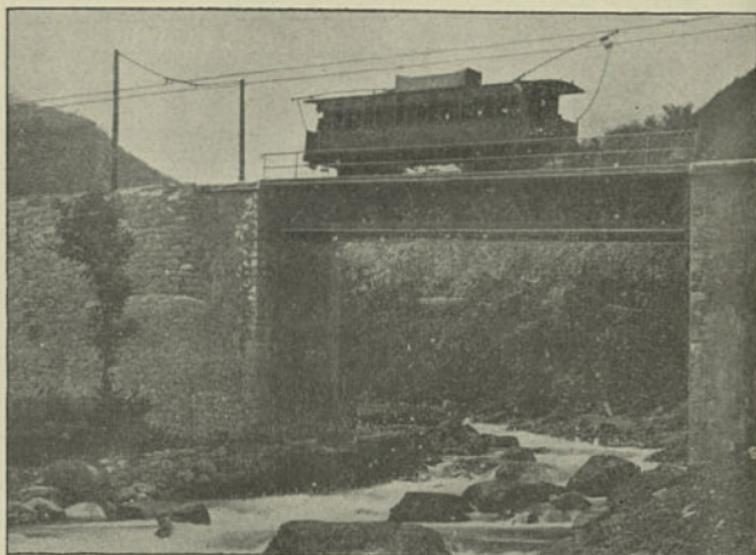


Fig. 65. — Chemin de fer électrique de Caunterets.
Pont sur le Gave.

la circulation est à peu près nulle, à d'autres heures il y a un afflux de voyageurs très considérable. Aussi cette ligne a-t-elle été construite à double voie pour permettre un service accéléré dans les moments les plus chargés.

L'usine génératrice se trouve presque à égale distance de Caunterets et de Pierrefitte, au pied de la magnifique cascade dite du « Limaçon ». Une partie des eaux du Gave, dérivée au-dessus de la cascade, tra-

verse les flancs du Mont-Vixoos dans une conduite souterraine en maçonnerie aboutissant à 65 mètres au-dessus de l'usine. De cet endroit l'eau est amenée aux turbines par une conduite composée de deux tuyaux en tôle d'acier de 60 centimètres de diamètre.

Les turbines sont au nombre de cinq dont quatre principales de 300 chevaux et une plus petite de 40 chevaux. Chacune des grosses turbines commande deux dynamos à courant continu à six pôles, type Thury tournant à 400 tours par minute.

Le courant est transmis aux voitures par un fil aérien et un trolley absolument comme pour les tramways ordinaires (fig. 65). Les voitures sont pourvues d'un moteur électrique Thury de 20 à 25 chevaux, elles pèsent 20 tonnes, y compris l'équipement électrique et 70 voyageurs. En outre du frein électrique, obtenu en faisant fonctionner à la descente la dynamo de la voiture en génératrice par la vitesse acquise, les voitures sont munies d'un frein à main et d'un frein de sûreté permettant d'appuyer un patin sur les rails en cas d'urgence, mais en pratique le frein électrique et le frein à main suffisent seuls.

La ligne est très accidentée ; on y rencontre des pentes nombreuses qui atteignent 8 pour 100 et des courbes de 35 mètres de rayon ; elle présente des tunnels, des rebroussements, bref, toutes les difficultés que l'ingénieur peut rencontrer dans les montagnes sauvages de cette région (fig. 63).

Chemin de fer de Chamonix. — Il n'est point besoin d'insister ici sur l'importance de Chamonix pour les touristes, cette ville étant devenue depuis quelques années le point de départ de toutes les excursions vers

le massif du Mont-Blanc; aussi la Compagnie des chemins de fer P.-L.-M. songea-t-elle à relier cette ville à sa ligne déjà existante d'Annemasse au Fayet.

A cause des fortes rampes nécessaires pour racheter la différence de niveau entre le Fayet et Chamonix on ne pouvait guère songer à la traction à vapeur; c'est alors que la Compagnie en la personne d'un de ses ingénieurs les plus distingués, M. Auvert étudia le moyen d'appliquer la traction électrique. Le projet se présentait sous d'excellents auspices, car une formidable usine hydro-électrique pour la fabrication du chlorate de potasse venait d'être créée dans les environs en utilisant les chutes de l'Arve; il ne restait plus qu'à installer de nouvelles machines le long du cours de cet impétueux torrent.

La ligne, qui a un parcours total de 19 kilomètres, part du Fayet-Saint-Gervais à l'altitude de 580 mètres pour arriver à Chamonix à l'altitude de 1037 mètres; il y a donc de fortes rampes et la plus rapide atteint notamment 89 pour 100.

L'exploitation se fait au moyen de voitures automotrices électriques, mais ces voitures ne circulent pas isolément comme celles de Cauterets, elles forment de véritables trains correspondant à ceux d'Annemasse au Fayet. On a dû appliquer le système des unités multiples que nous avons préconisé plus haut et il a donné d'excellents résultats.

La mise en marche simultanée des moteurs de toutes les voitures composant un train se fait très facilement de l'une quelconque des voitures à l'aide d'une canalisation d'air comprimé qui sert à manœuvrer à la fois les combinateurs ou appareils de mise en marche de toutes les voitures. Il suffit d'envoyer dans

la canalisation de l'air à une pression de plus en plus grande pour mettre toutes les voitures sur la marche avant par exemple. Si on laisse échapper l'air comprimé tous les combinateurs reviennent au zéro et le train s'arrête. Ceci est un grand avantage, car en cas de rupture d'un attelage, — et cela peut se produire dans les fortes rampes, — le tronçon de train détaché s'arrête automatiquement par suite de la rupture du tuyau amenant l'air comprimé. Cet air sert aussi aux freins Westinghouse dont le fonctionnement automatique est analogue; en cas de rupture l'air s'échappe et les freins se bloquent.

Le courant est transmis aux voitures par un rail latéral isolé du sol par de simples traverses en bois paraffiné; ils sont éclissés (1) électriquement à l'aide d'une bande de cuivre et doivent pouvoir supporter couramment des courants de 1 100 ampères comme cela arrive dans les démarrages en rampe.

Deux stations génératrices sont installées, l'une près du hameau du Châtelard, l'autre aux Chavants; leur puissance totale dépasse 1 500 kilowatts, soit 2 000 chevaux.

L'une de ces usines utilise l'eau de l'Arve captée par la Société de l'usine de Cheddes pour la fabrication du chlorate de potasse; l'autre, située plus loin, comporte son barrage sur l'Arve et toute sa canalisation. La dépense totale du chemin de fer s'est élevée à plus de 10 millions, ce qui paraît beaucoup, mais il ne faut pas oublier que la traction y est obtenue plus avantageusement qu'avec la vapeur.

(1) C'est-à-dire réunis entre eux.

CHAPITRE IV

AUTOMOBILES ÉLECTRIQUES

Propreté, douceur de roulement, fonctionnement silencieux, démarrage facile et instantané, grande souplesse des moteurs, tels sont les principaux avantages des voitures automobiles électriques qui en font la voiture de luxe par excellence.

Mais il y a une grande entrave qui nuit à son développement, c'est la source d'énergie ; ne pouvant emprunter cette énergie par un fil aérien à une station centrale, la voiture électrique est obligée d'emporter avec elle une batterie d'accumulateurs d'autant plus pesante que le parcours qu'elle doit faire est plus long ou plus accidenté. Ces accumulateurs sont lourds, jusqu'à présent ils sont en effet en plomb, de plus leur entretien est très onéreux et ces considérations suffisent pour justifier le faible développement de ces nouveaux véhicules.

La voiture électrique ne pouvant s'éloigner outre mesure des stations électriques de recharge, le grand tourisme lui reste interdit jusqu'au jour où de nombreuses usines électriques lui permettront de refaire sa provision d'énergie un peu partout, tout comme on

refait sa provision d'essence ; son emploi se limitera donc pour le moment à la ville et c'est en somme ce qui est arrivé. Paris, Londres, New-York ont aujourd'hui leurs fiacres électriques et il serait à souhaiter même que leur emploi se généralisât ; on verrait alors disparaître le cheval de fiacre, vrai moteur à crottin, capricieux, ne s'arrêtant que quand il veut et ne marchant pas toujours... L'encombrement des rues serait même diminué ; si l'on songe en effet qu'un fiacre ordinaire mesure 5 mètres entre la tête du cheval et l'extrémité de la voiture, on comprend que la suppression seule du moteur animal puisse procurer un peu plus de place dans une grande ville où les encombrements sont fréquents. Il y a plus, le démarrage sur des pavés gras ou humides s'effectuera bien mieux avec la voiture électrique non seulement qu'avec le classique fiacre mais qu'avec les autres engins automobiles non électriques. Dans la voiture électrique ce sont le plus souvent les roues d'avant qui sont motrices, à l'inverse de ce qui a lieu avec les automobiles à pétrole ; il en résulte que la voiture est tirée par ses roues d'avant au lieu d'être poussée par ses roues d'arrière ; ce système est plus rationnel ; il n'y a donc plus à craindre les tête-à-queue si dangereux, ni les déviations soudaines et accidentelles dues à l'essieu d'avant.

Description. — La voiture électrique n'est en somme que l'image en réduction du tramway à accumulateurs sans rails. Comme lui, elle comporte, outre la batterie qui lui fournit l'énergie, un ou deux moteurs électriques et un combinateur.

Qu'est-ce que le *combinateur* ?

Le combineur, comme son nom l'indique, est un appareil qui établit des relations entre les moteurs et les accumulateurs, de façon à provoquer la mise en marche ou l'arrêt de la voiture ou toute la gamme des vitesses qu'il peut être utile d'avoir.

Pour arriver à ce résultat, le lecteur l'a déjà deviné, il suffit d'alimenter le moteur avec un nombre variable d'éléments de la batterie; on conçoit facilement que plus on aura d'éléments en fonction, plus le moteur recevra d'énergie et plus vite il marchera. Il y aura une limite, c'est lorsque tous les éléments travailleront; on atteindra alors la vitesse maxima.

En effet, c'est ce qui arrive, mais les constructeurs arrivent à faire mieux encore en joignant à cela le couplage des moteurs électriques. Ceux-ci sont généralement au nombre de deux et il est facile de se rendre compte que l'on peut les accoupler comme les piles ou comme les dynamos, en *tension* ou en *quantité*.

En tension, si le fil entrant d'un moteur est réuni au fil sortant de l'autre, de façon à ce que le courant de la batterie soit obligé de traverser successivement les enroulements des deux moteurs.

En quantité, si on réunit séparément chaque moteur à la batterie.

En réfléchissant, on se rendra tout de suite compte que si nous obtenons une certaine vitesse avec le groupement en tension, nous marcherons plus vite en passant au deuxième mode de groupement.

En effet, dans le premier cas, le courant de la batterie aura à vaincre la résistance électrique des enroulements des deux moteurs; il sera donc d'autant plus affaibli que cette résistance sera plus grande ou qu'il

y aura une plus grande longueur de fil à parcourir, tandis que dans le second cas, chaque moteur puisant à discrétion le courant qui lui est nécessaire dans la batterie, sans être gêné par son voisin, la vitesse sera augmentée.

Il existe encore un autre moyen d'accroître la vitesse, c'est de diminuer le champ magnétique des électro-aimants inducteurs de chaque moteur.

Nous savons, en effet, que les inducteurs sont constitués par de puissants électro-aimants, entre les pôles desquels tourne l'induit. Lorsqu'ils sont fortement aimantés, l'induit du moteur tourne lentement comme s'il était soumis à l'action d'un frein; désaimantons les inducteurs et tout de suite notre machine va s'emballer. En réalité, ce fait est dû à la présence de la force contre-électrotrice de l'induit qui est fonction de la vitesse et du champ magnétique.

Pour diminuer l'aimantation, on peut dériver une partie du courant qui passe dans les bobines des électro-aimants inducteurs à l'aide d'un fil plus court et moins résistant; cela s'appelle *shunter les inducteurs*. En faisant varier la résistance de cette dérivation on pourra faire tourner le moteur aussi vite qu'on le voudra; mais arrêtons-nous là, car nous risquerions fort de briser et le moteur et la voiture, et... nous-même, par dessus le marché, avec les vitesses fantastiques que ce système met à notre disposition. Ce sont, du reste, des combinaisons de ce genre qui ont permis à M. Jenatzy de réaliser, il y a 4 ou 5 ans, la vitesse remarquable pour l'époque de 106 kilomètres à l'heure. Il est vrai que sa voiture qui s'intitulait la « *Jamais contente* » était prédestinée à de pareilles folies et, heureusement pour le public et les

conducteurs, ces vitesses sont abandonnées, du moins en ce qui concerne les automobiles électriques.

Le combinateur de la voiture électrique se compose généralement d'une poignée ou d'une manivelle actionnant une série de lames en métal, analogues

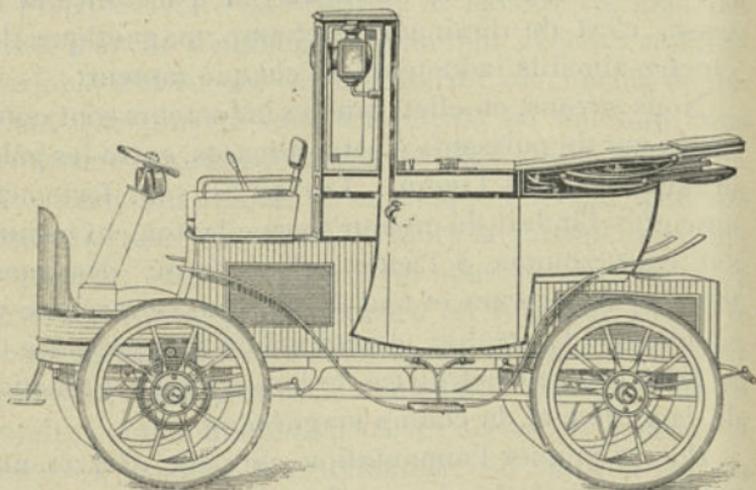


Fig. 66. — Fiacre électrique.

aux touches d'un piano, qui réalisent par leur abaissement les groupements précédemment indiqués.

Moteurs. — Les moteurs électriques utilisés sur les voitures électriques ne sont autres que de petites dynamos aux formes très ramassées que l'on loge entre les essieux, le plus près possible de la roue qu'ils doivent actionner. Généralement ils commandent les roues d'avant comme l'indique la figure 66 ; cette disposition présente de sérieux avantages, la voiture n'est plus poussée comme c'est le cas des voitures à pétrole, mais bien tirée par l'avant ce qui est plus naturel. Ils

sont généralement blindés, c'est-à-dire que, comme les moteurs de tramway, ils sont enveloppés de fonte de tous côtés, de façon à être à l'abri de l'eau et de la poussière; seul un arbre sort de la carcasse et transmet le mouvement aux roues par un pignon et une roue dentée avec ou sans chaîne, généralement sans.

Les accumulateurs. — Les accumulateurs, il faut bien le dire, sont la pierre d'achoppement des automobiles électriques par suite de l'énorme poids qu'ils représentent. Si l'on songe en effet qu'une voiture pesant une tonne y compris ses accumulateurs, nécessitera, pour faire un parcours moyen de 100 kilomètres sans recharge, un poids d'accumulateurs de 250 à 300 kilogrammes on conviendra que c'est plutôt lourd, tandis qu'il ne faudrait guère que 20 à 30 kilogrammes de pétrole au maximum pour effectuer le même parcours, soit 10 fois moins.

Il y a cependant beaucoup de voitures électriques et on peut en trouver la raison dans les nombreuses qualités de ces automobiles, qualités que nous avons énumérées plus haut.

Les différentes applications des voitures électriques peuvent se diviser en trois classes :

- 1° Voitures de luxe ou de plaisance;
- 2° Voitures d'exploitation;
- 3° Voitures de livraison ou de poids lourds.

Chacune de ces trois catégories de véhicules doit être munie de batteries d'accumulateurs construites en vue de s'adapter au genre de service correspondant.

Les voitures de luxe achetées par une clientèle

riche, plus soucieuse de se maintenir dans le mouvement et de suivre la mode du jour que de réaliser des économies sur la traction animale et tenant surtout à posséder des voitures élégantes, ne pourront être équipées avec le même matériel que les vulgaires fiacres. Dans ces voitures on installera des batteries aussi légères que le constructeur pourra en fournir afin de pouvoir les dissimuler facilement. Leur entretien sera coûteux, mais aussi sera probablement bien fait, car on regardera peu aux soins à y faire apporter.

Dans les voitures d'exploitation telles que les fiacres, le problème est plus complexe : on prendra des batteries de poids moyen qui résisteront plus longtemps.

Enfin pour les voitures de livraison, sur lesquelles il ne faut pas regarder au poids, on choisira des batteries lourdes, mais par cela même robustes ; cependant il est bon de remarquer que jusqu'à présent l'accumulateur n'est applicable aux poids lourds qu'à la condition de rencontrer souvent des postes de recharge, tous les 30 à 35 kilomètres par exemple.

Construction des accumulateurs pour automobiles. — Dans notre *Traité pratique d'électricité* nous avons examiné la question des accumulateurs au point de vue général, nous en avons rappelé le principe (page 154) ; il nous suffira d'ajouter que pour avoir des accumulateurs présentant une grande capacité d'emmagasinement il faut que les plaques de plomb baignant dans l'eau acidulée soient *formées*, c'est-à-dire rendues suffisamment spongieuses pour s'oxyder facilement sous l'action du courant de charge ; il faut en un mot que toutes les parties de la plaque travaillent

afin que le plomb soit utilisé ou tout au moins en grande partie.

La chose n'est pas aussi facile à faire qu'à dire, et pour former cette plaque on en est réduit à la fabriquer de toutes pièces avec des matières spongieuses. Pour cela on coule des grilles très fines à quadrillage très serré en plomb antimonieux ; la présence de l'antimoine servant à augmenter la dureté du plomb qui serait trop mou. On empâte la grille avec une pâte de minium et d'acide sulfurique, le plus souvent on y incorpore certains sels solides tels que le sulfate de magnésie ou le sulfate de soude qui se dissoudront lorsqu'on remettra la plaque terminée et séchée dans l'eau et laisseront autant de cavités que le liquide remplira. On aura ainsi une plaque très poreuse se laissant facilement pénétrer par le liquide. Ces plaques sont très minces de façon à pouvoir en mettre un grand nombre dans chaque vase, ceci afin d'augmenter la surface de contact avec le liquide et de favoriser la rapidité de l'action chimique, mais ce peu d'épaisseur est aussi une cause de fragilité ; c'est pourquoi on emploie du plomb rendu plus rigide par de l'antimoine, et c'est aussi pourquoi les nervures de la grille sont nombreuses afin de résister aux déformations et en vue de mieux retenir les oxydes constituant la matière active.

Les plaques positives alternent avec les négatives et chaque ensemble de plaques, les positives d'une part et les négatives de l'autre sont soudées à une barre dite de connexion reliée elle-même à l'élément suivant. Comme avec les piles on adopte généralement le montage en tension, c'est-à-dire que l'on relie le positif d'un élément au négatif de l'autre et ainsi

de suite. Il reste à chaque extrémité un pôle positif de libre et un pôle négatif qui seront les pôles de la batterie, ceux où on attachera les fils.

Le liquide est une solution d'acide sulfurique marquant 21 à 25° à l'aréomètre Baumé; il ne faut pas prendre un degré d'acide trop élevé, car on risque d'attaquer les grillages et de détruire rapidement la batterie.

Souvent les constructeurs mettent des séparations en matières isolantes entre les plaques, ceci dans le but d'éviter qu'elles se touchent par les chocs et surtout pour empêcher les blocs d'oxyde qui se détachent souvent des plaques positives de venir faire court-circuit en réunissant deux plaques voisines; ces séparations se font en terre poreuse, en ébonite ondulée et perforée, etc.

Les vases renfermant les accumulateurs ne peuvent être en verre qui est trop lourd et surtout trop fragile, on les a fait tout d'abord en celluloïd en découpant des plaques de grandeur voulue que l'on colle (1) ensemble en vue de constituer une boîte.

Malheureusement le celluloïd est un corps extrêmement inflammable à cause de son origine qui est le coton-poudre d'une part et le camphre d'autre part; il est arrivé souvent que des batteries entières ont pris feu à la suite d'une étincelle et ont entraîné la destruction complète de la voiture. Il est à remarquer que le celluloïd brûle même en contact avec l'eau acidulée; il ne produit pas de flamme dans ce cas, mais répand une fumée très épaisse.

(1) Cette colle s'obtient avec de l'acétone liquide dans lequel on laisse macérer quelques morceaux de celluloïd, on l'applique à froid et au pinceau comme la colle ordinaire.

Force a été de faire ces vases en ébonite, matière peu inflammable mais très chère; il faut de l'ébonite pas trop dure pour ne pas casser au moindre choc; cependant si le vase est trop souple il peut se laisser attaquer par l'acide et perdre ses qualités isolantes, on le munit généralement, en dessous, de tasseaux qui éviteront le contact du fond avec l'eau acidulée que les chocs font souvent jaillir autour de la batterie.

Enfin chaque accumulateur sera bouché par une fermeture aussi étanche que possible, mais facile à enlever pour que l'on puisse visiter facilement chaque élément; des trous fermés par un bouchon seront ménagés dans ce couvercle pour faciliter le dégagement des gaz pendant la charge.

Accumulateurs divers avec des métaux autres que le plomb

Etant donné le poids si élevé des accumulateurs au plomb, des légions de chercheurs se sont mis au travail en vue de nous donner d'autres combinaisons remplissant le même but.

La chose n'est pas aussi facile qu'elle peut en avoir l'air, car, en somme, on n'est pas encore très avancé.

1° **Accumulateurs au zinc.** — En premier lieu, M. d'Arsonval a pensé que l'on pouvait remplacer la plaque négative par du zinc; ce dispositif accroît la force électromotrice qui devient de 2,5 volts au lieu de 2 volts, mais, malheureusement, le zinc disparaît rapidement dans l'eau acidulée, même si on n'utilise pas l'accumulateur; de plus, pendant la charge, le zinc

qui doit se déposer adhère mal à son support et tombe en grappes; il a donc fallu y renoncer.

La question pourrait être reprise avec chances de succès si on pouvait éviter l'attaque du zinc à circuit ouvert et surtout obtenir un bon dépôt pendant la charge.

Le cadmium a été substitué au zinc avec avantage, mais ce métal est trop rare et trop cher pour que son emploi soit industriel.

2° Accumulateurs au cuivre. — La pile de Lalande et Chaperon telle qu'elle est décrite dans notre *Traité pratique d'électricité* peut fonctionner en accumulateur; il suffit, en effet, lorsqu'elle est épuisée, de faire passer un courant de sens inverse pour la régénérer; le cuivre passe à l'état d'oxyde de cuivre et le zinc réapparaît. Des éléments de ce genre ont été appliqués à la propulsion d'un tramway en Autriche; mais on a dû abandonner l'essai, en effet cet accumulateur ne donne que 0,8 volt, il faut donc presque 3 fois plus d'éléments qu'avec le plomb.

3° Accumulateurs au nickel. — On a fait grand bruit dernièrement autour de l'accumulateur Edison constitué par une négative en fer et une positive en nickel; les oxydes de ces métaux étant rendus conducteurs par de la plombagine; le liquide est de la potasse caustique. On obtient effectivement des accumulateurs légers, mais la force électromotrice peu élevée (1,25 volt) fait perdre une partie de cet avantage par suite de l'augmentation du nombre d'éléments qui en résulte.

QUATRIÈME PARTIE

L'ÉLECTROCHIMIE

CHAPITRE I

GALVANOPLASTIE

Les grandes découvertes sont le plus souvent l'objet du hasard et tel est, comme on va le voir, le point de départ des applications électrochimiques du courant électrique, nombreuses et précieuses aujourd'hui s'il en fût.

C'était en 1838, peu de temps après l'invention de la pile de Daniell, un savant russe, Jacobi, qui s'intéressait aux nouvelles découvertes de l'époque, avait commandé un certain nombre de vases poreux en vue de monter une batterie de piles Daniell pour ses expériences. Afin de se rendre compte de la porosité de ces vases, Jacobi les remplit d'eau pure et les abandonna à eux-mêmes un certain temps ; il constata alors que certains avaient laissé échapper une grande partie de leur eau et d'autres presque pas ; il marqua les premiers d'une croix au crayon afin de

ne pas les confondre avec les autres et s'en servit pour monter sa pile Daniell.

Jusqu'ici, rien de particulier, sa pile fonctionna très bien ; puis, ses expériences terminées, il la démontra. Quelle ne fut pas sa stupéfaction de voir que les croix qu'il avait dessinées au crayon noir sur les vases poreux s'étaient métamorphosées; elles étaient d'un beau rouge doré, un dépôt de cuivre les avait recouvertes, dépôt très adhérent mais recouvrant fidèlement l'original.

La galvanoplastie venait d'être découverte.

Ainsi donc il suffisait de tracer un dessin au crayon pour le voir reproduit en relief avec une fidélité remarquable à l'aide d'un dépôt de métal. Voilà bien un merveilleux outil que la pile ! Mais, ce n'est pas tout ; en offrant au courant électrique non plus un simple dessin au crayon mais de vulgaires objets en étain ou en fer, on pouvait aussi les recouvrir d'une couche très adhérente de cuivre pur. Enfin, en modifiant la composition du bain et en y incorporant un sel d'or ou d'argent, il devenait possible de dorer ou d'argenter à volonté, des cuillers, des fourchettes, etc., choses que l'on pratique aujourd'hui couramment.

Mais, suivons de près ces opérations et examinons comment on arrive à ces beaux résultats.

Lorsqu'on fait traverser au courant électrique un sel métallique en dissolution, du sulfate de cuivre par exemple, en y plongeant les deux extrémités dénudées des fils d'une pile, on constate qu'il se dépose du cuivre rouge sur le fil en communication avec le pôle négatif de la pile tandis que l'autre fil, s'il est en cuivre, se dissoudra peu à peu.

Nous voilà bien avancés : nous enlevons du cuivre

à l'un des fils pour le transporter sur l'autre, autant vaudrait ne rien faire du tout.

Mais, remplaçons le fil en communication avec le pôle négatif par une médaille ou plutôt par l'empreinte d'une médaille que nous aurons prise avec de la cire, de la gutta-percha ou du plâtre; le courant électrique va recouvrir de cuivre cette empreinte, à condition, toutefois, que nous ayons eu soin de la rendre conductrice en la frottant uniformément avec un pinceau chargé de plombagine en poudre.

Dans tous les creux et reliefs de notre moule il se déposera du cuivre et ce, avec une fidélité remarquable, si bien que, lorsque le dépôt sera assez épais, au bout de plusieurs heures par exemple, nous pourrons sortir le moule du bain et en détacher une magnifique reproduction de notre médaille.

Comme on le voit, c'est merveilleux, ni plus, ni moins.

Remplaçons le bain de sulfate de cuivre par un bain d'argent et nous pourrons argenter à notre aise les objets qu'il nous plaira; de même, remplaçons le bain d'argent par un bain de nickel et nous recouvrirons de ce métal brillant, des chaînes, des ciseaux, etc.

En pratique, il faut prendre un peu plus de peine, car, si le courant travaille silencieusement et régulièrement, il est nécessaire de faire subir aux pièces à recouvrir des préparations souvent longues si on veut avoir un bon et solide dépôt.

Préparation des objets. — Une première opération que recommande Roseleur, un des premiers apôtres de la galvanoplastie, est la *recuïsson ou dégraissage*.

Comme son nom l'indique, cette opération a pour but d'enlever les corps gras, opération des plus essentielles puisque leur présence empêche le contact du liquide et par suite la formation du dépôt.

Dans ce but, on chauffe les pièces sur un feu doux de poussier de charbon, de braise de boulanger, ou mieux dans un four, jusqu'à ce que l'on atteigne le rouge sombre, les matières grasses sont ainsi détruites radicalement. Il est des cas cependant où l'on ne peut effectuer cette opération impunément, dans le cas des objets délicats ou soudés par exemple, on recommande de les faire bouillir quelque temps dans une solution alcaline de potasse caustique dissoute dans 10 fois son poids d'eau.

Les objets passent ensuite au *déroché*, c'est-à-dire dans un bain qui se compose, pour 100 parties d'eau ordinaire, de 5 à 20 parties d'acide sulfurique à 66° de l'aréomètre Baumé.

On peut y plonger les objets à *chaud*, c'est ce que l'on fait généralement ; on les y laisse jusqu'à ce que la surface prenne une teinte rouge ocreux si ce sont des objets en cuivre. Dans les cas des autres objets que la crainte de la fusion avait fait dégraisser au bain de potasse on devra les laver et les rincer à grande eau plusieurs fois avant de les passer au bain de déroche. A partir de ce moment les objets ne doivent plus être touchés à la main ; il faut faire usage de crochets en cuivre ou mieux en verre et, pour les menus objets, de passoirs en grès ou en porcelaine.

Le maillechort et le fer sont décapés pendant plusieurs heures à l'acide chlorhydrique ; le zinc se dégrasse à la soude ; puis, ces métaux doivent encore subir le *ponçage* ; on les frotte sous un filet d'eau avec

une brosse raide faite de soies de sanglier montées sur un tour rapide. L'argent que l'on se propose de dorer subit les mêmes préparations ; seulement on le recuit au rouge et on le trempe vivement dans un bain acide.

Nous examinerons en détail les opérations les plus courantes, celles dont chacun peut tirer parti avec un peu de soin ; ce sont : le cuivrage, l'argenture, la dorure et le nickelage.

1° **Cuivrage.** — C'est l'opération la plus simple.

Dans une cuve assez grande pour contenir les objets à cuivrer on verse une solution presque saturée de sulfate de cuivre, ce sel bleu employé dans la pile Daniell. On y ajoute un peu d'acide sulfurique, 8 à 10 p. 100 en volume environ. Des lames en cuivre rouge, réunies électriquement entre elles, seront placées tout autour de la cuve ; enfin, au centre, on suspend avec soin les objets à cuivrer, convenablement préparés comme on vient de le voir.

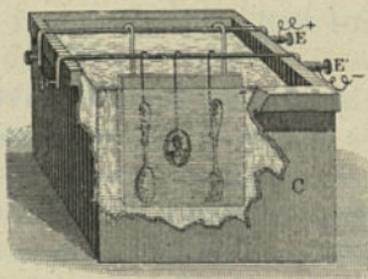


Fig. 67. — Bain de cuivrage.

Les plaques en cuivre rouge sont réunies au pôle positif d'une source de courant, pile ou machine, ne donnant pas plus de 3 à 4 volts et les objets à cuivrer sont reliés au pôle négatif. Un ampèremètre sera intercalé au besoin dans le circuit afin de surveiller l'intensité et d'éviter par suite de faire passer un courant trop intense ; ce courant doit être proportionné à

la surface des objets, soit 1 ampère par décimètre carré environ.

On peut cependant, sans ampèremètre, juger de la valeur du courant rien qu'à l'aspect du dépôt.

Lorsque la solution est trop faible, c'est-à-dire ne contient pas assez de sulfate de cuivre et le courant trop dense le dépôt est *noir*; lorsque la solution est trop concentrée et le courant trop faible, le dépôt est *crystallin*. On obtient un dépôt convenable et un métal flexible en se plaçant dans les conditions moyennes que nous avons indiquées.

Les stratifications du liquide et la circulation qui se produit à l'intérieur du bain par l'attaque des plaques en cuivre reliées au pôle positif produisent quelquefois de longues lignes verticales semblables à des points d'exclamation. Il faut agiter les pièces le plus possible pour conserver un bain bien homogène. Les bains de grand volume sont avantageux à ce point de vue.

Les objets à cuivrer doivent être absolument propres et surtout être exempts de graisse; une couche de cette matière, fût-elle très mince, arrête le dépôt; c'est pourquoi on recommande de ne pas toucher les objets que l'on plonge dans les bains.

Le bain de cuivrage que nous venons d'indiquer convient surtout aux métaux que le sulfate de cuivre n'attaque pas : bronze, laiton, etc.; il ne vaudrait rien pour cuivrer du zinc ou du fer.

Nous indiquerons donc un bain plus compliqué peut-être mais s'appliquant à tous les métaux ou alliages et s'employant indifféremment à froid ou à chaud; sa composition, ainsi que celle de la plupart des bains que nous donnons, a été indiquée par Roseleur et a reçu

la sanction de la pratique : on peut être assuré d'avance d'avoir avec eux de bons résultats.

Ce bain se compose de :

Eau ordinaire.....	10 litres.
Cyanure de potassium pur.....	200 grammes
Acétate de cuivre (verdet raffiné)	200 —
Carbonate de soude (cristaux de soude).....	200 —
Bisulfite de soude.....	200 —

Pour le préparer, on place d'abord dans la cuve en grès, verre ou autre matière inattaquable, l'acétate de cuivre que l'on délaye avec aussi peu d'eau que possible, car ce sel, lorsqu'il est en poudre fine, est comme de la farine, il se mouille mal et flotte à la surface d'un liquide trop abondant.

A la pâte bien homogène de l'acétate de cuivre on ajoute le carbonate de soude et un ou deux litres d'eau ; on agite, il se forme un dépôt ou *précipité* vert clair au lieu de vert foncé qu'il était d'abord ; on ajoute encore deux litres d'eau et le bisulfite de soude, et le magma passe à une coloration jaune sale.

Enfin, on ajoute le reste des dix litres d'eau et le cyanure ; puis, après dissolution de tous les sels, il reste un liquide incolore qui est le bain de cuivrage. Si tout le cyanure s'était dissous sans décolorer complètement le liquide, il faudrait en ajouter une petite quantité ; mais cela n'est jamais nécessaire que lorsque le cyanure a subi un commencement de décomposition.

Si on tient à avoir un bain parfaitement limpide, on le filtre à travers un papier sans colle ou on le décante après repos.

Il ne faut pas oublier que, par suite de la présence du cyanure, le bain est un *poison violent*; il devra être manié avec précaution. Ce bain est excellent : avec lui on cuivre admirablement les objets en fer ou en acier convenablement nettoyés; ce cuivrage leur permet ensuite de recevoir soit une couche de nickel soit une couche d'argent en assurant à ce nouveau dépôt une solidité à toute épreuve. Le cuivrage préalable des objets à nickeler ou à argenter est *nécessaire* si on veut un dépôt bien adhérent. C'est enfin avec ce bain que l'on a cuivré une grande partie des candélabres en fonte de la Ville de Paris; le dépôt de cuivre ainsi obtenu, absolument inaltérable, leur donne un aspect bronzé qui masque et protège l'ossature en vulgaire fonte de fer.

Laitonisation. — On emploie, dans l'industrie, plus fréquemment encore le cuivrage jaune ou laitonisation, à la place du cuivrage rouge; ainsi on l'applique de préférence à des articles fabriqués en fer ou en zinc et dont les similaires se rencontrent dans le commerce presque toujours en laiton, mais à un prix plus élevé; tels sont les pitons, vis à bois, patères de meubles, agrafes de robes, poignées, fils, etc., et une multitude d'autres objets qu'on fabrique en fer ou en zinc et que l'on cuivre ensuite en jaune pour les faire ressembler à ceux en véritable laiton. C'est donc à la contrefaçon, industrie si brillante aujourd'hui, il faut bien le dire, que s'applique la galvanoplastie en général et le laitonisation en particulier. Il ne servirait à rien de laisser ces procédés cachés : ils sont entre trop de mains aujourd'hui et mieux vaut les indiquer tout de suite; leur connaissance permettra peut-être

quelquefois d'arriver à déceler quelques-uns des objets ainsi fabriqués.

Il faut reconnaître aussi que les bronzes chimiques que l'on applique couramment sur les statues s'appliquent bien mieux si l'objet a déjà été laitonisé; ce procédé a l'avantage lorsque le frottement découvre le bronze de laisser apparaître une belle couleur jaune comme si toute la pièce était en laiton ou même en bronze véritable. Voici une formule qui s'applique au laitonisage à froid de tous les métaux :

Carbonate de cuivre (récemment préparé).....	100 grammes
Carbonate de zinc (récemment préparé).....	100 —
Carbonate de soude (cristaux de soude).....	200 —
Bisulfite de soude..	200 —
Cyanure de potassium pur.....	200 —
Acide arsénieux (mort aux rats).	2 —
Eau ordinaire	10 litres

Pour préparer ce bain, on procède de la façon suivante :

Il est d'abord nécessaire d'avoir du carbonate de cuivre et du carbonate de zinc fraîchement préparés; pour cela, on fait dissoudre dans une cuve contenant deux litres d'eau 150 grammes de sulfate de cuivre et 150 grammes de sulfate de zinc cristallisés; on y verse ensuite une solution de 400 grammes de carbonate de soude dans un litre d'eau froide.

Par le contact de ces deux liquides il se produit un précipité verdâtre qui n'est autre que le mélange de carbonates de cuivre et de zinc dont il est question dans la formule ci-dessus. On agite bien et on laisse

déposer le précipité pendant quelques heures ; on jette alors le liquide qui surnage et qui est inutile à l'opération, on verse ensuite 9 litres d'eau sur les carbonates de cuivre et de zinc et on y ajoute le bisulfite et le carbonate de soude. Enfin on fait dissoudre ensemble dans un litre d'eau tiède le cyanure de potassium et l'acide arsénieux et on verse ce liquide dans le mélange qui se décolore presque immédiatement et qui constitue le bain de laitonage ; ce bain est filtré si on désire l'avoir absolument clair.

Comme le bain de cuivrage rouge ce dernier est un poison qu'augmente encore la présence d'acide arsénieux (arsenic ou mort aux rats).

Les bains de cuivrage sont généralement contenus dans de grandes cuves en grès ou en bois doublé de gutta-percha. Les objets à cuivrer sont suspendus au moyen de crochets en cuivre à une barre reposant sur le bord supérieur de la cuve et en relation par un fil avec le zinc de la batterie de piles ou le pôle négatif de la machine dynamo. Les parois de la cuve sont tapissées de feuilles de cuivre rouge dans le cas du cuivrage en rouge et de feuilles de laiton dans le cas du laitonage ; ces feuilles sont toutes reliées ensemble par un fil de même nature, et ce fil se prolonge jusqu'au pôle positif de la pile ou de la dynamo. Ce bain demande un courant faible ne dépassant pas un ampère environ par décimètre carré.

2° **Argenture.** — Les couverts de table et bien d'autres objets courants s'argentent très facilement, surtout si on a pris la précaution de les cuivrer au préalable ; c'est pourquoi nous avons parlé tout d'abord de cette première opération.

Il existe bien des compositions de bains et il serait trop long de décrire ici les procédés des grandes maisons d'argenture, telles que la maison Christofle et C^{ie} qui a acheté autrefois les brevets de M. Ruolz; ces procédés se résument en somme au suivant qui pourra donner d'excellents résultats entre les mains d'amateurs un peu adroits.

Les pièces bien dégraissées, bien polies et bien décapées sont portées dans un bain fait de la façon suivante :

1° On pèse 150 grammes d'azotate d'argent pur et on les fait dissoudre dans 10 litres d'eau distillée ou d'eau de pluie ;

2° On ajoute à cette dissolution 250 grammes de cyanure de potassium, on agite jusqu'à dissolution complète, on filtre, ce qui n'est pas indispensable cependant, car les impuretés tombent vite au fond du vase et laissent un bain clair.

Le courant doit être faible comme précédemment; on arrive à d'excellents résultats avec l'appareil suivant, qui ne nécessite ni pile ni machine, à condition qu'il s'agisse de petites pièces pas trop nombreuses.

Dans une grande cuve cylindrique on verse le bain d'argent préparé comme il est dit ci-dessus. Au centre on place un vase poreux de pile en terre de pipe, que l'on remplira d'eau légèrement acidulée et dans laquelle plonge une lame de zinc.

Les objets à argenter seront suspendus tout autour dans le bain d'argent à une couronne qui reposera sur le zinc, ou sera en communication avec lui au moyen de 4 tiges ou croisillons en métal. On aura constitué ainsi une sorte de pile Daniell travaillant fermée sur elle-même et qui sera suffisante pour bien des

opérations. Naturellement, une fois l'argenture terminée il faudra démonter la pile afin d'éviter l'usure inutile du zinc.

Pour une marche coupée par des intervalles de

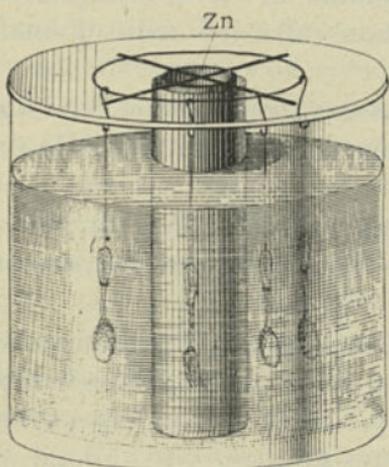


Fig. 68. — Appareil simple pour la galvanoplastie.

repos, mieux vaut employer un bain séparé et une pile Daniell ou autre que l'on chargera de fournir le courant nécessaire. Ces bains, comme les bains de cuivrage, contiennent une lame du métal à déposer, ce sera ici une lame d'argent que l'on reliera au pôle positif de la pile ; les objets à argenter seront reliés au zinc ou pôle négatif de la pile. De cette

façon le bain ne s'appauvrit pas et garde sensiblement une composition constante ; le rôle du courant consiste donc à enlever l'argent à la plaque et à le déposer régulièrement sur les objets en une couche uniforme.

En argenture, comme en photographie, les bains vieux sont préférables aux bains neufs.

3° Dorure. — Bien des procédés de dorure sont employés et beaucoup ne nécessitent pas l'intervention de la pile. Cependant la dorure à la pile possède sur eux l'avantage de s'appliquer indistinctement à tous les métaux usuels et ensuite de n'avoir d'autre

limite, pour l'épaisseur de sa couche, que la volonté de l'opérateur.

La dorure galvanique se fait de préférence à chaud et on obtient facilement, dans ces conditions, d'excellents résultats.

Le bain employé a la composition suivante :

Phosphate de soude cristallisé ..	600 grammes
Bisulfite de soude	100 —
Cyanure de potassium pur	10 —
Chlorure d'or.....	20 —
Eau distillée ou eau de pluie....	10 litres

Pour le bien préparer on recommande :

1° De dissoudre le phosphate de soude dans 8 litres d'eau distillée et laisser refroidir ;

2° Dissoudre dans le 9° litre d'eau le chlorure d'or et mélanger peu à peu cette solution à la première ;

3° Dissoudre dans le 10° litre d'eau le bisulfite de soude et le cyanure pur et mélanger cette dernière solution aux deux autres.

Ce bain est généralement placé dans une capsule en porcelaine, disposée sur un fourneau, lorsque les objets sont de petite dimension ; on opère avec une chaudière en fonte émaillée pour des pièces plus importantes. La température doit être maintenue entre 50° ou 80° centigrades. La pile employée doit pouvoir donner un courant énergique, on prendra un ou deux éléments Bunsen ou au bichromate ; les objets à dorer seront reliés au pôle négatif. Quant au pôle positif, il se terminera par un fil en *platine* et non en or que l'on tient de la main gauche et qu'on plonge plus ou moins dans le bain de façon à régler l'intensité du courant. La main droite sera employée

à agiter constamment les objets afin d'avoir un dépôt régulier.

Il ne faut pas oublier, en effet, que la dorure s'effectue très rapidement et que quelques minutes suffisent pour lui donner une épaisseur convenable.

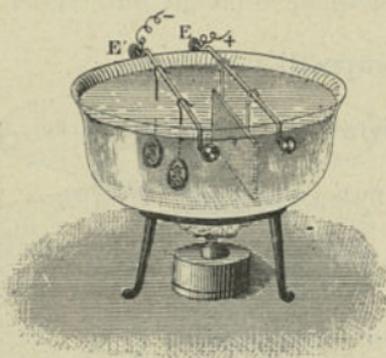


Fig. 69. — Bain de dorure.

On remarquera que le bain a une tendance à s'appauvrir en or, puisque nous ne disposons pas d'une plaque soluble reliée au pôle positif, comme c'est le cas des

autres bains. On pourrait le remonter par addition de chlorure d'or, mais ce n'est pas à conseiller et mieux vaut épuiser complètement le bain et en refaire un nouveau avec des sels neufs, on y gagne en beauté des tons et en rapidité.

4° Nickelage. — Le nickelage, appliqué pour la première fois en 1870 par MM. Adam et Gaiffe, est certainement une des opérations de la galvanoplastie que l'on pratique le plus aujourd'hui : dans l'industrie on l'applique surtout à recouvrir le cuivre, le bronze, le maillechort, le fer, la fonte et l'acier. Beaucoup de pièces de mécanique, d'instrument de chirurgie sont protégées par ce moyen d'une détérioration rapide, tout en présentant un meilleur aspect.

L'opération du nickelage, assez simple en elle-même, nécessite une série de préparations que doit subir l'objet à nickeler et desquelles dépend la réus-

site de l'opération et la durée même du dépôt.

1° *Dégraissage*. — Il est d'usage de frotter les pièces avec une brosse préalablement trempée dans une bouillie chaude de blanc d'Espagne, d'eau et de carbonate de soude. On reconnaît que le dégraissage est parfait lorsque les pièces se mouillent à l'eau ordinaire d'une façon uniforme et sans retenir de gouttes d'eau par place;

2° *Décapage*. — On décape le cuivre et ses alliages en quelques secondes en les trempant dans un bain composé de 10 litres d'eau pour 1 kilogramme d'acide azotique. Pour les pièces brutes il faut un bain plus énergique composé de :

Eau.....	2 litres
Acide azotique.....	1 —
Acide sulfurique.....	1 —

Le fer, l'acier et la fonte *polis* se décapent dans un bain composé de 10 litres d'eau et 100 grammes d'acide sulfurique; on les laisse dans ce bain jusqu'à ce qu'elles prennent un ton gris uniforme. On les frotte ensuite avec de la poudre de pierre-ponce très fine et mouillée qui met le métal à nu.

Le fer, l'acier et la fonte *bruts* doivent séjourner trois ou quatre heures dans le bain de décapage, puis être frottés avec de la poudre de grès bien tamisée et mouillée; on recommence les deux opérations jusqu'à disparition de la couche d'oxyde.

Pile. — La source de courant la plus commode pour les amateurs est la pile-bouteille au bichromate, on règle le courant en enfonçant plus ou moins le zinc; cependant, pour une marche continue, cette

pile est trop vite épuisée et on préfère soit la pile au bichromate à deux liquides et à treuil, soit des accumulateurs ou une dynamo ; on devra pouvoir disposer en tous cas de 5 à 6 volts et la source devra fournir une intensité de courant en rapport avec la surface des objets à nickeler.

Nous indiquerons plus loin le moyen de conduire le bain et de voir si l'intensité du courant est convenable.

Bain. — On a donné bien des formules de bains de nickelage, mais la plus simple est encore la meilleure : il suffit, en effet, de faire dissoudre à saturation, dans de l'eau distillée chaude, du sulfate double de nickel et d'ammoniaque exempts d'oxydes de métaux alcalins et alcalino-terreux. La dissolution se compose en poids de :

Eau distillée.....	10 parties
Sulfate double de nickel et d'ammoniaque.....	1 —

Ce bain doit être filtré après refroidissement, il donne de très bons résultats, mais, comme tous les autres, il a besoin de vieillir un peu.

Cuve et mise au bain. — La meilleure cuve est une cuve en verre, en porcelaine ou en grès, mais dans l'industrie, où l'on a parfois de grands objets à nickeler, on préfère employer une caisse revêtue d'un mastic imperméable.

Le pôle positif de la source d'électricité, pile ou machine, sera relié à une ou plusieurs plaques de nickel, suivant l'importance du bain, suspendues par

des crochets en cuivre nickelé à une tringle, comme dans les autres procédés.

Les pièces préparées sont plongées pendant un instant dans un bain de même composition que celui qui a servi au décapage, lavées rapidement à l'eau ordinaire puis à l'eau distillée. On les porte alors *rapidement* au bain, on les immerge et on les accroche aussitôt.

Conduite du courant et durée de l'opération. —

Si le courant est trop intense, on s'en aperçoit tout de suite, car le nickel se dépose sous forme de poudre noire ou grise. Une heure ou deux suffisent pour une couche d'épaisseur moyenne, il faut de cinq à six heures pour une couche très épaisse. Au sortir du bain, les objets sont lavés à l'eau ordinaire et mis à sécher dans la sciure de bois chaude.

Polissage des pièces. — Généralement les pièces qui sortent du nickelage n'ont pas l'aspect d'un beau brillant qu'on leur connaît, et elles demandent à être polies. Pour cela, on les frotte par un rapide mouvement de va-et-vient sur une mèche de lisière de drap, que l'on a enduit au préalable d'une bouillie claire de poudre à polir et d'eau. La bande de drap est accrochée d'une part à un clou et maintenue tendue d'autre part de la main gauche ; les parties creuses inaccessibles à la lanière sont ensuite polies avec des tampons de drap fixés au bout de bâtonnets. Les objets polis sont lavés à l'eau, qui enlève les traces de bouillie et les poils de laine, puis séchés à nouveau dans la sciure de bois.

Il convient, toutefois, de faire remarquer que pour

pour obtenir un beau poli, les pièces doivent avoir été *parfaitement* polies elles-mêmes *avant* le nickelage. Enfin, rappelons que, pour obtenir un dépôt *solide* et *durable* de nickel sur le fer ou l'acier, il est préférable de cuivrer les objets avant de les nickeler.

CHAPITRE II

EXTRACTION DES MÉTAUX DE LEURS MINÉRAIS

De la galvanoplastie à l'extraction des métaux de leurs minerais, il n'y a qu'un pas... théorique et par conséquent vite franchi.

Principe. — Dissolvons un minerai, de cuivre par exemple, dans un acide approprié, puis soumettons cette dissolution à l'action du courant électrique, en employant au pôle positif une plaque insoluble, en platine ou en charbon de cornue par exemple. Nous savons, d'après ce qui précède, que si nous disposons une plaque conductrice reliée au pôle négatif de notre source de courant, le cuivre contenu dans la liqueur va s'y déposer purement et simplement.

Voilà tout le secret, et cette méthode naturellement nous l'appliquons à un minerai quelconque. En réalité, comme nous allons le voir, elle ne peut servir que pour certains métaux, et, pour le cuivre en particulier, ce n'est pas aussi facile que cela en a l'air.

En effet, la méthode repose sur la dissolution du

minéral dans un acide, or, outre que le procédé peut revenir fort cher, cela ne réussit pas toujours. Les minerais de cuivre que l'on rencontre le plus fréquemment dans la nature sont des combinaisons de soufre et de cuivre difficilement solubles. Dans la métallurgie ordinaire ces minerais subissent une série de grillages et de fontes dans des fours chauffés au rouge de façon à les rendre de plus en plus riches en cuivre, en brûlant et en chassant ainsi le soufre. On finit par avoir une masse qui contient un peu de soufre et les autres impuretés du minéral; en tous cas, le cuivre s'y trouve en forte proportion et c'est pour le purifier et le débarrasser de ses impuretés que l'on applique, à ce moment seulement, le traitement électrique.

Affinage électrique du cuivre. — C'est Elkington, l'inventeur de la dorure et de l'argenture électriques, qui a fait breveter dès 1865 un procédé d'affinage du cuivre par voie électrolytique. Grâce à cette méthode on est parvenu à obtenir un métal d'une pureté extraordinaire, inconnu jusqu'alors.

Voici, en deux mots, comment on procède :

L'affinage électrolytique consiste à faire passer un courant électrique dans une solution de sulfate de cuivre, en se servant au pôle positif d'une plaque de cuivre impur, c'est-à-dire le résultat de plusieurs grillages et de plusieurs fontes du minéral.

Comme dans le premier bain de cuivrage que nous avons décrit, le courant enlève le cuivre, et le cuivre seulement, c'est ce qui fait la beauté du procédé, et va le déposer au pôle négatif où on le recueille. Les

impuretés qui étaient mélangées au cuivre brut tombent au fond de la cuve.

Ainsi donc, sans peine aucune, en fournissant simplement au bain le courant électrique, dont il a besoin, nous obtenons un bloc de métal d'une pureté extraordinaire.

A côté de ces manifestations bruyantes du courant électrique que nous venons de voir, tramways, chemins de fer, etc., en voici de silencieuses, tout aussi puissantes, qui arrivent à triompher des difficultés que nous oppose la nature.

L'aluminium, le métal de l'avenir, comme on l'a appelé, qui valait facilement 50 francs le kilogramme avant la découverte des procédés électriques d'extraction, va devenir l'égal du cuivre comme prix, c'est dire si les tarifs se sont abaissés.

Extraction de l'or. — L'or lui-même, le roi des métaux, profite, aussi, des procédés électrochimiques pour se séparer de ses minerais. Le traitement en vaut la peine, car ce métal si recherché se rencontre très disséminé; c'est souvent par ci par là, au milieu d'amas de sables ou de roches que se trouvent quelques paillettes. Le traitement électrochimique a l'avantage de ne rien laisser perdre en rassemblant autour du pôle négatif tout l'or disséminé dans le minerai.

Plusieurs procédés ont été essayés, mais seul le procédé Siemens et Halske a donné de bons résultats et a été essayé sur une assez grande échelle en Transylvanie, en Sibérie et au Transvaal.

Le minerai du Transvaal est peu riche en or, c'est un conglomérat de roches réunies par un ciment ren-

fermant l'or assez disséminé en grains microscopiques généralement recouverts d'une légère couche noire.

On se rendra compte de la petite quantité de métal précieux qu'on peut y rencontrer lorsqu'on saura qu'il n'y a guère que 15 à 20 grammes d'or à la tonne.

Le minerai sortant de la mine est séparé des poussières trop pauvres pour être traitées. Il est ensuite concassé et lavé sous des pilons où il ne tarde pas à se transformer en une boue liquide qui s'échappe du mortier et tombe sur une table en cuivre rouge mouillée de mercure qui retient l'or contenu dans cette boue. On retire ainsi la moitié de l'or que renferme le minerai, mais ce procédé qui n'a rien d'électrique ne convient qu'aux parcelles d'or un peu grosses.

La boue restante est traitée par le cyanure de potassium qui dissout l'or (voir bain de dorure); ce dernier en est ensuite extrait par le courant électrique par électrolyse absolument comme si on voulait faire de la dorure; on conçoit cependant que ce procédé soit plus lucratif, car on n'a pas la peine d'acheter son bain.

Affinage de l'argent. — De même que pour le cuivre, on n'extrait pas directement l'argent de ses minerais, le procédé électrochimique intervient pour le purifier en le débarrassant de toutes ses impuretés.

Il consiste à attaquer, par l'action du courant, des morceaux d'argent brut (1) contenus dans un sac

(1) Résultant d'un premier traitement chimique du minerai, comme pour le cuivre.

que l'on relie au pôle positif d'une dynamo. Le bain est une solution d'azotate d'argent préparé une fois pour toutes et qui sert, en somme, de véhicule au courant et à l'argent. On recueille de l'argent remarquablement pur, il titre 999 au pôle négatif, tandis que les impuretés restent dans les sacs. Ces boues ne sont pas jetées, car elles renferment souvent de l'or et du platine, on les met de côté pour les traiter à leur tour lorsqu'on en a une certaine quantité.

Comme on le voit, ce procédé est économique, car, outre qu'il ne coûte pas beaucoup de main-d'œuvre, il permet de recueillir sûrement et facilement la totalité des autres métaux précieux disséminés dans le minerai et qui se perdaient par les anciens procédés.

Extraction de l'aluminium. — Comme nous le disions plus haut, c'est grâce à l'application des procédés électrochimiques d'extraction que l'aluminium, ce métal sonore comme le bronze et léger comme le carton, a pu se répandre dans l'industrie et devenir tous les jours meilleur marché.

Mais ce n'est pas sans mal que l'on est arrivé à ce résultat, on a tout d'abord essayé, mais vainement, de décomposer des solutions aqueuses de ce métal à la température ordinaire, il a fallu abandonner ces procédés qui fonctionnent avec les autres métaux et opérer à de très hautes températures.

Il faut remonter jusqu'en 1854 pour trouver les premiers essais de préparation de l'aluminium avec concours de l'électricité.

A cette époque-là, en effet, Bunsen et Sainte-Claire Deville obtinrent ce métal en soumettant à l'électro-

lyse, mais à haute température, un de ses sels, le chlorure double d'aluminium et de sodium.

Le bain était maintenu fondu au rouge à l'aide d'une source extérieure de chaleur.

En raison du prix élevé de l'énergie électrique produite uniquement par des piles, on ne pouvait penser à cette époque qu'un tel procédé deviendrait industriel. Il fallut l'intervention de la machine dynamo, d'une part, et son adaptation aux chutes d'eau, d'autre part, pour obtenir enfin une source d'énergie capable à la fois de décomposer le bain et de le maintenir à une haute température.

Nous passons sous silence l'historique des tentatives qui furent faites à partir de 1884, tous les essais n'ayant donné que des résultats médiocres, mais ayant cependant contribué à élucider la question. De tous ces procédés un seul a survécu après quelques perfectionnements, celui de Héroult qui date de 1886 ; on cite également le procédé Hall, mais en somme les analogies avec le premier sont nombreuses, aussi est-ce le procédé que nous décrirons.

Ainsi que nous le disions plus haut, il est nécessaire, pour extraire l'aluminium de ses minerais, de fondre ces minerais, et pour cela une très haute température est nécessaire, ces corps étant la plupart infusibles dans nos foyers ordinaires.

On y est arrivé en portant la masse à l'incandescence par l'action du courant. Un fil de platine ou le filament de charbon d'une lampe à incandescence peuvent bien être portés au blanc éblouissant par le courant électrique. Le minerai le sera également, car il n'y a qu'une question d'intensité de courant à faire entrer en jeu.

Il faut, en effet, des courants excessivement intenses de plusieurs milliers d'ampères, et pour avoir économiquement ces courants, il n'y a que les chutes d'eau, jusqu'à présent, qui peuvent nous les procurer.

De puissantes usines hydro-électrique se sont fondées pour la fabrication de l'aluminium, ce sont celles de : la Praz, Froges, Saint-Michel-de-Maurienne, pour n'en citer que les plus importantes, dont la puissance totale s'élève à plus de 18 000 chevaux !

Presque toutes ces usines exploitent le procédé Héroult, plus ou moins modifié, et dont nous allons donner le principe.

Procédé Héroult. — L'appareil se compose d'une cuve en tôle d'acier solidement rivée, sorte de marmite dont l'intérieur est revêtu d'une couche dure et épaisse faite d'un mélange de coke, de graphite et de goudron. Cette garniture est appliquée sur une épaisseur de 15 à 20 centimètres à l'état semi pâteux que lui donne la présence du goudron. On ménage au bas un trou de coulée qui servira à retirer l'aluminium.

Lorsque tout est fini et que la croûte commence à durcir, on porte la cuve dans un four spécial analogue aux fours qui servent à cuire la poterie ou les briques et on l'amène peu à peu à la température du rouge blanc, puis on la laisse refroidir lentement. L'opération dure quarante-huit heures.

Au bout de ce temps l'enduit de coke de goudron et de graphite s'est transformé en une matière excessivement dure et conductrice du courant analogue au charbon de cornue.

La cuve est prête, il ne reste plus qu'à l'utiliser.

On place dans la cuve un mélange d'alumine et de cryolithe. Le premier est un minerai d'aluminium que l'on trouve en grande abondance dans la nature sous des noms divers, ce n'est en somme que de l'oxyde d'aluminium ; la cryolithe, qui est un fluorure double d'aluminium et de sodium, est au contraire plus rare dans nos pays, on la trouve encore assez répandue dans l'Oural et surtout au Groënland.

Elle est nécessaire car elle augmente la fluidité de l'ensemble, on en consomme peu et le vrai minerai en somme qui sert à l'extraction est l'alumine que l'on trouve à très bas prix.

La cuve est reliée par de gros câbles au pôle négatif d'une puissante dynamo capable de fournir plusieurs milliers d'ampères, le pôle positif aboutit à un énorme bloc de charbon de cornue analogue à un crayon de lampe à arc, mais de dimensions infiniment plus grandes.

Le minerai pulvérisé étant mis dans la cuve en petite quantité, on fait descendre peu à peu au-dessus de lui à l'aide d'une vis le charbon en question.

Bientôt il arrive au contact des parois et une étincelle se produit, les parties en contact rougissent et le minerai ne tarde pas à fondre au voisinage de ce charbon incandescent ; en fondant il devient beaucoup plus conducteur du courant qu'il ne l'était à l'état solide. Le courant venant de la dynamo par le gros charbon, traverse la masse fondue du minerai, va retrouver les parois de la cuve tapissées de charbon et de là retourne au pôle négatif de la machine.

En traversant ainsi la masse liquide, le courant produit deux effets, l'un physique, l'autre chimique. En premier lieu, il chauffe le minerai liquide qui

oppose à son passage une certaine résistance et, en second lieu, il décompose ce minerai et l'aluminium vient tapisser les parois en charbon de la cuve ; vu la haute température, il reste à l'état liquide et on n'a plus qu'à ouvrir de temps en temps le trou de coulée pour le recueillir.

C'est, on le voit, fort simple et extrêmement ingénieux, l'appareil se maintient chaud automatiquement et l'aluminium est recueilli en lingots à l'état de pureté.

La main de l'homme intervient seulement pour rapprocher de temps en temps à l'aide d'une vis le charbon supérieur qui s'use peu à peu comme s'use le charbon positif d'une lampe à arc et à ajouter de temps à autre quelques pelletées de minerai pour remplacer celui qui se trouve décomposé.

Il n'en était pas de même dans l'ancien procédé de fabrication purement chimique, où, nus jusqu'à la ceinture, les ouvriers devaient brasser avec un ringard la masse en fusion pendant des heures et n'obtenir en échange que quelques menus lingots d'aluminium.

Aujourd'hui c'est l'énergie de la houille blanche, celle des torrents impétueux qui se trouve asservie et mise à profit pour ravir à la nature les secrets de ses combinaisons pour le plus grand bien de l'humanité.

Remarque. — Il ne faut pas confondre ce procédé avec le *four électrique* dont nous parlerons à propos du carbure de calcium. En effet, dans la préparation de l'aluminium on n'a guère que 7 à 8 volts entre le charbon positif et les parois de la cuve, le courant n'agit que pour porter le charbon et le bain à l'incandescence, comme il le ferait avec une lampe à incan-

descence, et il n'y a ni arc ni flamme à l'intérieur du bain qui est liquide et que le courant décompose comme il le décomposerait du sulfate de cuivre.

Dans le four électrique qui sert à la préparation du carbure de calcium, il y a, au contraire, comme nous le verrons, 40 à 50 volts entre les charbons; c'est une véritable lampe à arc de grande puissance, car une flamme jaillit entre les charbons et c'est elle qui est utilisée comme moyen de chauffage pur et simple.

Le peu de tension (7 à 8 volts) qu'exigent les bains de préparation de l'aluminium a permis de monter plusieurs bains en série, comme on monterait des piles, de telle sorte que si l'on a 10 ou 12 bains, une dynamo d'éclairage produisant 110 volts les alimentera tous à la fois; il faudra toutefois qu'elle puisse fournir plusieurs milliers d'ampères, des intensités énormes étant nécessaires pour porter le bain et les charbons à l'incandescence.

Il convient également de remarquer que l'on n'a pas à craindre d'interruption générale provenant de l'arrêt d'un bain par suite de son épuisement, car la marche est continue comme celle d'un haut fourneau; il suffit de l'alimenter en minerai comme nous l'avons dit et d'avancer peu à peu le charbon positif; un peu avant qu'il soit complètement usé on en dispose un neuf à côté, relié également au pôle positif, qui peu à peu viendra prendre la place de l'ancien.

Chaque bain peut fonctionner environ trois mois d'une façon non interrompue, et un ouvrier peut en conduire quatre ou cinq facilement.

Au bout de trois mois les appareils ont besoin d'être démontés et réparés, car sous l'action de cette tempé-

rature si élevée les parois de la cuve se désagrègent peu à peu.

L'usine de La Praz, dans la Savoie, non loin de Modane, dont nous donnons une vue de la salle des

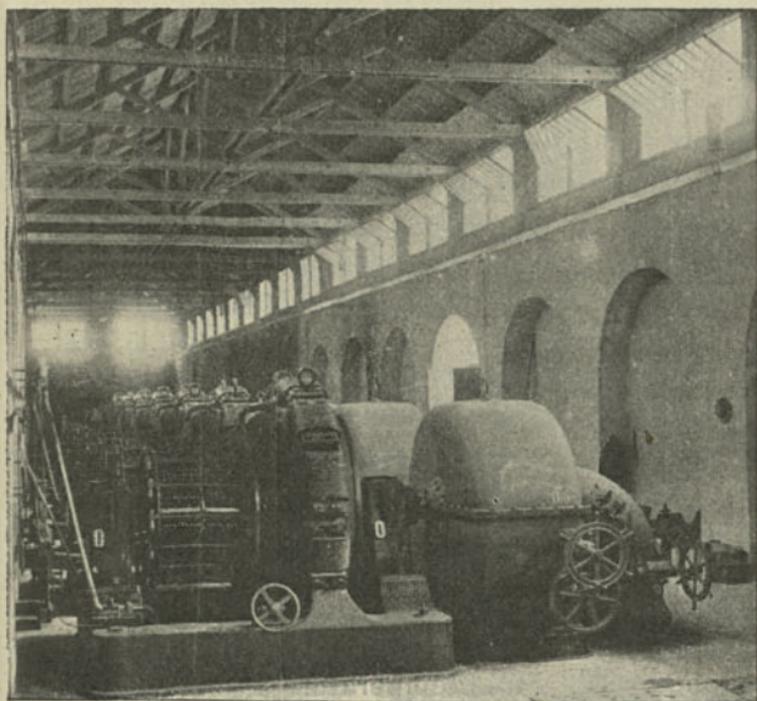


Fig. 70. — Vue intérieure de la salle des machines de l'usine *La Praz* pour la fabrication de l'aluminium.

machines, permet de se faire une idée de la puissance colossale ainsi demandée aux chutes d'eau ; on y trouve vingt génératrices, système Thury, donnant chacune 3 000 ampères à 110 volts, à la vitesse de 250 tours par minute. Ces machines sont toutes couplées entre elles de façon à disposer au total de 60 000 ampères, avec 110 volts pour la fabrication de l'aluminium.

L'énergie est empruntée à un torrent impétueux, l'Arc, dont on n'utilise encore qu'une petite partie. On distingue très bien sur la figure, à droite les turbines, à gauche les dynamos.

Aluminothermie. — Nous ne pouvons quitter l'aluminium sans parler d'un procédé remarquable qui utilise ce métal pour la soudure autogène de métaux réputés comme difficiles à souder.

Si ce procédé n'est pas électrique, il a du moins l'électricité pour origine puisqu'il représente en somme une partie de l'énorme quantité d'énergie que le courant a dû céder au bain Héroult pour l'obtention de l'aluminium.

C'est en quelque sorte un peu de cette chaleur dont nous disposons avec l'aluminium et que nous pourrions réaliser où bon nous semblera par la combustion de ce métal. Il suffit, en effet, de pulvériser de l'aluminium, de mélanger sa poudre ou sa limaille à un oxyde, de fer par exemple, pour obtenir à l'aide d'une cartouche et d'une allumette un splendide feu d'artifice capable de nous livrer un petit lingot de fer comme résidu, à une température très élevée.

Convenablement appliquée entre deux pièces à souder, deux rails par exemple, cette poudre une fois allumée va en provoquer l'union intime et les deux parties ne feront plus qu'un seul bloc.

Le mécanisme de ce procédé est très simple : l'aluminium pulvérisé et mélangé à un oxyde métallique, de l'oxyde de fer par exemple, ne demande qu'à brûler et à reprendre l'oxygène que le courant lui a brutalement enlevé dans le bain Héroult.

Cette occasion, nous la lui offrons avec une car-

touche spéciale allumée par une allumette : la réaction se produit, l'aluminium brûle en enlevant l'oxygène de l'oxyde de fer et en élevant considérablement la température de l'ensemble, ce qui porté à l'état liquide le fer débarrassé de son oxygène aussi bien que tous les objets qui sont dans son voisinage. Voilà donc plus qu'il n'en faut pour faire de la soudure et il suffira de mettre plus ou moins de poudre pour souder des objets petits ou grands. Une dent cassée à un engrenage, un tuyau en fer brisé, des rails ébréchés, etc., pièces perdues autrefois, peuvent aujourd'hui se réparer instantanément, grâce à l'*aluminothermie*; tel est le nom donné à ce procédé.

Voilà bien, semble-t-il, l'accumulateur rêvé qui, sous forme d'un métal léger, nous permettra de transporter dans toutes les parties du monde l'énergie de nos chutes d'eau. La température énorme qu'il a fallu produire pour obtenir l'aluminium se retrouve dans la combustion de ce métal, et pourra être utilisée dans bien des cas. N'oublions pas cependant que si la température est très élevée, la quantité de chaleur est relativement faible.

MM. Karlet et Hans Goldschmidt, à Essen-sur-Ruhr, les auteurs de ce procédé, sont parvenus à le rendre pratique en préparant des mélanges de l'aluminium en poudre avec l'oxyde du métal à souder que l'on enflamme au moyen d'une cartouche de bioxyde de baryum et d'aluminium, par l'intermédiaire d'une allumette-tison.

Nous allons, à titre d'exemple, donner la description des opérations à effectuer pour la soudure de deux tubes de fer; la soudure des rails est analogue; quant à la réparation des pièces usées et abîmées,

elle est excessivement simple, la seule partie délicate étant le choix d'un oxyde ou d'un mélange d'oxydes capables de donner naissance à un métal aussi semblable que possible comme constitution que celui de la pièce à réparer.

Prenons le cas de deux tubes de fer : on commence d'abord par bien nettoyer les parties à réunir, à la lime par exemple ; on joint les deux tubes en les serrant dans des pinces maintenues par des tirants à vis, qui permettent non seulement d'unir intimement les deux branches à souder, mais encore de forcer le serrage lorsqu'on arrive au point voulu.

La partie à souder est entourée d'un moule en tôle très simple, qui épouse la forme du tube en laissant le jeu nécessaire pour recevoir la coulée du mélange de chauffe.

Pour opérer la soudure, on met dans un creuset en terre réfractaire une petite quantité de poudre d'aluminium mélangée à de l'oxyde de fer ; ce mélange porte le nom de *thermite* ; on en provoque l'allumage au moyen d'une cartouche d'allumage au bioxyde de baryum et d'une allumette-tison ; on ajoute alors progressivement la quantité convenable de *thermite*. Au bout de quelques secondes, la fusion est complète et l'on verse le contenu du creuset dans le moule ; le fer ou le métal de l'oxyde que l'on a mis dans la *thermite* se sépare et s'amasse en lingot à la partie inférieure. En quelques instants, les tubes ont pris la température du rouge blanc ; on force alors sur les vis de serrage, et les deux parties du tube s'unissent intimement.

Au bout de quelques minutes, on enlève le moule et on fait tomber la gangue ; la soudure est faite.

Cette opération est excessivement simple et réussit toujours très bien, surtout lorsque l'opérateur a quelque pratique, mais en somme la principale habileté consiste dans la rapidité.

CHAPITRE III

FABRICATION DES PRODUITS CHIMIQUES ET DES COULEURS

A côté des applications que nous venons de voir et qui concernent les dépôts métalliques obtenus par l'action du courant électrique il en est d'autres qui forment une branche de l'industrie électrochimique, tout aussi importante, et dont nous dirons quelques mots.

1° Fabrication des liqueurs de blanchiment et des chlorures décolorants. — Depuis longtemps on a constaté que si l'on fait arriver les deux fils d'une pile Leclanché, par exemple, dans un vase en verre contenant de l'eau rendue conductrice par un peu d'acide sulfurique on voit apparaître des bulles gazeuses autour des fils, à condition toutefois que ces derniers soient en métal inattaquable, en platine par exemple; ces gaz ne sont autres que l'hydrogène et l'oxygène qui entrent dans la composition de l'eau.

L'hydrogène apparaît autour du fil en relation avec

le pôle négatif de la pile et l'oxygène autour du fil positif.

Cette expérience est devenue classique aujourd'hui mais est restée à peu près sans application industrielle.

Tout autre est l'électrolyse de l'eau salée. Prenons du sel marin par exemple, faisons-le dissoudre dans l'eau et soumettons cette eau à l'action du courant, nous voyons encore des gaz se dégager autour des fils, nous pouvons reconnaître l'oxygène et l'hydrogène comme précédemment, mais en plus petite quantité cependant, surtout l'oxygène. Au bout d'un certain temps notre liqueur sent le chlore; elle est devenue de l'eau de Javel excellente pour le blanchiment.

La matière première est bon marché: c'est le vulgaire sel marin; pour la transformer en liquide décolorant il suffit de la soumettre quelques instants au courant électrique.

Bien des industries se sont emparées de cette nouvelle application et aujourd'hui de nombreuses papeteries blanchissent ainsi leur pâte à papier, car toutes disposent en général d'une dynamo qui sert à éclairer l'usine la nuit et à préparer de la liqueur de blanchiment le jour.

Il en est de même dans les teintureries.

Dans la papeterie Bergès, à Lancey (Isère), on emploie un appareil de ce genre qui fonctionne d'une façon continue et dont nous donnerons la description.

L'électrolyseur ou l'appareil dans lequel le liquide salé est soumis à l'action du courant est en E; il se compose d'une cuve contenant des lames de platine très minces pour ne pas être d'un prix trop élevé et

220 LES GRANDES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ
sur lesquelles se dégageront les gaz de l'électrolyse ;

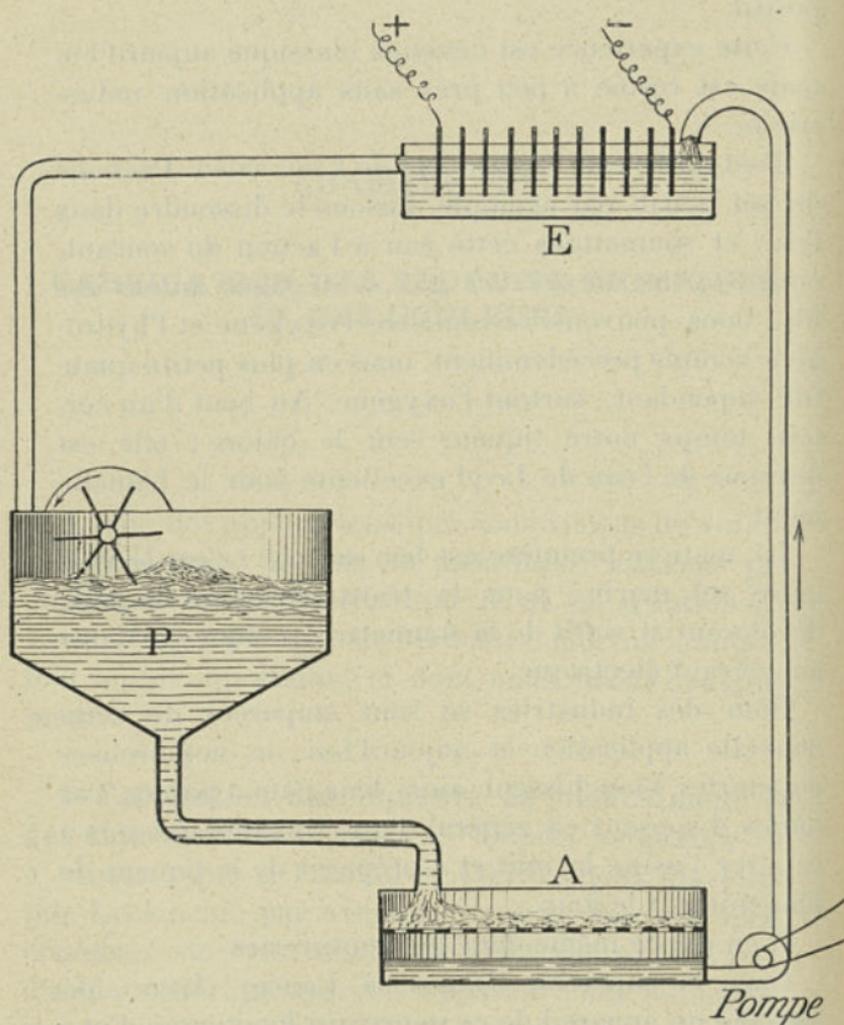


Fig. 71. — Installation de blanchiment électrique
dans une papeterie

les lames extrêmes sont reliées par des fils à une
dynamo donnant 110 volts. L'appareil renferme

13 lames de platine et absorbe au total 110 volts et 150 ampères.

La cuve étant remplie d'une dissolution de sel marin, environ 25 grammes par litre, celle-ci ne tarde pas à se transformer en excellente eau de Javel prête au blanchiment. On la fait écouler par un tube d'où elle se rend à une cuve contenant la pâte à papier qu'il s'agit de décolorer et de rendre blanche comme du lait, cette cuve s'appelle en terme de métier une pile, et pour forcer la pâte à se mettre en contact avec le liquide décolorant un moulinet la brasse constamment en la fouettant de ses ailes. Bientôt, l'effet se produit et la couleur devient de plus en plus blanche; on envoie alors la pâte sur un égouttoir en A, le liquide filtre au travers, une pompe le reprend et le renvoie à l'électrolyseur E; il a, en effet, perdu ou à peu près ses propriétés décolorantes; le rôle du courant va être de les lui rendre.

Comme on le voit, cet appareil permet de marcher sans arrêt et c'est en somme le même liquide qui sert.

En réalité, il faut ajouter de temps en temps un peu d'eau salée, car la pâte à papier qui reste sur l'égouttoir en retient toujours un peu; mais ce corps n'étant pas cher, le procédé reste économique.

Des appareils de ce genre fonctionnent aussi dans les teintureries, notamment à Thaon-les-Vosges; ils évitent l'emploi des eaux de Javel, chlorure de chaux, etc., qu'il fallait faire venir quelquefois de très loin et dont le transport doublait presque la valeur.

2° Fabrication des chlorates. — Conservons le même appareil à lames de platine et, au lieu de faire circuler l'eau salée à l'intérieur, laissons-la au repos,

soumise à l'action du courant. Il se produit de l'hypochlorite de soude, et du chlore tend à se dégager au pôle positif, il finit par transformer l'hypochlorite en chlorate et le tour est joué.

On remarque de plus que la présence de chromate de potassium facilite beaucoup la réaction sans qu'on ait jamais pu s'expliquer pourquoi. Il suffira ensuite de laisser cristalliser les solutions que le courant très intense dans les appareils industriels a fait chauffer et l'on recueillera de beaux cristaux de chlorate de potassium.

Ce produit qui valait 200 francs la tonne avant l'invention de ce procédé, a vu son prix descendre à 65 francs depuis quelques années à peine.

Le chlorate de potasse, quoique peut-être moins connu que l'eau de Javel ou les chlorures décolorants, est très employé en pharmacie; on l'emploie en grande quantité pour la fabrication des feux de bengale, et enfin surtout pour la fabrication des allumettes.

C'est en 1886 que MM. Gall et de Montlaur prirent en France un brevet pour la préparation du chlorate de potassium par voie électrolytique; après quelques essais à l'usine électrique de Villers-Saint-Sépulchre (Oise), ils érigèrent à Vallorbes (Suisse) à 2 kilomètres de la frontière française, la première fabrique de produits chimiques par l'électrolyse.

Cette usine eut un plein succès, et le chlorate de potassium, qui était fabriqué autrefois à peu près exclusivement en Angleterre, est obtenu actuellement par voie électrolytique en France, en Suisse et en Suède.

On est donc redevable à MM. Gall et Montlaur, non seulement de la préparation des chlorates, mais

également des progrès des autres industries électro-chimiques, car ce sont les résultats qu'ils ont obtenus, qui permirent d'admettre comme possible la préparation à bon marché des produits chimiques par ces procédés.

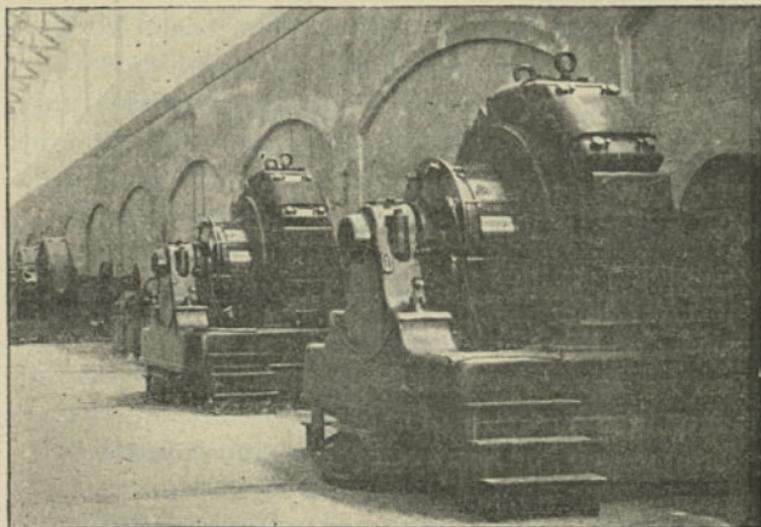


Fig. 72. — Vue intérieure de la salle des machines de l'usine de *Cheddes* (chlorate de potasse).

Outre l'usine de Vallorbes, en Suisse, produisant près de 200 tonnes de chlorate par an, on trouve en France deux grandes usines hydro-électriques : celle de *Cheddes* et celle de *Saint-Michel de Maurienne*, qui utilisent près de 8 000 chevaux et fournissent 5 000 tonnes de chlorate par an.

3° Fabrication de la soude et du chlore. — L'électrolyse de l'eau salée va encore pouvoir nous fournir de la soude caustique et du chlore à condition d'em-

ployer un électrolyseur spécial. Nous n'entrerons pas dans le détail des procédés, ce qui nous entraînerait trop loin, nous n'en indiquerons que le principe.

On utilise comme précédemment une solution de sel marin, mais on a soin de diviser la cuve, où se produit l'électrolyse, en deux compartiments, par une cloison poreuse, un vase poreux par exemple. Dans l'un des compartiments, plonge une lame métallique reliée au pôle négatif de la dynamo, et dans l'autre, une lame de platine ou mieux, ce qui est moins cher, une plaque de charbon graphitique fabriqué d'une façon analogue aux crayons de lampes à arc et en communication avec le pôle positif de la dynamo. Sous l'effet de l'électrolyse il se dégage du chlore au pôle positif, que l'on peut recueillir si on a eu soin de fermer ce compartiment et de le munir d'une tubulure et dans le compartiment négatif on trouve de la soude caustique que l'on peut utiliser comme lessive.

Fabrication des couleurs — L'électrolyse trouve encore son application dans la fabrication de certaines couleurs, elle permet d'utiliser quelquefois des déchets de métaux et en tout cas si l'on dispose d'une chute d'eau le produit peut revenir bon marché.

1° Céruse ou carbonate de plomb. -- Cette couleur qui est de moins en moins employée dans la peinture, (sa fabrication par les procédés ordinaires étant nuisible à la santé des ouvriers), pourrait peut-être reprendre sa vogue grâce aux procédés électriques. Le blanc de céruse qui a été remplacé par le blanc de zinc est plus apprécié des peintres, car il s'applique bien mieux.

En 1890, Turner a réussi à obtenir du carbonate de plomb d'un blanc éclatant, et jouissant des propriétés courantes généralement demandées dans l'application à la peinture, en soumettant à l'électrolyse une solution d'un mélange d'azotate d'ammoniaque et de carbonate de soude, en se servant de deux plaques de plomb pour faire passer le courant dans le liquide. Pendant l'opération, la plaque de plomb reliée au pôle positif se trouve rongée et tend à se dissoudre dans le liquide, c'est toujours le principe de la galvanoplastie ; en présence du carbonate de soude, le plomb passe à l'état de carbonate qui tombe au fond. Afin de maintenir constante la composition du liquide on fait passer dans le bain un courant d'acide carbonique gazeux qui reforme le carbonate de soude décomposé.

Lorsque la marche de l'opération est bien réglée on a un très beau produit que l'on peut recueillir à l'aide d'une vis d'Archimède, ce qui permet de marcher ainsi d'une façon continue.

2° Fabrication du vermillon ou sulfure de mercure. — On arrive de la même manière à fabriquer le vermillon, mais le produit revient plus cher surtout à cause du point de départ qui est le mercure, ce métal liquide et brillant comme l'argent.

Pour la production électrolytique du vermillon, on emploie couramment dans l'industrie un appareil composé d'une cuve en bois de un mètre de diamètre et de deux mètres de hauteur ; on dispose dans cette cuve des plateaux circulaires bien horizontaux sur lesquels on étale une couche de mercure qui sera reliée au pôle positif de la dynamo. Le pôle négatif est relié à une simple plaque de cuivre aciérée reposant sur le fond.

On remplit la cuve avec une solution contenant 8 pour 100 d'azotate d'ammoniaque et 8 pour 100 d'azotate de soude.

Lorsqu'on fait passer le courant, le mercure, qui est relié au pôle positif, est attaqué et tend à se dissoudre ; mais on fait arriver dans le bain bulle à bulle de l'hydrogène sulfuré, gaz nauséabond qui sent les œufs pourris ; bientôt, le sulfure de mercure se forme, il est d'un beau rouge et il se dépose au fond de la cuve où on le recueille. Ce produit peut rivaliser facilement avec les produits obtenus par les procédés ordinaires de la chimie industrielle.

3° Fabrication du bleu de Prusse. — Si on prend deux plaques de fer reliées chacune à un des pôles d'une source de courant, une dynamo par exemple, et qu'on les plonge dans une solution de ferrocyanure de potassium on ne tarde pas à voir la plaque reliée au pôle positif se recouvrir d'une couche de bleu de Prusse qu'il suffira de gratter de temps en temps pour le faire tomber et le recueillir.

Mais ce procédé fort simple qui permet d'utiliser de vieilles ferrailles est un peu plus compliqué en pratique et l'étude complète sortirait du cadre même de cet ouvrage.

A l'aide de procédés analogues, on fabrique le *jaune de cadmium*, le *vermillon d'antimoine*, le *vert de Scheele*, le *vert mitis*, le *rouge japonais*, etc.

Comme on le voit l'énergie électrique ouvre là un champ nouveau aux découvertes, elle simplifie surtout les opérations et diminue la main-d'œuvre. Le grand avantage de ces applications est que l'on

obtient une marche continue presque sans surveillance qui peut se poursuivre nuit et jour si on le désire ; elles permettront, lorsqu'elles seront plus développées, de mieux utiliser les forces motrices hydrauliques naturelles en faisant travailler constamment dans des bains d'électrolyse le courant électrique obtenu par elles.

Il nous reste à dire un mot de deux autres modes d'application du courant à la préparation de produits chimiques. Il n'est plus question ici d'électrolyse mais bien de l'électrothermie et de l'effluve.

En premier lieu le four électrique et ses applications à la fabrication du *carbure de calcium* corps merveilleux qui donne l'acétylène au seul contact de l'eau. En second lieu l'acide nitrique que l'on vient d'obtenir industriellement par les étincelles ou décharges électriques.

CHAPITRE IV

ÉLECTROTHERMIE

Four électrique. — En 1892, M. Moissan, ayant eu besoin pour ses recherches de soumettre des métaux à une température supérieure à 2000°, pensa à utiliser la chaleur fournie par l'arc électrique. Un certain nombre d'essais avaient été faits avant lui, notamment par Deprez, Siemens, Cowles, Grabau, Acheson, etc.

L'idée première qui dirigea M. Moissan resta constante depuis et, dans tous les appareils qu'il utilisa, seules des dispositions de détail furent apportées. Cette idée était de soustraire les matières traitées ou à traiter à l'action de l'arc et des électrodes, et de séparer ainsi, d'une façon certaine, l'action thermique du courant de l'action électrolytique ; ce qui n'avait pas été fait jusque-là.

Le premier four qu'a utilisé M. Moissan était en chaux-vive. Il était constitué par deux briques en chaux-vive bien dressées et appliquées l'une sur l'autre. La brique inférieure portait une rainure longitudinale destinée à laisser passer les charbons entre lesquels

jaillirait l'arc; au milieu, se trouvait un petit logement servant de creuset.

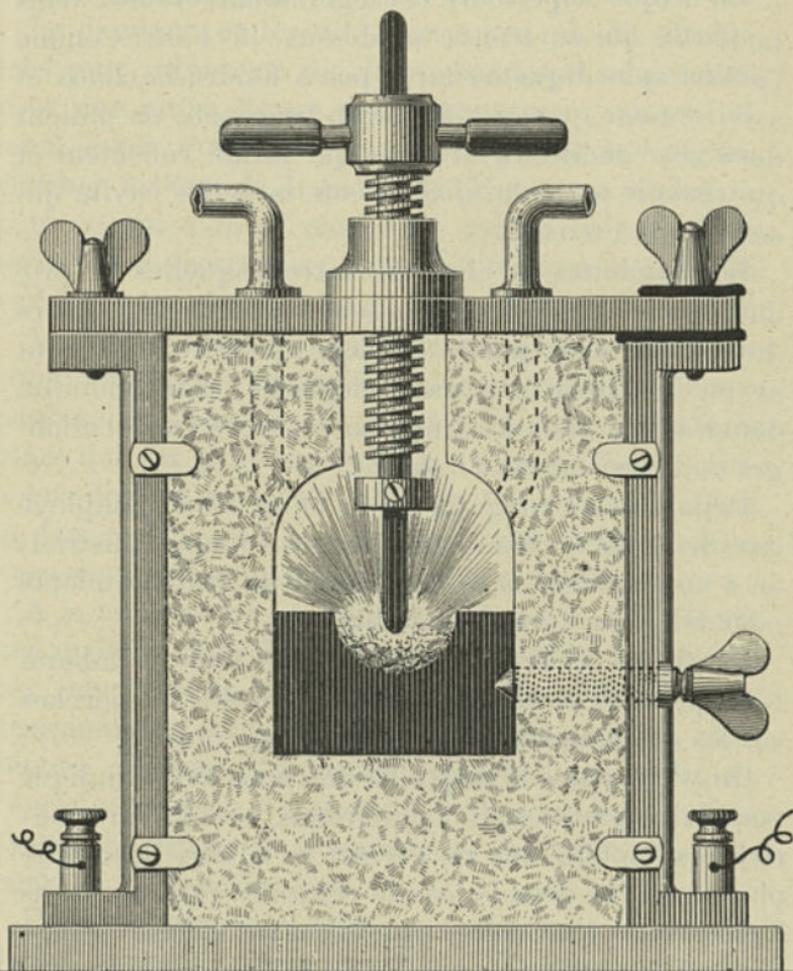


Fig. 73. — Four électrique.

Cette cavité qui peut être plus ou moins profonde contient le produit sur lequel doit porter l'action de l'arc, en une couche de plusieurs centimètres d'épais-

seur. On peut également mettre le produit dans un creuset en charbon.

La brique supérieure est légèrement creusée dans la partie qui se trouve au-dessus de l'arc. Comme l'action calorifique ne tarde pas à fondre la chaux et à lui donner, par cela même un beau poli, on obtient dans ces conditions un dôme qui forme réflecteur et qui renvoie toute la chaleur sur la petite cavité qui contient le creuset.

Les baguettes de charbon entre lesquelles se produit l'arc sont mobiles ; elles sont supportées en dehors du four par deux pinces qui leur amènent le courant et que l'on peut facilement déplacer ; cette mobilité donne une grande facilité pour amorcer l'arc, l'allonger ou le raccourcir à volonté.

Depuis on a changé la forme et on a aussi employé des charbons inclinés, mais dans les fours industriels on a une tendance à se rapprocher du système adopté pour la préparation de l'aluminium.

La figure 73 donne une vue d'un four de laboratoire pouvant servir à des essais ou des recherches sur les combinaisons aux hautes températures.

On y reconnaît le dispositif que nous avons indiqué pour la préparation de l'aluminium, le charbon supérieur est mobile, une vis permet de le faire descendre plus ou moins dans la cavité centrale qui a la forme d'un creuset. Une espèce de creuset en charbon occupe le fond de cette cavité, on dépose dessus ou autour les matières à traiter et on fait passer le courant. Des tubes permettent aux gaz de s'échapper ou même de faire circuler certains gaz dans le foyer si on le désire.

Reproduction du diamant. — Voilà un titre bien

prétentieux et cependant c'est grâce au four électrique que M. Moissan a pu arriver, *en petit* il est vrai, à obtenir du diamant.

Le diamant, on le sait, n'est autre que du charbon très pur, autrement dit du carbone, qui se présente sous une autre forme malheureusement excessivement rare. Pour arriver à faire passer le vulgaire charbon à l'état de diamant, M. Moissan a réalisé en petit ce qui a dû se passer en grand au sein de la terre à une époque fort ancienne où tout était bouleversé par les révolutions géologiques.

M. Moissan a utilisé l'augmentation de volume que subit une masse de fonte de fer au moment de son passage de l'état liquide à l'état solide. Comme la glace qui est plus légère que l'eau, la fonte solide a une densité plus faible que la fonte liquide. C'est un fait connu dans la pratique industrielle que les morceaux de fonte surnagent le bain liquide.

A la température du four électrique, le fer dissout une quantité considérable de carbone qu'il abandonne par refroidissement à l'état de graphite. Si le refroidissement est brusque, une partie du carbone ainsi déposé présente l'aspect du diamant par suite de l'énorme pression à laquelle il a été soumis, la masse ayant une tendance à augmenter de volume au moment de la solidification.

Pour réaliser cette curieuse expérience, on chauffe dans le creuset du four électrique 200 grammes de fer doux de Suède, coupé en cylindres de 1 à 2 centimètres de longueur et de 1 centimètre de diamètre après avoir recouvert le tout de charbon de sucre. La durée de l'opération est de quelques minutes seulement. On enlève le couvercle et le creuset saisi au

moyen d'une pince en fer, est plongé brusquement dans un vase rempli d'eau froide.

Cette expérience remarquable qui consiste à plonger dans l'eau froide un creuset rempli de fer liquide porté à 3000° se fait sans aucun danger.

Le creuset et le métal *restent au rouge* pendant quelques minutes au sein même de l'eau et dégagent des bulles gazeuses qui viennent crever à la surface du liquide. La température diminue rapidement, le creuset se refroidit et toute lueur disparaît finalement.

Le reste de l'expérience ne peut avoir lieu naturellement que dans le laboratoire.

On traite le culot de fer par l'acide chlorhydrique pour dissoudre tout le fer. Il reste un résidu de charbon sous différentes formes; ce résidu subit des traitements successifs dans l'eau régale, l'acide sulfurique, l'acide fluorhydrique, etc.

On arrive ainsi à laisser comme résidu une poudre cristalline formée de fragments opaques et de fragments transparents qui rayent le verre et même le rubis et qui, examinés au microscope, ont l'aspect des diamants naturels. Les rendements obtenus sont malheureusement insignifiants.

Fabrication du carbure de calcium. — La grande vogue du carbure de calcium tient à ce que ce produit fabriqué au moyen des matériaux les plus communs, le charbon et la chaux, donne, au contact de l'eau, un abondant dégagement de gaz acétylène dont le pouvoir éclairant est considérable, soit environ *quinze* fois celui du gaz de houille ordinaire.

Cet éclairage, qui promettait beaucoup dès les pre-

nières applications, n'a pas reçu le développement qu'on attendait de lui ; cela paraît tenir d'abord à ce que, étant très riche en carbone, malgré tous les dispositifs imaginés, il ne brûle pas complètement et laisse échapper une suie très désagréable. Si l'on ajoute à cela son odeur et surtout les dangers d'explosion lorsque l'appareil est manié par une personne incompétente, on conçoit que la consommation de carbure qui en est le point de départ ne puisse augmenter que lentement.

Le carbure de calcium a son origine dans le four électrique que nous venons de décrire, c'est un des premiers produits que l'on y a obtenus, on peut dire même sans le chercher. En effet, les électrodes de charbon d'une part, et la chaux vive qui constituait les parois du four d'autre part, devaient donner sous la haute température de l'arc, du carbure de calcium par l'union de ces deux corps. Ce n'est que quelque temps après la mise en service du four électrique que M. Bullier, en 1894, prit un brevet pour un four industriel destiné à fabriquer le carbure de calcium. Depuis, bien d'autres brevets ont été pris, mais le principe des fours est resté le même.

Généralement on les constitue par une cuve en maçonnerie dont le fond est formé d'un creuset en fer mobile et porté sur un chariot ; le fond de ce creuset est revêtu d'une garniture en charbon obtenue comme pour le creuset à aluminium ; cette partie est reliée par l'enveloppe en fer à l'un des pôles de la dynamo, peu importe lequel, puisqu'il ne s'agit plus d'électrolyse. Les parois latérales sont protégées par un enduit de chaux et de charbon intimement mélangés en vue de leur combinaison. L'autre pôle de la

dynamo est relié à un bloc de charbon composé de plusieurs plaques réunies entre elles, ce bloc est suspendu à une pince en fer qui permet de l'élever ou de l'abaisser à l'aide d'une vis.

Au début de l'opération on rapproche le charbon supérieur du fond de la cuve jusqu'à faire jaillir l'arc, la réaction est alors amorcée et on achève de remplir le creuset avec un mélange en proportions convenable de charbon en poudre et de chaux. Il est bon de remarquer ici que du courant continu n'est pas nécessaire pour cette fabrication et pour le four électrique en général. En effet, le courant n'agit que comme agent de chauffage à cause de la haute température que procure l'arc, on peut donc aussi bien employer le courant alternatif et c'est même généralement ce que l'on fait, les dynamos génératrices devenant bien plus simples par suite de la suppression du collecteur.

Après quatre heures de marche environ, la quantité de carbure de calcium produite est suffisante ; on interrompt alors le courant et, après une heure de refroidissement on peut retirer le carbure.

A l'usine de Froges, dans l'Isère, où l'on fabrique aussi de l'aluminium, le four employé pour fabriquer le carbure de calcium est constitué par un simple cube en graphite de 1,5 m. de côté présentant en son milieu une cavité dans laquelle on introduit les produits en même temps qu'une barre en charbon de cornue reliée à la dynamo. Une vis permet, comme toujours d'élever ou d'abaisser le charbon supérieur.

Il est assez facile de juger de la marche d'un four par la grandeur des flammes qui s'en échappent. Au début et pendant presque toute l'opération on voit

brûler au-dessus des produits et autour de l'électrode mobile de l'oxyde de carbone provenant de la réaction, puis peu à peu la flamme baisse d'intensité et disparaît presque lorsque l'opération est terminée.

Dans cette même usine de Froges, les coulées se font toutes les quarante minutes environ et la production journalière d'un four est de 300 kilogrammes de carbure de calcium environ.

Les usines fabriquant le carbure de calcium en France sont assez nombreuses. Nous les résumons sous forme de tableau ; elles montreront quelle puissance énorme est empruntée aux chutes d'eau pour la fabrication de ce produit.

Il est bon de noter en passant que, tandis que les creusets à aluminium n'absorbent que 7 à 8 volts, chaque four à carbure exige de 70 à 100 volts ; l'intensité y atteint de 1 000 à 2 000 ampères : la puissance qu'ils absorbent est donc considérable.

La puissance des usines énumérées ci-dessous a été exprimée en kilowatts, unité bien plus électrique que le cheval, désignation surannée que les électriciens emploient de moins en moins ; il suffit de se rappeler que un kilowatt représente 0,7 cheval-vapeur. Le kilowatt qui représente à peu près 1 000 kilogrammètres par seconde est bien plus commode à employer, car les calculs sont simplifiés pour l'évaluation de la puissance d'une chute d'eau par exemple.

La mesure de la puissance en kilowatts a, de plus l'avantage d'être faite instantanément dans toute usine électrique par la simple lecture du voltmètre et de l'ampèremètre, avec le courant continu et avec une approximation grossière avec le courant alternatif.

Tableau des principales usines françaises pour la fabrication du carbure de calcium

N O M des SOCIÉTÉS OU INDUSTRIELS	LOCALITÉS où SONT LES USINES	RIVIÈRES UTILISÉES	Hau- teur de chute en mètres	Puissance totale en kilowatts
Société des carbures métalliques (Paris).....	Usine de Notre-Dame de Briançon	L'eau Rousse..	250	2 250
Compagnie générale d'Electrochimie de Paris.	Ragat (Moutiers).....	Le Merderel...	367	5 625
Société des forces motrices des Alpes-Marit. à Nice.	Sechilienne.....	La Romanche..	10	870
Société hydroélectrique de Fure et Morgé...	Usine de Serres (Htes-Alpes) ..	Le Buech.....	32	1 875
Société des forces motrices du Haut-Grésivaudan	Plan du Var (Alpes-Maritimes).	Le Var.....	20	4 500
Société électrochimique de la Romanche....	Usine de Champ (Isère).....	Le Drac.....	33	13 373
	Usine du Cernou (à Chapareillan)	Le Cernou....	612	900
	Livet (Isère).....	La Romanche..	60	9 428
	Rioupérour (Isère).....	La Romanche..	34	2 100
	Chedde (Haute-Savoie).....	L'Arve.....	32	2 250
	Gorges de Chaille.....	Le Guiers.....	140	2 250
	Epierre (Savoie).....	Les Fourneaux.	88	2 250
	Marignier (Haute-Savoie)...	Le Giffre.....	360	1 167
	Bellegarde (Ain).....	La Valsérine..	70	6 750
	Saint-Félix de Maurienne....	L'Arc.....	6	275
	Saint-Michel de Maurienne...	L'Arc.....	22	1 875
	Saint-Albon des Villards.....	L'Arc.....	18	2 625
		Le Merlet.....	220	825
				61 188

On sait, en effet qu'il suffit de multiplier l'une par l'autre les indications de ces appareils.

Comme on le voit, la puissance totale utilisée atteint le chiffre de 61 188 kilowatts, soit pour ceux plus familiarisés avec l'emploi du cheval-vapeur de : 83 000 chevaux ! Cette seule puissance est utilisée à fabriquer du carbure de calcium, mais si on ajoute à cela la puissance des usines utilisant le courant électrique pour la fabrication d'autres produits tels que le chlore, la soude, l'aluminium, le chlorate de potasse, etc., on arrive à des chiffres bien plus considérables, notons en passant que d'autres chutes plus puissantes sont encore disponibles, et qu'il ne reste qu'à les utiliser.

CHAPITRE V

PRODUCTION DE L'ACIDE NITRIQUE PAR LES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES

Depuis longtemps on a remarqué que les pluies d'orage renferment de l'acide nitrique et à la fin du XVIII^e siècle Cavendish et Priestley avaient montré que des vapeurs nitreuses se formaient par le passage des étincelles électriques dans l'air.

Bien des savants ont étudié ce phénomène, qui est dû en somme à la combinaison de l'azote et l'oxygène dont le mélange forme l'air où nous vivons. Le mécanisme de cette action s'expliqua lorsqu'on sut que pour se combiner et former des vapeurs nitreuses, l'oxygène et l'azote ont besoin d'une certaine quantité de chaleur ; et c'est l'étincelle électrique qui la leur fournit.

Tout récemment M. de Kowalski a pu créer sur ce principe un appareil industriel utilisant les décharges électriques pour la fabrication de l'acide nitrique. M. de Kowalski fait éclater de puissantes étincelles dans une tour en grès inattaquable aux acides, les pièces métalliques entre lesquelles partent les étin-

celles sont constituées par des tiges d'aluminium que l'acide nitrique n'attaque pas. Dans la tour circule un courant d'air et de la vapeur d'eau, l'acide nitrique formé se dissout dans la vapeur et se condense sur les parois où on le recueille.

L'énergie est fournie, naturellement, par des chutes d'eau; on l'utilise sous forme de courants alternatifs dont on élève la tension à plus de 50 000 volts au moyen de transformateurs appropriés.

Le meilleur rendement obtenu jusqu'à ce jour paraît être de 52 à 55 grammes d'acide nitrique par kilowatt-heure, mais le procédé n'a pas encore dit son dernier mot et tout fait espérer qu'on arrivera encore à de bien meilleurs résultats.

Comme on le voit, les moyens d'arriver à triompher des difficultés de toute sorte que nous offre la nature, ne manquent pas, grâce à l'électricité. L'électrochimie en particulier offre un champ immense de recherches, et nous n'avons pu esquisser qu'un aperçu des résultats obtenus. Nous serons heureux toutefois si ce modeste ouvrage a pu mettre le lecteur en goût et l'engager à travailler ces problèmes, à la fois si beaux et si délicats, que nous offre la science électrique.

FIN

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	I
Les applications industrielles de l'électricité. — Éclairage électrique	VIII
Transmission de la force à distance. — Définitions générales. — Mécanisme des transmissions d'énergie électrique.....	IX
Applications électrochimiques.....	XX

PREMIÈRE PARTIE

Les sources industrielles d'électricité et les transformateurs.

CHAPITRE I. — Les sources industrielles d'électricité.....	1
Machine élémentaire.....	4
1° Dynamos industrielles à courants alternatifs.....	6
Dynamos à courants alternatifs triphasés.....	8
Principe des machines à courants triphasés.....	9
Détails de construction des alternateurs.....	11
2° Dynamos industrielles à courant continu	15
Induit.....	17
Inducteurs.....	19

CHAPITRE II. — Les transformateurs	22
1° Transformateurs de courants alternatifs.....	23
Description d'un transformateur industriel.....	29
Transformateurs de courants triphasés en courants triphasés.....	31
Transformateurs de courant continu en courant continu.....	33
2° Transformateurs de courants alternatifs en courant continu.....	30
Transformation de courants triphasés en courant continu.....	37
Exemples d'installations.....	39
CHAPITRE III. — Choix du courant suivant les applications	
Éclairage électrique.....	43
Transmission de la force à distance et traction électrique.....	44
Électrochimie.....	45

DEUXIÈME PARTIE

Transmission de l'énergie à distance.

CHAPITRE I. — L'éclairage des villes	
Installations à courant alternatif.....	50
Emploi du courant continu.....	53
Distribution à plusieurs fils.....	55
CHAPITRE II. — Transmission de la force à distance. — Les moteurs électriques	
Fonctionnement des moteurs électriques à courant continu.....	61
Les moteurs électriques à courant continu :	
1° Induit.....	65
2° Collecteur.....	69
3° Balais.....	71
Force contre-électromotrice.....	72

Différents systèmes d'excitation des moteurs :	
Moteur série.....	75
Moteur shunt ou en dérivation.....	76
Moteur compound.....	78
Appareils de mise en marche et de réglage.....	79
Changement de marche.....	81
Conclusions.....	83
Les moteurs électriques à courants alternatifs :	
1° Moteurs triphasés.....	87
Détails de la construction.....	90
Avantages.....	92
Inconvénients.....	93
Conclusions.....	94
2° Moteurs à courant alternatif simple.....	95
CHAPITRE III. — Les canalisations pour la transmission de l'énergie à distance.....	
Lignes de transmission.....	98
Isolateurs.....	100
CHAPITRE IV. — Les appareils de protection des lignes de distribution d'énergie électrique.....	
Fils fusibles.....	103
Disjoncteurs automatiques.....	104
Parafoudres.....	106
CHAPITRE V. — Installations diverses de transmission d'énergie à grande distance.....	
Les installations électriques de la ville de Milan.....	111
Alternateurs.....	114
Ligne aérienne.....	116
Sous-stations.....	116
Les installations électriques de la ville de Lausanne.....	118
Barrage.....	121
Turbines.....	121
Dynamos.....	121
Ligne aérienne de transport.....	122
Usine réceptrice.....	122
Retour par la terre.....	124

CHAPITRE VI. — Transmission de la force dans les usines et les ateliers.....	126
Avantages des transmissions électriques :	
I. Avantages d'installation.....	129
II. Avantages d'exploitation.....	130
III. Avantages économiques.....	132
Exemples d'installation.....	132

TROISIÈME PARTIE

La traction électrique.

CHAPITRE I. — Avantages de la traction électrique.	139
CHAPITRE II. — Tramways électriques.....	142
1° Traction par trolley aérien.....	144
2° Traction par trolley souterrain.....	148
3° Traction par contacts superficiels.....	150
4° Traction par accumulateurs.....	154
CHAPITRE III. — Les chemins de fer électriques.....	157
Chemin de fer métropolitain.....	159
Prise de courant.....	162
Locomotives électriques.....	164
Traction par unités multiples.....	165
Chemin de fer électrique de Caunterets.....	167
Chemin de fer de Chamonix.....	171
CHAPITRE IV. — Automobiles électriques.....	174
Description.....	175
Moteurs.....	178
Les accumulateurs.....	179
Construction des accumulateurs pour automobiles...	180
Accumulateurs divers avec des métaux autres que le plomb.....	183
1° Accumulateurs au zinc ..	183
2° Accumulateurs au cuivre.....	184
3° Accumulateurs au nickel.....	184

QUATRIÈME PARTIE

L'électrochimie.

CHAPITRE I. — Galvanoplastie	185
Préparation des objets.....	187
1° Cuivrage.....	189
Laitonissage.....	192
2° Argenture	194
3° Dorure.....	196
4° Nickelage	198
Pile. — Bain.....	199
Cuve et mise au bain.....	200
Conduite du courant et durée de l'opération.....	201
Polissage des pièces.....	201
CHAPITRE II. — Extraction des métaux de leurs minerais	203
Principe.....	203
Affinage électrique du cuivre.....	204
Extraction de l'or.....	205
Affinage de l'argent.....	206
Extraction de l'aluminium.....	207
Procédé Héroult.....	209
Aluminothermie.....	214
CHAPITRE III. — Fabrication des produits chimiques et des couleurs	218
1° Fabrication des liqueurs de blanchiment et des chlorures décolorants.....	218
2° Fabrication des chlorates	221
3° Fabrication de la soude et du chlore.....	223
Fabrication des couleurs :	
1° Céruse ou carbonate de plomb	224
2° Fabrication du vermillon ou sulfure de mercure.....	225
3° Fabrication du bleu de Prusse.....	226

CHAPITRE IV. — Électrothermic	228
Four électrique.....	228
Reproduction du diamant.....	231
Fabrication du carbure de calcium.....	232
CHAPITRE V. — Production de l'acide nitrique par les décharges électriques	238